

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

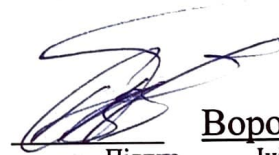
Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом»

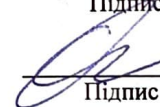
КвРКІ 016023.06.11 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-20-1



Воробійов В.С.
Ініціали, прізвище

Керівник доктор техн. наук, професор
Науковий ступінь, вчене звання



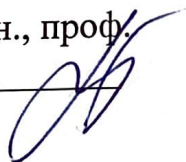
Бармак О.В.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС, д.т.н., проф.

Т.О. Говорущенко

_____ 2022 р.



Хмельницький, 2022

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

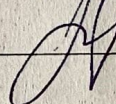
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Т.О.Говорущенко



“ 01 ” 09 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ)

Воробйову Володимиру Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Керівник проекту (роботи) Бармак О.В., д.т.н., професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 06.01.2022 р. №1

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 03.05.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Технології інтернету речей

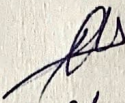
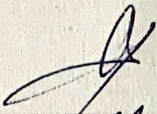

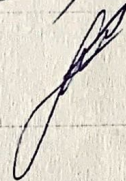
Моделювання компонентів мережі lorawan

Удосконалений метод оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за lorawan стандартом

Практична реалізація компонентів інтернету речей за lorawan стандартом

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

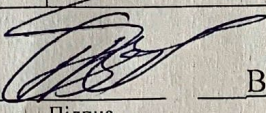
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Лисенко С.М., професор кафедри КІС		
Антиплагіат	Нічепорук А.О., доцент кафедри КІС		

7. Дата видачі завдання « 06 » 09 2021р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики ДРМ з керівником	05.09.2021	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	05.10.2021	виконано
3	Робота над розділом 1 –аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	05.11.2021	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	05.12.2021	виконано
5	Робота над науковою статтею	05.01.2022	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2022	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	05.04.2022	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	15.04.2022	виконано
9	Попередній захист ДРМ	18.04.2022	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 10.05.2022	

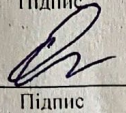
Студент


Підпис

В.С. Воробйов

Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи)


Підпис

О.В. Бармак

Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи: Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Автор роботи: Воробйов Володимир Сергійович

Керівник роботи: д.т.н., проф. Лисенко С.М.

Пояснювальна записка: 88 с., 28 рис., 5 табл., 4 дод., 50 джерел.

IoT, LoRaWAN, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МОДЕЛЬ, МЕТОД, ОПТИМІЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНА МЕРЕЖА, КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА.

Об'єкт дослідження – процес оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Предмет дослідження – моделі, удосконалений метод та програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Метою дипломної роботи є оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися основні положення системного аналізу, методів аналізу даних, теорії дискретної математики, теорії комп'ютерних мереж та систем..

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, який на відміну від відомих враховує модуляцію та поширення сигналу, втрати при поширенні, втрати проникнення в будівлю, корельоване затінювання, чутливість приймача, фізичні перешкоди, особливості функціонування шлюзу, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

2. Набули подальшого розвитку програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, які забезпечують успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

Практична цінність. В результаті виконаного наукового дослідження було розроблено програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП.....	6
1 ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	8
1.1 Технології IoT. Рішення для підключення до Інтернету речей.....	8
1.1.1 Низькошвидкісні бездротові персональні мережі	10
1.1.2 Стільниковий Інтернет речей.....	11
1.1.3 Глобальні мережі малої потужності.....	12
1.2 Модуляція LoRa.....	13
1.2.1 Реалізація частотного розширеного спектру LoRa.....	14
1.2.2 Пакети фізичного рівня LoRa	16
1.2.4 Основні мікросхеми Semtech і незалежні реалізації.....	19
1.3 Стандарт LoRaWAN.....	20
1.3.1 Топологія та класи пристроїв.....	20
1.3.2 Структура пакетів і команди MAC.....	23
1.3.3 Шифрування та активація пристрою	25
1.3.4 Діапазони частот	26
1.4 Висновки	26
2 МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МЕРЕЖІ LORAWAN.....	28
2.1 Аналіз компонентів мережі LoRa	28
2.1.2 Моделювання ефекту захоплення	31
2.1.3 Протокол з кількома стрибками для пристроїв LoRa.....	31
2.2 Модель оцінювання якості зв'язку	32
2.2.1 Модель втрат при поширенні.....	33
2.2.2 Втрати при проникненні в будівлю	34
2.2.3 Моделювання корельованого затінювання	36
2.3 Модель продуктивності зв'язку.....	40
2.3.1 Чутливість приймача.....	40
2.3.2 Перешкоди	42

2.3.3 Модель шлюзу	46
2.3.4 Модель застосування	47
2.4 Висновки	49
3 УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЯ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ЗА LORAWAN СТАНДАРТОМ.....	50
3.1 Основи удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.....	50
3.1.2 Компоненти мережі, що беруть участь в процесі проектування	51
3.1.3 Обчислення коефіцієнта поширення.....	52
3.2.1 Продуктивність пропускної здатності	56
3.2.2 Ефективність ймовірності успіху	62
3.2.3 Статистика факторів розповсюдження.....	66
3.2.4 Оцінка покриття шлюзу.....	68
3.5 Висновок	72
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ЗА LORAWAN СТАНДАРТОМ.....	74
4.1 Реалізація стенду для симуляції мережі LoRa	74
4.2 Модуль lora	78
4.2.1 PeriodicSender.....	78
4.2.2 LoraMac	79
4.2.3 LoraPhy	80
4.2.4 LoraChannel	83
4.2.5 LoraNetDevice	87
4.2.6 Інші класи системи.....	87
4.3 Помічники та тести	89
4.4 Результати роботи	90
4.5 Висновки	91
ВИСНОВКИ.....	92
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	94

Додаток А Набір класів, необхідних для моделювання стеку протоколів на пристрої	100
Додаток Б Розподіл факторів розповсюдження для різних моделей поширення	101
Додаток В Копія тез доповіді на Всеукраїнській науково-практичній конференції Актуальні Проблеми Комп'ютерних Наук (АПКН-2021).....	102
Додаток Г Презентація доповіді	106

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

IoT – Інтернет речей

ЖЦ – життєвий цикл

ПК – персональний комп'ютер

ІС – інформаційна система

КС – комп'ютерна система

ВСТУП

Все більше і більше повсякденних об'єктів підключаються до Інтернету, поступово будуючи майбутнє, описане парадигмою Інтернету речей (IoT).

Очікується, що ринок розумних пристроїв значно зросте, за оцінками, до 2023 року буде активним 20 мільярдів пристроїв IoT або більше, що, отже, принесе прогнозований щорічний економічний ефект у діапазоні від 2,7 трлн до 6,2 трлн доларів до 2025 року.

Сфери застосування цієї нової парадигми підключення та збору даних включають галузі охорони здоров'я, транспорт, розумні будинки, сільське господарство, виробництво та управління міською інфраструктурою, серед багатьох інших, при цьому охорона здоров'я та виробництво, як очікується, будуть домінуючими ринками

Тому задача проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом є на сьогодні надзвичайно важливою.

Метою кваліфікаційної роботи магістра роботи є оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Поставлена мета досягається розв'язанням наступних задач:

1. Провести аналіз та дослідження технологій Інтернету речей, зокрема, LPWAN, LoRa, виокремлено вимоги до IoT.
2. Розробити моделі різних компонентів системи LoRaWAN.
3. Розробити удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.
4. Спроекувати та дослідити програмно-апаратну реалізацію розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Об'єкт дослідження – процес оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Предмет дослідження – моделі, удосконалений метод та програмно-технічні засобами оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу, методів аналізу даних, теорії дискретної математики, теорії комп'ютерних мереж та систем.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, який на відміну від відомих враховує модуляцію та поширення сигналу, втрати при поширенні, втрати проникнення в будівлю, корельоване затінювання, чутливість приймача, фізичні перешкоди, особливості функціонування шлюзу, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

2. Набули подальшого розвитку програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, які забезпечують успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

Практична цінність. В результаті виконаного наукового дослідження було розроблено програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

За темою дипломної роботи опубліковано тези у Всеукраїнській науково-практичній конференції Актуальні Проблеми Комп'ютерних Наук (АПКН-2021) [1]. Було взято участь у Всеукраїнській науково-практичній конференції Актуальні Проблеми Комп'ютерних Наук.

1 ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Технології IoT. Рішення для підключення до Інтернету речей

Існують різні архітектури, які намагаються представити, як працюватимуть пристрої IoT. Однак найпростішу модель можна визначити в стеку, що складається з трьох компонентів, кожен з яких відповідає різному завданню високого рівня, як показано на рисунку 1.1:

1. Рівень сприйняття збирає дані від датчиків і керує приводами;
2. Мережевий рівень з'єднує пристрої, щоб можна було обмінюватися інформацією між собою або з централізованим приймачем даних;
3. Прикладний рівень зберігає, інтерпретує та використовує зібрані дані.

Сценарій IoT ставить перед собою кілька ключових проблем, які необхідно вирішити будь-якою технологією, що працює на рівні мережі:

1. Масштабованість: прогнозується, що щільність пристроїв буде близько 60000 пристроїв на км² [2-3]. Мережі IoT повинні будуть підтримувати модуляції та схеми доступу до середовища, які забезпечують таке густонаселене бездротове середовище, і динамічно адаптувати параметри мережі для досягнення найкращої можливої ефективності в умовах частого перевантаження мережі та зіткнення пакетів.

2. Вартість пристрою: радіочіпи повинні бути якомога дешевшими, щоб допомогти постачальникам отримати перевагу на ринку за рахунок зниження ціни на пристрій. Витрати на підписку на доступ до мережі також повинні бути якомога нижчими.

3. Термін служби батареї пристрою: більшість пристроїв Інтернету речей працюють від батарейок, і для скорочення витрат на обслуговування мережі необхідна тривала автономія. Загальноприйнята цільова цифра для терміну служби батареї датчика та звітного пристрою становить від 5 до 10 років на 2 батарейках типу AA, залежно від частоти передачі.

4. Обчислювальна потужність пристроїв: очікується, що пристрої Інтернету речей мають дуже базові ЦП. Це обмеження обмежує складність мережевих протоколів і модуляції, які повинні використовуватися цими пристроями.

5. Глибоке покриття всередині приміщень: очікується, що пристрої зможуть спілкуватися навіть у разі сильної тіні. Це особливо актуально для критичних додатків, де вимоги до швидкості успішної доставки повідомлень будуть дуже жорсткими.

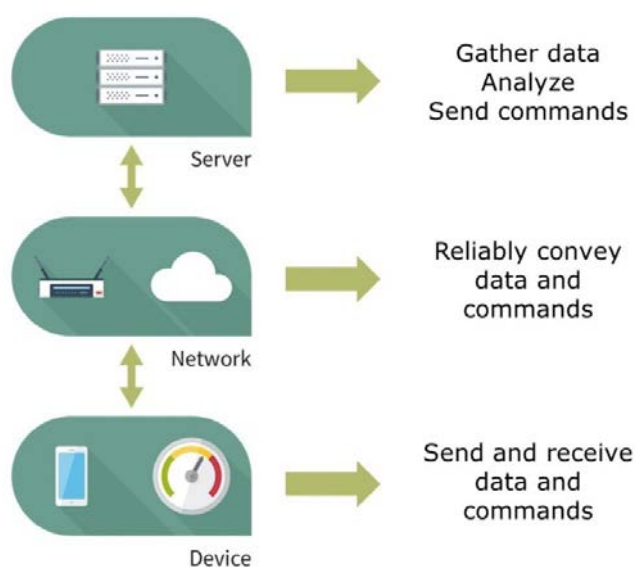


Рисунок 1.1 – Тришарова структура IoT [3]

Незважаючи на те, що вищезазначені вимоги мають бути виконані, наступні два аспекти не вважаються вирішальними для продуктивності пристроїв IoT:

1. Пропускна здатність: не очікується, що пристрої Інтернету речей підтримують високу пропускну здатність. Натомість очікується, що дані будуть надаватися нечасто і в невеликих обсягах.

2. Постійне підключення: переважна більшість пристроїв IoT не вимагатиме постійної активності. Це, наприклад, залишає місце для мережевого протоколу для використання сплячого режиму пристрою, щоб зменшити споживання батареї за ціною затримки передачі.

Здатність мережевого протоколу IoT задовольняти вищезгаданим вимогам необхідно ретельно дослідити, перш ніж впровадити масове розгортання. Наразі ведуться дебати щодо ефективної роботи багатьох різних мережевих стандартів. Одна конкретна архітектура мереж IoT, парадигма глобальної мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN), все ще знаходиться на стадії оцінки в дослідницькому співтоваристві: мета полягає в тому, щоб зрозуміти, чи є ці мережі життєздатним рішенням для розгортання масового IoT, і чи можливо конкурувати з іншими стандартами. Всеосяжне та точне моделювання мереж LoRa на системному рівні, яке враховує ряд кінцевих вузлів, які розгорнуті за реалістичним сценарієм поширення, з вулицями та будівлями, досі відсутні. Саме в цьому контексті ця теза представляє нові результати, демонструючи, що LoRaWAN забезпечує вищу пропускну здатність, ніж типовий протокол на основі ALOHA, без збільшення складності керування доступом до середовища (MAC). Для правильного моделювання мережі LoRaWAN спочатку пропонується модель мережі LoRa, а потім реалізується для розробки нового модуля в одному з найточніших симуляторів мережі системного рівня, які доступні на даний момент: ns-3 [4]. Потім за допомогою цього нового інструменту виконуються різні моделювання, щоб оцінити пропускну здатність, охоплення та багато інших важливих показників, які можна використовувати для розробки ефективної мережі з використанням технології LoRa.

Можна виділити три основні категорії конкурентів, які відрізняються за асортиментом, пропускну здатністю та вартістю. Не обов'язково тільки один із цих підходів виживе, оскільки кожен має певні сильні та слабкі сторони порівняно з іншими. Тим не менш, очевидно, що наразі існує конкуренція між кількома архітектурами, і що одна з них переважить і в кінцевому підсумку забезпечить основну частину підключення до пристроїв IoT.

1.1.1 Низькошвидкісні бездротові персональні мережі

Технології низькошвидкісної бездротової персональної мережі (LR-WPAN) створюють невеликі мережі, які зазвичай охоплюють і з'єднують між собою пристрої, що належать окремій особі або працюють у будинку. Ці стандарти забезпечують низьку швидкість передачі даних і зв'язок на короткій відстані, щоб зосередитися на ефективному використанні акумулятора.

Специфікація IEEE 802.15.4 для рівнів PHY і MAC забезпечує відправну точку для багатьох різних рішень, які спрямовані на доповнення стандарту з верхніми рівнями, як-от IPv6 через малопотужні бездротові персональні мережі (6LoWPAN), Z-Wave та Потік. На рівні мережі ці рішення передбачають сітчасту топологію, таким чином, передбачаючи багат шарові з'єднання: хоча підвищення надійності з'єднання є перевагою, використання вузлів як реле обмежує їхню здатність переходити в режим сну для економії заряду акумулятора, а маршрутизація вимагає додаткові обчислювальні роботи. Діапазон одного стрибка для цих пристроїв становить близько 10 м, зі швидкістю необроблених даних від 20 до 250 кбіт/с залежно від діапазону, який використовується. Ще одним помітним стандартом LR-WPAN є Bluetooth: з недавнім впровадженням Bluetooth Low Energy (BLE), ця технологія тепер може забезпечувати діапазон 100 м і швидкість передачі даних на рівні програми 270 кбіт/с, і, таким чином, підходить для програми, подібні до стандартів, заснованих на IEEE 802.15.4.

1.1.2 Стільниковий Інтернет речей

Стандарти стільникового Інтернету речей (CIoT) працюватимуть у ліцензованих діапазонах і використовуватимуть уже існуюче покриття стільникової мережі для забезпечення доступу до Інтернету до пристроїв IoT: той факт, що інфраструктура мережі вже встановлена, є великою перевагою і значно скорочує час розгортання. короткий.

На даний момент запропоновано три різні стандарти [5]: EC-GSM, LTE-M і NB-IoT. EC-GSM розроблено для використання та покращення застарілих

систем EDGE та GPRS для забезпечення кращого покриття та діапазону з обмеженими вимогами до живлення. LTE-M буде інтегровано з LTE, щоб використовувати його ємність і продуктивність, а також представити нові можливості енергозбереження для збільшення терміну служби акумулятора пристрою. Нарешті, новий стандарт NB-IoT буде зосереджений на ультранизьких програмах IoT, знову використовуючи існуючі інфраструктури LTE [5]. Очікується, що майбутні мережі 5G забезпечуватимуть підключення до пристроїв IoT.

1.1.3 Глобальні мережі малої потужності

LPWAN нещодавно з'явилися як альтернатива LR-WPAN і CIoT, головним чином завдяки обмеженням діапазону LR-WPAN і тому факту, що CIoT все ще знаходиться на дуже ранній стадії розгортання. Ці мережі забезпечують бездротове підключення з використанням топології «зірка» та передачу на великі відстані в неліцензованих діапазонах частот суб-ГГц [6]. Іншою великою перевагою, яку приносять LPWAN, є підвищена енергоефективність: багато з цих технологій досі заявляли про те, що здатні протримати пристрій протягом 10 років від кількох батарейок типу AA.

Одним з головних конкурентів серед стандартів для цієї архітектури є Sigfox, який використовує ультравузьку смугу модуляції (UNB), здатну надсилати 12 байт корисного навантаження за 6 секунд, використовуючи діапазон 100 Гц. Через правила діапазону, Sigfox наразі дозволяє користувачам надсилати до 140 повідомлень на день. Повідомлення, надіслані пристроями, потім приймаються шлюзом, який підключається до централізованого сервера Sigfox. З точки зору пристрою, доступ до бездротового середовища не регламентується, що робить Sigfox схемою довільного доступу, подібною до ALOHA. Очікується, що мережі Sigfox забезпечать масовий доступ до пристроїв на основі того факту, що сигнали є дуже вузькосмуговими і що частоти передачі вибираються випадковим чином. Нарешті, надсилаються три копії кожного

пакета з різними випадковими частотами, щоб зменшити ймовірність втрати пакета через зіткнення або частотно-селективне завмирання. Sigfox також обмежує кількість пакетів, які можуть бути відправлені з мережі на пристрій до 4 повідомлень на день.

На відміну від Sigfox, LoRa – це технологія, яка використовує нову конструкцію фізичного рівня з розширеним спектром (PHY), яка забезпечує більш високу чутливість приймача, щоб обмінювати швидкість передачі даних на покриття, зменшуючи першу, щоб збільшити другу. LoRa та LoRaWAN, відповідно, є запатентованою модуляцією, розробленою та належить корпорації Semtech [7], і мережевим стандартом, орієнтованим на використання корисних властивостей модуляції LoRa, запропонованої LoRa Alliance [8]. Модуляція LoRa забезпечує дуже хорошу чутливість приймача при обмеженій вартості чіпа, таким чином досягаючи передачі на великі відстані (до 13 миль у сільській місцевості) за ціною зниженої швидкості передачі даних в діапазоні 0,3 - 50 кбіт/с. У той же час стандарт LoRaWAN, який дозволяє кільком пристроям LoRa спілкуватися разом, спрямований на зміщення тягаря адміністрування мережі на центральну точку керування. Це дозволяє пристроям бути максимально простими і дає можливість. Центральний координатор має можливість легко налаштовувати параметри кожного пристрою для розміщення нових вузлів у мережі.

1.2 Модуляція LoRa

LoRa — це запатентована технологія рівня PHY, заснована на методі модуляції частотного розширеного спектру (CSS). Через те, що ця технологія запатентована, і чіткого опису модуляції немає. Деякі відомості можна знайти в напівофіційних документах від Semtech та LoRa Alliance, наприклад [9, 10, 11]. Однак ця порожнеча в документації була заповнена кількома дослідниками та любителями, які проаналізували та успішно перепроєктували модуляцію. Найбільш повним прикладом є робота [12].

1.2.1 Реалізація частотного розширеного спектру LoRa

Ідея CSS полягає в тому, що синусоїдний сигнал з лінійно змінною частотою та фіксованою тривалістю, який може використовуватися для «розповсюдження» інформації в більш широкому спектрі, ніж він зазвичай займає. Такий рівномірний розподіл символу на більшій пропускній здатності забезпечує стійкість до частотно-селективного шуму та перешкод за ціною меншої спектральної ефективності. Використовуючи деякі додаткові запобіжні заходи, CSS також може бути більш стійким до багатопроменевих перешкод і ефекту Доплера, ніж інші більш звичайні модуляції. Припустимо, що доступна смуга частот для передачі дорівнює $A = [z_0, z_1]$. Частоту можна побудувати так, щоб він лінійно збільшувався за частотою від початкової частоти $z_s \in A$ до тієї самої частоти, обертаючи від z_1 до z_0 , коли досягає кінця доступного діапазону. У LoRa початкова частота чирпу всередині доступної смуги, здається, використовується для представлення символу [13]. Кількість бітів, які LoRa кодує в символі, є налаштованим параметром, який називається SF. Це означає, що частота з використанням коефіцієнта розширення SF представляє 2^{SF} біти за допомогою символу, і що є $K = 2^{SF}$ можливих початкових частот.

Це означає, що, якщо припустити, що модуляція використовує фіксовану пропускну здатність, збільшення коефіцієнта розповсюдження на 1 призведе до отримання символів, які триватимуть вдвічі довше. Аналогічно, більша пропускна здатність збільшує швидкість, з якою передаються частоти, і, отже, швидкість модуляції. Збільшення часу передачі сигналу (тобто символу) надає повідомленню більшу стійкість до перешкод або шуму. З іншого боку, цей ефект може бути частково врівноважений тим, що для більш високих коефіцієнтів розповсюдження кількість можливих символів збільшується, що робить появу символних помилок більш вірогідним: причиною цього є досягнення синхронності між приймачем і приймачем. Сигнал особливо важливий, коли

використовуються низькі швидкості передачі даних. Ще одним недоліком передачі довгих повідомлень є підвищена ймовірність зіткнень.

Через наведені вище причини вибір SF впливає на чутливість приймача, яка визначається як:

$$S = -174 + 10 \log_{10}(A) + N + SN \text{ дБ}, \quad (1.2)$$

де перший член обумовлений тепловим шумом на приймачі в 1 Гц смуги пропускання, N - це показник шуму на приймачі (який фіксується для даної апаратної установки), а SN - це відношення сигнал/шум, необхідне для базова схема модуляції. Значення SN для різних коефіцієнтів розповсюдження представлені в таблиці 2.1, де видно, що збільшення коефіцієнта розширення дозволяє підвищити чутливість.

Дано рівняння (2.1), тепер можемо отримати бітрейт для певної пари SF і A за допомогою простого обчислення:

$$R_a = \frac{SF}{M_S} \quad (1.3)$$

Таблиця 1.2 - Бітрейт [біт/с] для ряду коефіцієнтів розповсюдження та пропускної здатності

12	25	50
68	13	27
39	78	15
21	43	87
12	24	48
67	13	26
36	73	14

Бітрейт для ряду коефіцієнтів розповсюдження та пропускної здатності можна знайти в таблиці 1.2.

1.2.2 Пакети фізичного рівня LoRa

Приклад пакету LoRa можна побачити на рисунку 1.1, де показано представлення спектрограми з часом на горизонтальній осі та частотою по вертикальній осі. Можна бачити, що повідомлення LoRa рівня РНУ складається з частотного сигналу, який розгортає смугу частот. Після деяких повторень цієї частотної розгортки, яка становить преамбулу (мінімальна довжина якої становить 4,25 сигналів), дані кодуються в сигналі як миттєві зміни частоти або їх відсутність. Процес декодування пропонується в [13], і він полягає в тому, що спочатку «де-чіп» сигналу, а потім виконується швидке перетворення Фур'є (FFT) сигналу з кількістю бінів, що дорівнює кількості символів M , що відповідає використаному коефіцієнту поширення. На рисунку 1.2 показана версія передачі LoRa з де-чірпом, знову ж таки з часом на горизонтальній осі і частотою по вертикальній: тепер сигнал можна інтерпретувати так, ніби він був промодульований за допомогою багаточастотної маніпуляції (MFSK). Використовуючи кілька перекриваючих БПФ і дивлячись на корзину з найвищим вмістом потужності, можемо виявити символ у кожному часовому кадрі.



Рисунок 1.1 Спектрограмне представлення сигналу LoRa [13]

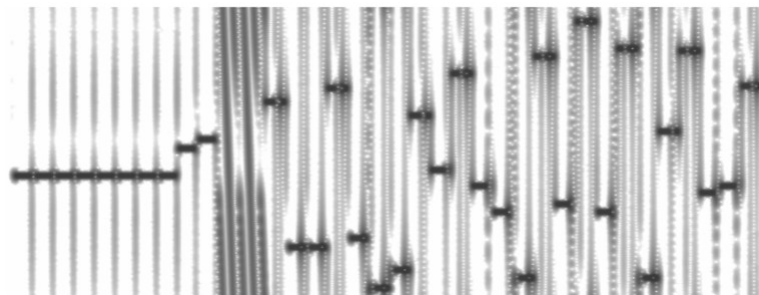


Рисунок 1.2 Версія сигналу LoRa

Крім самої модуляції, LoRa також визначає набір операцій кодування, які застосовуються перед модуляцією та передачею:

- Відбілювання даних використовується для того, щоб зменшити ймовірність довгих рівних бітів, що трапляються в даних. Відбілювання також допомагає розподілити інформацію по всій пропускну здатності радіоканалу. Слід зазначити, що [13] виявив, що послідовності відбілювання, зазначені в [14], відрізняються від версії, яка фактично реалізована в чіпах, але все ще зміг знайти правильну послідовність відбілювання.
- Пряме виправлення помилок (FEC) реалізовано як код Хеммінга. Довжина інформаційного слова коду фіксується на рівні 4 біт, а довжина кодового слова є настроюваним параметром у діапазоні [5, 8] біт. Таким чином, швидкість коду для пакета LoRa дорівнює $C \in \{4/5, 4/6, 4/7, 4/8\}$.
- Перемежування скрембує вихід FEC, щоб зробити код більш стійким до спалаху помилок. Ще раз [13] виявив, що документи, які доступні в Інтернеті, відрізняються від реалізації мікросхеми. За допомогою зворотної інженерії було виявлено, що для модуляції використовується діагональний перемежувач, при цьому два найбільш значущі біти змінені.
- Відображення сірого, нарешті, використовується для відображення блоку бітів SF в один із символів K у сукупності, переконавшись, що два сусідніх символи відрізняються не більше ніж на 1 біт, щоб збільшити шанси коду каналу виправити можливі помилки.

Час в ефірі пакета можна обчислити за такою формулою [9]:

$$t_{\text{packet}} = t_{\text{preamble}} + t_{\text{payload}} \quad (1.4)$$

де t_{preamble} - це час, необхідний для передачі преамбули, а t_{payload} - час передачі фактичних даних. Ці дві сутності мають такі вирази:

$$t_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4.25) \cdot t_s, \quad (1.5)$$

$$t_{\text{payload}} = n_{\text{payload}} \cdot t_s, \quad (1.6)$$

де n_{preamble} — це параметр, що налаштовується, який впливає на кількість символів у преамбулі (і, отже, на ймовірність того, що одержувач виявить вхідний пакет за ціною більшого часу в ефірі).

Натомість обчислення n_{payload} є більш складним, оскільки воно залежить від багатьох різних параметрів:

- PL – кількість байтів корисного навантаження;
- H може бути або 0, коли заголовок РНУ вимкнено, або 1, коли його ввімкнено. Заголовок РНУ використовується для передачі інформації про довжину пакета, що дозволяє змінювати розміри корисного навантаження. Цю інформацію можна пропустити, щоб заощадити час в ефірі, якщо і передавач, і приймач знають тривалість пакету.

- DE може бути або 0, коли оптимізація низької швидкості передачі даних вимкнена, або 1, якщо увімкнена. Оптимізація низької швидкості передачі даних – це захід, який використовується для запобігання зсуву годинника під час надсилання дуже довгих символів і для досягнення правильної синхронізації часу між передавачем і приймачем.

- CR – кількість доданих бітів парності.

Враховуючи наведені вище параметри, кількість символів корисного навантаження стає:

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max \left(\left\lfloor \frac{8\text{PL} - 4\text{SF} + 44 - 20\text{H}}{4(\text{SF} - 2\text{DE})} \right\rfloor (\text{CR} + 4), 0 \right) \quad (1.7)$$

1.2.3 Ортогональність коефіцієнта поширення

Однією з дуже потужних властивостей модуляції LoRa є те, що різні коефіцієнти розповсюдження є псевдоортогональними, навіть якщо використовуються однакові налаштування центральної частоти та смуги пропускання. Це дозволяє одержувачу правильно виявити пакет, використовуючи коефіцієнт розповсюдження i , навіть якщо він перекривається в часі з іншою передачею з використанням коефіцієнта розповсюдження j , якщо $i \neq j$ і співвідношення сигнал/завад плюс шум (SINR) отриманого пакета. вище певного порогу (також званого ізоляцією), який залежить як від i , так і від j . Ця псевдоортогональність між різними пакетами дозволяє мережі, що використовує пристрої LoRa, використовувати різні коефіцієнти поширення для досягнення більш високої пропускної здатності в порівнянні з більш традиційними схемами модуляції, в яких зіткнення може спричинити неправильний прийом передбачуваного пакету і перешкоди. Хоча точна цифра запасу ізоляції ніколи не вказується в документах, в [15] це було досліджено, і деякі оцінки були зроблені на основі моделі моделювання LoRa.

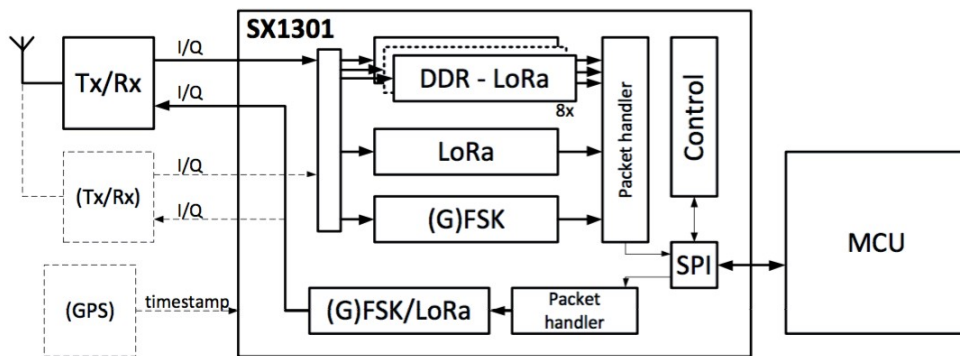


Рисунок 1.3 - Логічна схема для мікросхеми SX1301 [15]

1.2.4 Основні мікросхеми Semtech і незалежні реалізації

Оскільки ця технологія є запатентованою, комерційно доступні мікросхеми, що реалізують ланцюг модуляції LoRa, наразі доступні лише від корпорації Semtech. Існує два основних види радіочіпів LoRa: SX1272 і SX1273 є найпростішими мікросхемами, призначеними для простих пристроїв LoRa, тоді

як SX1301 здатний декодувати кілька пакетів на різних частотах одночасно. Цей чіп призначений для використання в агрегаторах, які можуть приймати передачі з цілої мережі, створеної з простіших пристроїв LoRa. Схему приймача SX1301 можна побачити на рисунку 1.3: мікросхема має 8 вбудованих шляхів прийому з динамічною швидкістю передачі даних (DDR). Ці блоки можуть працювати одночасно, щоб декодувати різні перекриваються передачі, використовуючи будь-який коефіцієнт розширення та центральну частоту [10], використовуючи псевдоортогональність між різними коефіцієнтами розповсюдження, щоб розрізнити пакети, що надходять до антени одночасно, і правильно декодувати кожен з них.

Окрім чіпів офіційного постачальника, нещодавно ожили деякі проекти програмно-визначеного радіо (SDR), присвячені реалізації відкритого рівня LoRa PHY: найпомітніші приклади – [16] та [17]. Обидві реалізації використовують інструментарій розробки програмного забезпечення GNU Radio [18]. Ці відкриті реалізації часто створюються дослідниками та любителями, щоб дослідити модуляцію: ці інструменти можна використовувати для визначення шляхів покращення модуляції та виявлення деяких її дефектів або слабких місць безпеки.

1.3 Стандарт LoRaWAN

Хоча рівень LoRa PHY є власністю, решта протоколу, відома як LoRaWAN, відкрита та описана в [11] LoRa Alliance, групою постачальників і дослідницьких установ, які зацікавлені в поширенні та використанні технології LoRa.

Нижче наведено короткий огляд основних компонентів LoRaWAN та частот, за якими було прийнято рішення, що мережі будуть працювати в різних частинах світу.

1.3.1 Топологія та класи пристроїв

Мережі LoRaWAN розташовані за топологією «зірка-зірка», в якій кінцеві пристрої (ED) відправляють/отримують повідомлення бездротовим способом до/від одного або кількох шлюзів (GW), які, у свою чергу, передають їх на централізований мережевий сервер (NS). через високопродуктивне та надійне посилення.

Ця топологія, як показано на рисунку 1.4, фактично дозволяє одному ED доставляти повідомлення більш ніж одному шлюзу.

Насправді, ED явно не об'єднані в пару з одним шлюзом: повідомлення просто надсилаються пристроями бездротового каналу, припускаючи, що принаймні один шлюз отримає їх і перешле на NS.

Тоді централізована система несе відповідальність за фільтрацію дублікатів і вибір найбільш підходящого шлюзу, через який надсилатимуться повідомлення за низхідним каналом на цей пристрій.

Щоб підвищити стійкість мережі до перешкод, для всієї мережі визначено кілька логічних каналів, і пристрої, яким потрібно передати пакет, повинні вибирати канал псевдовипадковим способом.

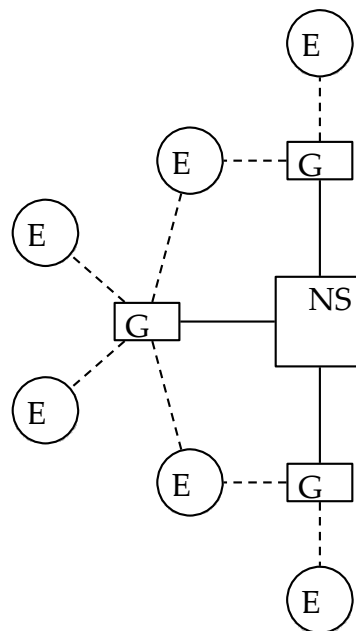


Рисунок 1.4 – Зразок топології мережі LoRa [15]

Стек протоколів ED, GW та NS представлений на рисунку 1.5. Хоча стеки ED і NS мають прикладний рівень, шлюзи мають завдання лише пересилати повідомлення між датчиком (тобто, ED) і NS, і, таким чином, є повністю прозорими для програми кінцевих пристроїв, яка логічно пов'язана безпосередньо з один на NS.

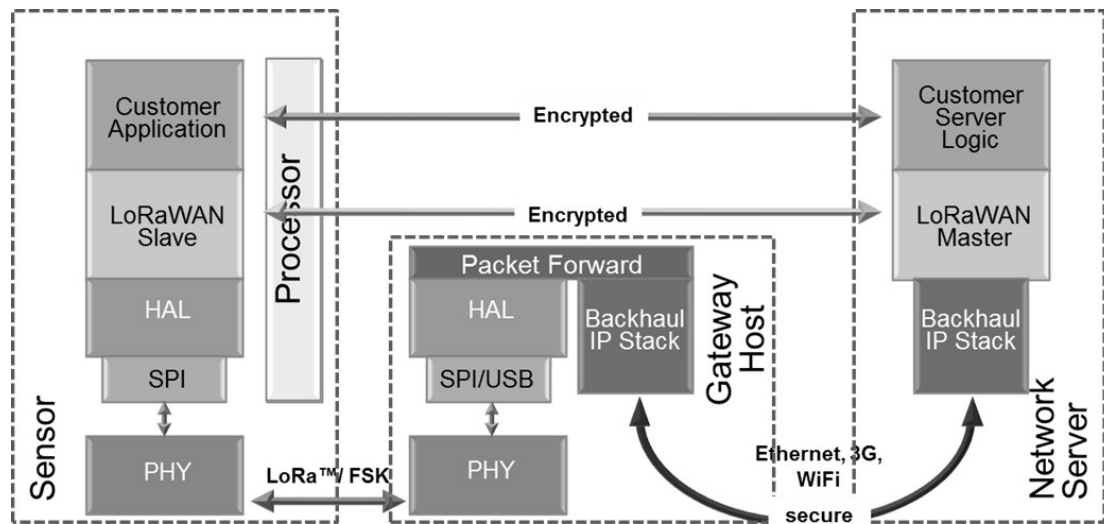


Рисунок 1.5 – Стеки протоколів різних пристроїв у LoRaWAN [15]

Згідно з [11], LoRa ED може вести себе відповідно до однієї з таких моделей:

1. Клас А – це режим роботи за замовчуванням кінцевих пристроїв LoRa. Кожен кінцевий пристрій передає пакети, що надходять з верхніх рівнів бездротового каналу, абсолютно асинхронно, таким чином реалізуючи Aloha Medium Access Control (MAC). Після кожної передачі по висхідній лінії вузол відкриває не більше двох вікон прийому, очікуючи на будь-яку команду або пакет даних, повернений NS. Перше вікно відкривається на тому ж каналі, що й висхідний зв'язок вузла, тоді як друге вікно відкривається в іншому піддіапазоні (раніше узгодженому з NS і може бути змінено за допомогою команд MAC), щоб підвищити стійкість до коливань каналу. Очікується, що цей клас буде реалізований пристроями, бюджет енергії яких обмежений, і тому радіоприймач повинен бути вимкненим якомога довше.

2. Кінцеві пристрої класу В синхронізуються з NS за допомогою пакетів-маяків, які транслуються шлюзами класу В. Завдяки механізму маяка, можуть отримувати дані низхідного каналу або пакети команд у певні часові проміжки, незалежно від трафіку висхідного каналу. Клас В призначений для кінцевих пристроїв, яким потрібно отримувати команди від пульта дистанційного керування, наприклад, перемикачів або приводів.

3. Нарешті, клас С визначено для кінцевих пристроїв без строгих енергетичних обмежень (наприклад, пристроїв, підключених до електромережі), які, отже, можуть утримувати трансивер постійно увімкненим, чекаючи повідомлень низхідної лінії зв'язку. Очікується, що цей клас буде корисним для пристроїв, що працюють із приводом, і мають суворіші вимоги до затримки.

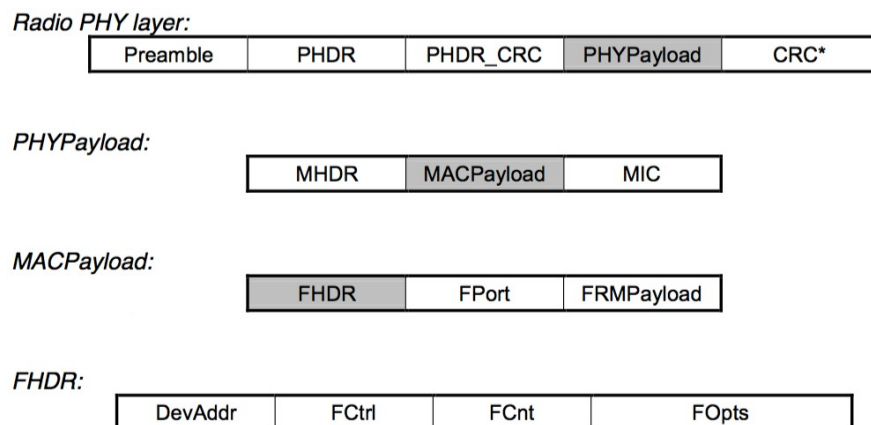


Рисунок 1.6 – Структура пакетів повідомлення LoRaWAN [11]

1.3.2 Структура пакетів і команди MAC

На додаток до топології мережі, [11] також описує протокол зв'язку. Це включає формат пакетів рівнів PHY і MAC, набір параметрів мережі, наприклад частоти SF і каналів, які використовуються кінцевим пристроєм, а також команди MAC, які необхідно використовувати для налаштування вищезгаданих параметрів. Структуру пакету повідомлення LoRaWAN можна побачити на рисунку 1.6: на рівні PHY пакет складається з преамбули, як показано на рисунку 1.1, заголовка, корисного навантаження та двох кодів CRC для захисту заголовка

та корисного навантаження. У середині корисного навантаження РНУ заголовок MAC містить інформацію про версію стандарту, який використовує пристрій, і про тип повідомлення:

1. Пакети приєднання – це перший пакет, який надсилається пристроєм, який намагається увійти в мережу.

2. Повідомлення даних можуть бути як висхідним, так і низхідним. Крім того, вказується, чи вимагає повідомлення підтвердження чи ні.

3. Власні повідомлення можна використовувати для реалізації нестандартних форматів повідомлень, які можна використовувати між пристроями, які мають спільне розуміння деяких власних розширень.

Натомість корисне навантаження MAC містить корисне навантаження Frame, порт Frame і заголовок Frame. Корисне навантаження Frame зазвичай містить дані, що надходять з рівня програми, а поле порту Frame використовується для визначення, для якої програми призначене повідомлення. Деякі номери портів зарезервовані для стандартизованих розширень програм, які будуть створені в майбутньому. Натомість заголовок Frame містить різні поля, які пов'язані з різними аспектами мережі LoRa. Перш за все, 4-байта коротка адреса пристрою використовується для ідентифікації пристрою в мережі. Один байт, який називається полем керування кадром, призначений для розміщення бітів підтвердження (ACK) і кадру. На додаток до них, ще 2 біти використовуються для реалізації функції адаптивної швидкості передачі даних (ADR): NS має можливість попросити ED змінити коефіцієнт розширення, який він використовує для передачі. Алгоритм ADR може вибрати збільшення коефіцієнта розповсюдження пристрою, чий запас SN є занадто низьким, або зменшити його, якщо передачі пристрою постійно надходять набагато вище чутливості. Іншими словами, механізм повинен забезпечувати надійність зв'язку пристрою (як правило, використовуючи високі значення SF), мінімізуючи час в ефірі пакетів пристрою (за допомогою нижчих SF), щоб уникнути зіткнень. Слід зазначити, що алгоритм ADR не стандартизований: це означає, що можливі варіанти реалізації, які мають різну вагову ефективність і складність, і доступні

для порівняння. Якщо біт ADR встановлено, пристрій знає, що його швидкість передачі даних контролюється NS, і що він знайде подальші інструкції серед команд MAC, що містяться в полі FOpts.

Різні команди MAC, якими можна обмінюватися між ED і NS, надають такі функції:

1. Перевірка зв'язку: пристрій може запитати свій запас зв'язку до NS, яка відповідає потужністю, отриманою на шлюзі.
2. Запити та відповіді ADR.
3. Робочий цикл: NS може встановлювати обмеження на загальний час передачі пристрою.
4. Налаштування параметрів вікон прийому.
5. Стан пристрою: NS може запитати у пристрою рівень заряду батареї та запас демодуляції.
6. Створення нових радіоканалів.

Крім перерахованих вище функцій, ще 128 ідентифікаторів команд зарезервовано для власних розширень мережевих команд.

1.3.3 Шифрування та активація пристрою

Відповідно до [11], якщо кадр даних несе корисне навантаження, корисне навантаження кадру має бути зашифровано. Схема шифрування, що використовується LoRaWAN, заснована на алгоритмі, який також використовується стандартом IEEE 802.15.4 [19], з використанням шифру AES і коду цілісності повідомлення (MIC), щоб запобігти зловмисникам маніпуляцій із зашифрованим повідомленням без помічає приймач.

Ключ, який використовується в процедурі AES, може бути або мережевим, або спеціальним ключем програми, залежно від порту кадру, на який посилається повідомлення.

Обидва ці ключі спочатку отримує ED під час його активації, процедури, завдяки якій пристрій вперше отримує доступ до мережі, також отримуючи 32-бітну адресу, яка однозначно ідентифікує його всередині мережі, та ідентифікатор програми. Стандарт LoRaWAN передбачає два способи, за допомогою яких пристрій може виконувати активацію в LoRaWAN: Over-The-Air Activation (OTAA) дозволяє активувати пристрій шляхом обміну серією повідомлень з NS, щоб отримати ключ мережі. по повітряю безпечним способом, тоді як активація шляхом персоналізації (ABP) передбачає, що пристрій має попередньо налаштовану адресу та ключі мережі та програми, таким чином, він може отримати прямий доступ до попередньо визначеної мережі без обміну даними з NS у приєднанні процедури.

1.3.4 Діапазони частот

У [11] визначено три регіони, в яких очікується, що LoRaWAN працюватимуть на фіксованих частотах, на основі місцевих правил у Європі, Китаї та Сполучених Штатах. Для кожного з цих регіонів стандарт передбачає налаштовані параметри, які визначають преамбулу, частоти каналів, дозволені коефіцієнти поширення, максимальний розмір корисного навантаження, вікна прийому та процедури приєднання, щоб переконатися, що LoRaWAN завжди відповідає місцевому законодавству.

Можна зазначити, що всі вибрані діапазони частот знаходяться в діапазоні 780–930 МГц: насправді, для LPWAN, яким потрібно зосередитися на досягненні якомога широкого діапазону, цей набір частот є кращим, ніж діапазони ISM 2,4 ГГц і 5 ГГц, які використовуються за стандартами IEEE 802.11, оскільки загасання нижче.

1.4 Висновки

У даному розділі було проведено аналіз та дослідження технологій Інтернету речей, зокрема, LPWAN, LoRa, виокремлено вимоги до IoT. В розділі

було досліджено найпопулярніші рішення щодо проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей, їх продуктивність та здатності до масштабування, було виявлено переваги та недолік.

В розділі також було зроблено огляд технологій IoT, зокрема, рішень для підключення до Інтернету речей: низькошвидкісні бездротові персональні мережі, стільниковий Інтернет речей, глобальні мережі малої потужності.

В розділі було розглянуто основні аспекти функціонування IoT, а саме: модуляція LoRa, реалізація LoRa, пакети фізичного рівня LoRa, основні мікросхеми Semtech і незалежні реалізації. Також в розділі було досліджено принцип роботи стандарту LoRaWAN, зокрема: топологія та класи пристроїв, структура пакетів і команди MAC, шифрування та активація пристрою та діапазони частот.

Було зроблено висновок, що задача проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом є на сьогодні надзвичайно актуальною, та про необхідність розроблення удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

2 МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МЕРЕЖІ LORAWAN

Для вирішення поставленої задачі оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом необхідним є розроблення моделі мережі LoRa обчислювально життєздатним, необхідно зробити ряд припущень і спрощень. Що стосується інших інструментів моделювання на системному рівні, таких як симулятор Vienna Long Term Evolution (LTE) [20-23], моделювання на системному рівні, виконане під час роботи, базується на двох компонентах, які спрямовані на спрощене представлення фактичного ланцюга передачі.

Модель вимірювання лінії зв'язку використовується для абстрагування впливу поширення на силу сигналу, а також для усереднення дрібномасштабних загасань та подібних ефектів.

Модель продуктивності лінії зв'язку визначає ймовірність правильного отримання пакета зі зниженою складністю, використовуючи лише інформацію про потужність каналу, перешкоди та інші ефекти на системному рівні.

Наступний розділ цієї глави присвячений дослідженню того, як мережі LoRa були досліджені та змодельовані в науковій літературі. Після цього вступу до поточного стану техніки, решта розділу буде зосереджена на кожній із двох згаданих вище моделей, пояснюючи їх різні компоненти.

2.1 Аналіз компонентів мережі LoRa

Одним з дуже вразливих понять функціонування мережі LoRa є система модуляції. Для оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом важливо врахувати вплив перешкод розміщення кінцевих вузлів LoRa проводяться в певному середовищі, щоб оцінити ефективність декодування приймачів LoRa.

Також необхідно враховувати чутливість та дальність дії пристроїв LoRa: зі шлюзом, коефіцієнт поширення, які значно впливає на дальність передачі даних.

Наступним фактором ефективності взаємодії компонентів мережі LoRa є необхідність врахування факторів, які можуть викликати втрату пакетів у мережі, зокрема ефект захоплення в передачах LoRa: тільки одна з двох одночасних передач з однаковою SF може бути демодульована, якщо один пакет надходить до приймача з навіть трохи більшою потужністю, ніж інший.

На рисунку 2.1 показано ймовірність виникнення певної події для різних зміщень при передачі «сильного» сигналу відносно «слабкого».

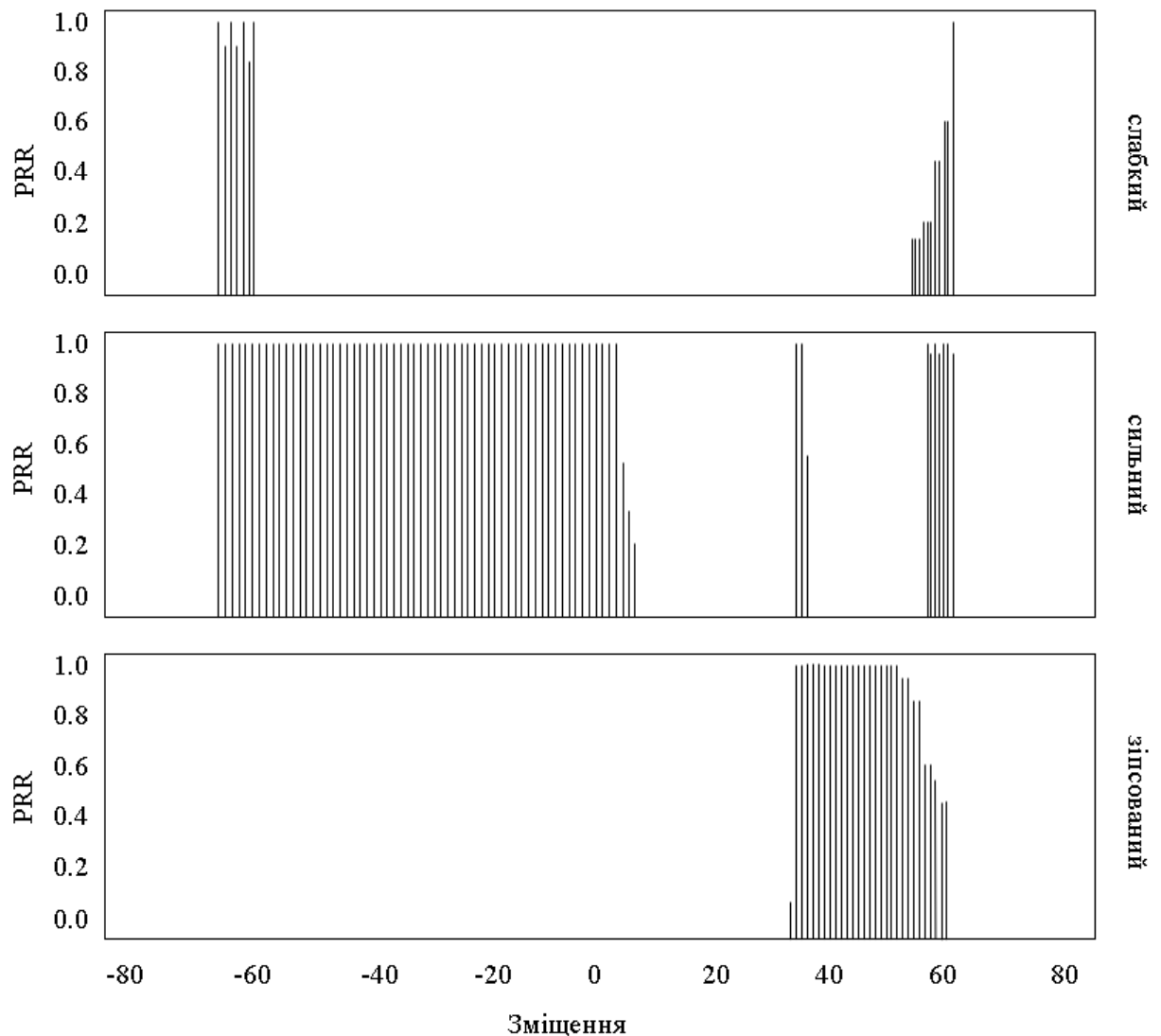


Рисунок 2.1 – Ефект захоплення на пристроях LoRa

Три графіки відносяться відповідно до таких подій: ймовірність правильного прийому слабкого сигналу; ймовірність правильного прийому сильного сигналу; ймовірність втрати обох пакетів.

Можна помітити, що для дуже негативних зміщень, коли остання частина сильного пакета лише незначно перекривається з початком слабкого пакета, обидва пакети приймаються правильно з високою ймовірністю.

Оскільки зсув зростає до 0 (що представляє повне перекриття двох пакетів), правильний прийом сильнішого пакета є впевненим, тоді як слабкий пакет затінюється, і його прийом постійно дає збій.

Це триває до тих пір, коли два пакети повністю перекриваються, і навіть коли три символи слабкого пакета надсилаються перед першим символом сильного пакета.

У цей момент приймач більше не може правильно декодувати сильніший пакет, і будь-який пакет постійно втрачається через перешкоди, створені іншим сигналом.

Цей ефект триває до тих пір, коли зміщення настільки велике, що пакети, знову ж таки, перекриваються лише для кількох символів. У цей момент знову можливий правильний прийом обох сигналів.

Наступним аспектом є необхідність оцінки механізму виявлення активності несучих (CAD), яка реалізована в пристроях LoRa.

Саме ця оцінка каналу вимагає, щоб радіо було включено протягом:

$$t_{on} = \frac{32}{A} + \frac{2^{SF}}{A} \quad (2.1)$$

Тоді для обробки отриманих даних потрібен додатковий час:

$$t_{proc} = \frac{SF \cdot 2^{SF}}{1750 \cdot 10^3} \quad (2.2)$$

Це означає, що CAD можна виконувати приблизно за 2 періоди символів, і для цього потрібно, щоб радіо було увімкнено приблизно на 1 період символу.

2.1.2 Моделювання ефекту захоплення

Для оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом важливо врахувати вплив ефекту захоплення.

Тому необхідно включити в модель припущення про повну ортогональність між різними коефіцієнтами розповсюдження.

Основна метрика, що використовується в моделюванні для оцінки якості системи, називається DER і обчислюється як відношення отриманих повідомлень до переданих за певний період часу.

Відомо, що для різних налаштувань у SF, які використовуються вузлами в мережі. SN3 відноситься до налаштування, де всі вузли використовують однаковий коефіцієнт поширення, тоді як SN4 і SN5 призначають SF кожному вузлу на основі їх положення, намагаючись спочатку мінімізувати ефірний час, а потім, у випадку SN5, встановлюючи мінімальну потужність передачі, яка б все ще дозволяють вузлу успішно дістатися до шлюзу, щоб зменшити кількість перешкод. Якщо вимога щодо швидкості успішного прийому пакету встановлена на рівні $DER > 90\%$, то кількість вузлів мережі може досягати більше 1000.

Також відомо, що LoRaWAN досягає пропускної здатності, рівної пропускній здатності мереж ALOHA, оскільки протокол по суті той самий, проте це моделювання має деякі ключові відмінності щодо підходу.

2.1.3 Протокол з кількома стрибками для пристроїв LoRa

Інший важливий аспект функціонування пристроїв LoRa однією мережею, є формування мережевого протоколу з кількома стрибками для, який називається LoRaBlink.

Передбачається, що протокол використовується в мережі з низькою щільністю, з низьким об'ємом трафіку та обмеженою кількістю вузлів, і використовує синхронізацію, подібну до маяка між пристроями, щоб дозволити вузлам якомога частіше переходити в режим сну, при цьому пересилаючи

пакети. і досягнення допустимої затримки в режимі прорізного доступу. Протокол також був протестований у реальному розгортанні, що містить шість вузлів і один приймач.

Мережа має змогу доставити пакети з показником успішності роботи на рівні 80%.

Протокол корисним у розріджених мережах, де шлюзи важко встановити: покладаючись на пристрої пересилання повідомлень, мережа LoRa може охопити область, яка значно більша, ніж це зараз можливо з LR-WPAN, які експлуатують multi-hop, завдяки збільшеному діапазону повідомлень LoRa.

2.2 Модель оцінювання якості зв'язку

Враховуючи пару передавач-приймач, модель вимірювання лінії зв'язку спрямована на оцінку сили сигналу на стороні приймача.

Ця модель повинна враховувати різні фактори, такі як потужність передачі, затінення, швидке загасання та посилення антени як на приймачі, так і на передавачі.

Позначимо коефіцієнт посилення антени передавача та приймача через G_{tx} та G_{rc} відповідно, а потужність передачі – через P_{tx} . Тоді отриману потужність можна виразити так:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rc}}{L} e^{\xi}, \quad (2.3)$$

де L – втрата на шляху, а e^{ξ} – коефіцієнт, що моделює ефект повільного згасання, який також називають затіненням, за допомогою логнормальної випадкової величини з $\xi \sim N(0, \sigma^2)$.

Припускаємо, що швидке завмирання розподіленого Релея компонента вже усереднено в моделі продуктивності каналу.

У логарифмічній області рівняння (3.3) стає

$$\begin{aligned}
 P_{rx}^{dB} &= P_{tx}^{dB} + G_{tx}^{dB} + G_{rc}^{dB} - L^{dB} + 10\xi \log_{10} e \\
 &= P_{tx}^{dB} + G_{tx}^{dB} + G_{rc}^{dB} - L^{dB} + 4.34\xi \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

Втрати на шляху L^{dB} складаються з суми двох внесків: втрати поширення, які залежать від відстані між передавачем і приймачем, і втрати на проникнення через будівлю через ослаблення стіни:

$$L^{dB} = L_{propagation}^{dB} + L_{buildings}^{dB} \quad (2.5)$$

2.2.1 Модель втрат при поширенні

Втрати при поширенні (також звані втратами на зовнішній трасі) можна обчислити як:

$$\begin{aligned}
 &L_{propagation}^{dB} \\
 &= 40(1 - 4 * 10^{-3} * h) \log_{10} R|_{km} - 18 \log_{10} h|m \\
 &+ 21 \log_{10} f|_{MHz} + 80, \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

де $h \in [0, 50]$ м – висота шлюзової антени, виміряна від середнього рівня даху. Хочемо зауважити, що висота антени має суттєвий вплив на продуктивність системи [24]. Припускаючи $f = 868$ МГц і $h = 15$ м, впливає, що:

$$L_{propagation}^{dB} = 120.5 + 37.6 \log_{10}(R|_{km}) = I^{dB} + 37.6 \log_{10}(R|_{km}) \quad (2.7)$$

Це дає:

$$\begin{aligned}
 L_{path}^{dB} &= I^{dB} + 37.6 \log_{10} R|_{km} \\
 &= 10 \cdot 12.05 + 10 \cdot 3.76 \log_{10} R|_{km} \\
 &= 10 \log_{10} (1.12 \cdot 10^{12}) + 10 \log_{10} R|_{km}^{3.76}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 10 \log_{10} I + 10 \log_{10} R |_{\text{км}}^{3.76} \\
 &= 10 \log_{10} IR |_{\text{км}}^{3.76}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

де R вимірюється в км.

2.2.2 Втрати при проникненні в будівлю

Для моделювання втрат, які завдають зовнішні та внутрішні стіни будівель, застосуємо модель, що включатиме такі компоненти.

Загальне проникнення в будівлю дБ є сумою наступних трьох внесків:

1. Втрати, викликані зовнішніми стінами будівель, які називаються EWL.
2. Втрати від внутрішніх стін будівель.
3. Отримати отриману потужність завдяки тому, що пристрій знаходиться над першим поверхом.

EWL для пристрою моделюється як однорідна випадкова величина, яка приймає значення в певному діапазоні: $EWL \sim U(r)$.

Три можливі діапазони та ймовірність того, що вузол зазнає такого роду втрати, наведені в таблиці 2.1.

Той факт, що два пристрої не обов'язково відчуватимуть однакові втрати на проникнення зовнішньої стіни, призначений для моделювання різноманітності матеріалів і товщини зовнішніх стін у широкому спектрі різних будівель.

Таблиця 2.1 – Можливі розподіли вимірюваної випадкової величини EWL

Діапазон	Рівень r
0.25	[4, 11] dB
0.65	[11, 19] dB
0.1	[19, 23] dB

Внесок внутрішніх стін виражається як максимальне значення між двома значеннями. Перший являє собою втрати через кількість внутрішніх стін:

$$\text{Tor1} = W_i \cdot p, \quad (2.9)$$

де W_i рівномірно розподілена в діапазоні [4, 10] дБ, а p являє собою кількість внутрішніх стінок, що відокремлюють передавач від досліджуваного приймача.

Вважається, що для 15% пристроїв $p = 3$, а решта пристроїв рівномірно розподілені між значеннями $p = \{0, 1, 2\}$.

Друге значення, яке необхідне для моделювання внутрішніх втрат стіни:

$$\text{Tor3} = \alpha d, \quad (2.10)$$

де $\alpha = 0,6$ дБ/м – коефіцієнт відстані проникнення, а d рівномірно розподілений в діапазоні [0, 15] м.

Нарешті, внесок GFH пояснює кращий прийом, який дає збільшення висоти:

$$\text{GFH} = nG_n, \quad (2.11)$$

де $G_n = 1,5$ дБ/фл або є посиленням за рахунок збільшення висоти, викликаного одним поверхом, а n , що представляє кількість поверхів, рівномірно розподілено між значеннями $n = \{0, 1, 2, 3, 4\}$.

Поєднуючи ці три внески, загальна сума збитків від будівель для внутрішнього кінцевого пристрою становить:

$$L_{buildings}^{dB} = \text{EWL} + \max(\text{Tor1}, \text{Tor3}) - \text{GFH}. \quad (2.12)$$

2.2.3 Моделювання корельованого затінювання

Іншим компонентом роботи мережі бездротових мережах LoRa є затінювання.

Видно, що затінювання тіньова суттєво впливає на різні явища системного рівня, такі як поведінка передачі обслуговування, потужність перешкод і продуктивність схем макрорізноманіття.

Через це під час моделювання на системному рівні необхідно розглянути відповідну модель для кореляції затінювання.

Зазвичай розглядають два види кореляції:

1. Якщо передавач надсилає повідомлення одержувачу, очікуємо, що кількість затінення, яке відчуває одержувач, буде співвіднесена з затіненням, що впливає на будь-який інший пристрій, який є «близьким» до нього.

Ця кореляція є функцією відстані, що розділяє два пристрої, і зазвичай моделюється за допомогою експоненціальної функції.

Цей випадок проілюстрований вузлами a, b і c на рисунку 2.3: оскільки b і c знаходяться близько в просторі, їхня пряма видимість, ймовірно, буде заблокована тими ж видами перешкод, і, отже, затінення в цих двох положеннях буде корелювати .

2. Якщо два пристрої, які розташовані близько один до одного, передають сигнал, очікуємо, що приймач отримає сигнали, на які впливають два корельованих значення затінювання.

Цей ефект описується як взаємна кореляція, де вузли d, e і f на рисунку 2.3: оскільки два близькі вузли спілкуються з однією точкою, очікуємо, що якщо d буде заблоковано великим об'єктом з точки зору e, він також буде заблокований з точки зору f.

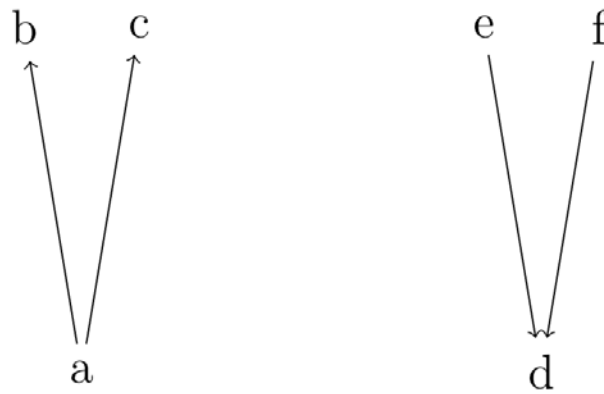


Рисунок 2.3 – Ілюстрація двох видів кореляцій затінювання

Найпоширенішою кореляційною моделлю є спадна експонента відстані, [25].

Позначаючи відстань між кінцевими вузлами i та j за допомогою $d_{i,j}$, кореляція затінення дорівнює:

$$\rho_{i,j}(d_{i,j}) = e^{-d_{i,j}/d_0}, \quad (2.13)$$

де $d_0 > 0$ є настроюваним параметром, який називається відстанню декореляції: він представляє відстань, на якій кореляція між двома випадковими значеннями тіні знаходиться нижче порогу e^{-1} , а значення вважаються досить некорельованими.

Що стосується реалізації корельованих компонентів, то найпоширеніший спосіб у літературі включає створення карт затінення або 2D-функцій, які описують затінення в кожній точці карти для даної позиції передавача.

Один із звичайних способів створення таких карт використовує факторізацію Холеського [33], яка, однак, є дорогою з точки зору обчислень, особливо коли кількість необхідних точок значно зростає, як це відбувається в моделях.

Щоб зменшити обчислювальні зусилля, необхідні для створення карт відповідно до методів декомпозиції Холеського, [25] пропонує альтернативний метод поступового побудови карти шляхом співвіднесення нових зразків із близькими, які вже були згенеровані.

Інший підхід, використаний у [26], включає фільтрацію карти незалежних гауссових випадкових величин для отримання просторово корельованого процесу.

Однак, щоб змоделювати міський сценарій з десятками тисяч вузлів, як це передбачено для мережі LoRa, ця теза вдається до евристичного підходу, підтвердженого [27].

Припускаючи відстань декореляції затінення $d_0 = 110$ м [28], генеруємо регулярну сітку, в якій кожен квадрат має довжину сторони d_0 , і малюємо незалежну гауссову випадкову величину в кожній вершині сітки.

Щоб обчислити значення затінення вузлів, які не точно розміщені у вершині сітки, потрібно інтерполювати значення сітки.

Можна зробити це, дотримуючись кореляції між точками даних у сітці, якщо використовуємо відповідні коефіцієнти інтерполяції, як пояснюється в [29].

Визначимо множину S позицій у просторі та відповідну підмножину $s_i \in S$, $i \in \{1, \dots, N\}$.

Припустимо, що дано набір спостережень X_i випадкової величини $X \sim N(0, \sigma^2)$, по одному відповідно до кожної позиції s_i .

Підраховуючи значення, X_i є випадково згенерованими значеннями тіні в кожній точці сітки.

Визначимо функцію коваріації між двома точками s і s' :

$$k(s, s') = \rho(d_{s,s'}) = e^{-d_{s,s'}/d_0} \quad (2.14)$$

Враховуючи наведену вище функцію, тепер можемо обчислити коваріаційну матрицю:

$$K = \begin{pmatrix} k(s_1, s_1) & \cdots & k(s_1, s_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(s_N, s_1) & \cdots & k(s_N, s_N) \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

де $k(s_i, s_j)$ — коваріація між точками даних в i -й та j -й позиціях. Зауважте, що тепер можемо обчислити цю функцію між будь-якою парою точок, незалежно від того, чи є дані для цієї позиції чи ні, оскільки функція коваріації залежить лише від їх зворотної відстані.

Тепер можна визначити набір вагових функцій ϕ_1, \dots, ϕ_N таким, що задовольняються наступні дві властивості:

$$\phi_i(s_j) = \delta_{ij} \quad \forall i, j = 1, \dots, N \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=1}^n \phi_i(s) = 1 \quad \forall s \in S \quad (2.17)$$

Щоб знайти відповідні вагові функції для інтерполяції значень X_i , щоб отримати значення для кожної точки в S , яка відповідає автокореляційній функції k , можемо використовувати таку формулу:

$$\phi_i(s) = \sum_{j=1}^n K_{ij}^{-1} \cdot k(s_j, s) \quad (2.18)$$

Необхідно зауважити, що матриця K^{-1} у рівнянні вище не змінюється з s , тому її можна обчислити один раз і використовувати для обчислення кожного коефіцієнта ϕ .

Інтерпольовані значення, нарешті, можна отримати як:

$$X(s) = \sum_{i=1}^N X_i \cdot \phi_i(s) \quad (2.19)$$

Процедура, описана вище, правильно відображає перший з двох аспектів кореляції тіней: за допомогою передавача тінь, яку відчувають два близькі один до одного приймачі, буде корельованою.

Для того, щоб також виразити той факт, що приймач «бачить» корельовані значення тіні при передачі пристроями, які розташовані близько один до одного, в моделі використовуємо ту саму карту тіні для кожної точки, що належить до одного квадрата в сітка.

Таким чином, якщо два досить близькі вузли передають до однієї базової станції, кількість затінювання, яке відчуває шлюз, буде однаковою для обох сигналів.

2.3 Модель продуктивності зв'язку

Враховуючи потужність прийому передачі в системі, яка обчислюється завдяки моделі вимірювання зв'язку, а також знання про те, де і коли виникли зазначені передачі, модель продуктивності каналу має на меті абстрагувати реальну реалізацію ланцюга прийому фізичного рівня та створити Інтерференційні обчислення більш керовані.

Точніше, модель абстрагує продуктивність, наприклад, чіпа Semtech SX1301, який використовується в шлюзах, і, наприклад, чіпа Semtech SX1272, який зазвичай використовується в кінцевих пристроях, емулюючи їх характеристики паралельного декодування, чутливості та стійкості до перешкод.

2.3.1 Чутливість приймача

Позначимо через $S_g(i)$ і $S_e(i)$ відповідно чутливості в дБ приймача шлюзу та кінцевого пристрою для $SF = i$.

Ці показники чутливості підсумовані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Чутливість шлюзів і кінцевих пристроїв до різних факторів поширення

SF	$S_g(i)$	$S_e(i)$
7	-130	-127

8	-132.5	-129.5
9	-135	-132
10	-137.5	-134.5
11	-140	-137
12	-142.5	-139

Для кожного значення в таблиці 2.2 також враховується коефіцієнт посилення антени приймача G_{rc} , покращуючи прийом, покращуючи значення чутливості для $G_{rc} > 0$.

Можна побачити, що збільшення SF дає кращу чутливість із регулярним кроки 2,5 дБ.

У випадку передачі по низхідній лінії зв'язку (DL), оскільки чутливість кінцевого пристрою вважається гіршою, ніж чутливість шлюзу, вводимо зміщення 3 дБ.

Значення чутливості використовуються для того, щоб визначити, чи виявляється пакет пристроєм чи ні: наприклад, будь-який сигнал з $SF = i$, потужність якого в місці приймача нижче порогового значення $S_g(i)$, не може бути виявлений шлюзом; якщо замість цього отримана потужність перевищує необхідну чутливість, її можна виявити.

Тому припускаємо, що одержувач зафіксує вхідний сигнал і почне отримувати пакет.

Подальше припущення стосується отриманої потужності пакета, яка обчислюється завдяки рівнянню (2.4) і вважати постійним протягом усього часу прийому.

Це означає, що коли пакет отримано з достатньо високою потужністю, щоб почати детектування, він буде виявлятися (тобто вище чутливості) протягом решти часу, необхідного для повного отримання.

Нарешті, також передбачається, що якщо два або більше сигналів, індивідуальні потужності яких нижчі за чутливість, одночасно надходять на

антену приймача, вони не можуть бути виявлені приймачем, навіть якщо сума їх потужності дає значення, яке перевищує чутливість.

Це припущення виправдовується тим, що, навіть якщо приймач почав прийом одного з пакетів, оскільки відчув, що канал зайнятий, сигнал буде знищено через перешкоди від інших сигналів, які сприяли підвищенню потужності прийому вище чутливості. поріг.

2.3.2 Перешкоди

Оскільки необхідним є моделювання поведінки автономної мережі LoRaWAN, припустимо, що перешкоди можуть виникати лише від інших передач LoRa.

Роблячи це припущення, використовуватимемо властивість часткової ортогональності різних SF для моделювання, чи витримує пакет перешкод від інших передач LoRa чи ні.

Введемо наступну (відносну) порогову матрицю SINR [30]:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 6 & -16 & -18 & -19 & -19 & -20 \\ -24 & 6 & -20 & -22 & -22 & -22 \\ -27 & -27 & 6 & -23 & -25 & -25 \\ -30 & -30 & -30 & 6 & -26 & -28 \\ -33 & -33 & -33 & -33 & 6 & -29 \\ -36 & -36 & -36 & -36 & -36 & 6 \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Елемент $T_{i,j}$ у наведеній вище матриці є запасом SINR (в одиницях дБ), який повинен мати пакет, надісланий із $SF = i$, щоб його правильно декодувати, якщо пакет, що перешкоджає, має $SF = j$.

Зауважимо, що за наявності декількох пакетів, що заважають, необхідно задовольнити граничні умови для всіх пакетів, що заважають, підсумовуючи отримані значення потужності для кожного SF.

Тому, посилаючись на випадок Single Input Single Output (SISO) [31], нагадаємо загальне визначення SINR:

$$\text{SINR} = \frac{P_{rc,0}}{\sigma_{\omega}^2 + \sum_{l=1}^{N_{int}} P_{rc,l}} \quad (2.21)$$

де $P_{rc,0}$ — потужність розглянутого пакета, N_{int} — кількість пакетів, що заважають, а $P_{rc,l}$ — потужність l -го пакета, що перешкоджає. Зосереджуючись на кінцевому пристрої з використанням $SF = i$ та набору \mathfrak{X}_j перешкод за допомогою $SF = j$, визначаємо

$$\text{SINR}_{i,j} = \frac{P_{rc,0}}{\sigma_{\omega}^2 + \sum_{l \in \mathfrak{X}_j} P_{rc,l}} \quad (2.22)$$

Отже, пакет із $SF = i$ є правильно декодованим, якщо для кожного j (тобто для кожної множини \mathfrak{X}_j інтерферуючих пакетів з однаковою SF) виконується наступна нерівність:

$$\text{SINR}_{i,j}^{dB} > T_{i,j} \quad (2.23)$$

Необхідно зробити ще одне зауваження.

Елементи в матриці T обчислюються за умови, що два пакети ідеально перекриваються. Однак у загальному випадку пакети не є ідеальною синхронізацією.

Через це вирівнюємо значення потужності перешкод для обчислення SINR . Розглянемо ситуацію, проілюстровану на рисунку 2.4, в якій пакет із $SF = x$ приймається в момент часу $t = 0$ і передача якого триває T_x .

Пакет із $SF = y$ приймається в момент часу $t = t_1$ і його передача триває T_y . Енергія пакета x дорівнює $E_x = P_{rc,x} T_x$, а енергія перешкоди $E_y^{\text{interf}} = P_{rc,y} (T_x - t_1)$.

Отже, вирівняна потужність перешкод становить:

$$p_{rc,y}^{interf} = \frac{E_{rc,y}^{interf}}{T_x} = \frac{P_{rc,y}(T_x - t_1)}{T_x} = P_{rc,y} \left(1 - \frac{t_1}{T_x}\right) \quad (2.24)$$

Подібно до прикладу вище, припускаємо, що загалом енергія перешкоди для будь-якої взаємної позиції сигналу та перешкоди може бути «розподілена» на сигнал, щоб потім обчислити SINR за допомогою рівняння (2.22).

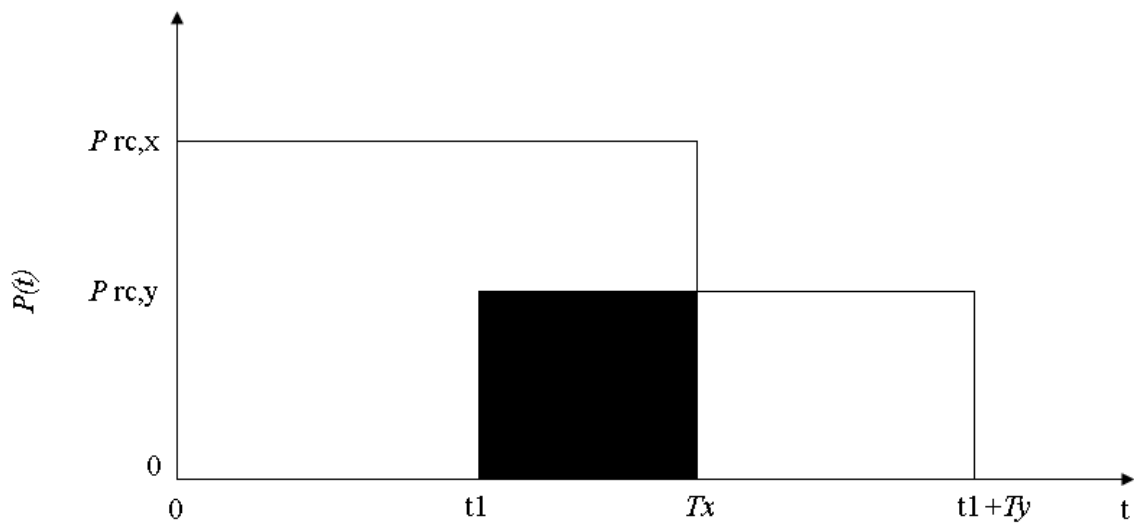


Рисунок 2.4 – Вирівнювання потужності пакетів, що стикаються. Виділена енергія розподіляється на тривалість пакету

Позначаючи з t_{ol} період часу, протягом якого перешкода перекривається корисним сигналом, загальна формула виглядає так:

$$p_{rc,y}^{interf} = \frac{P_{rc,y} * t_{ol}}{T_x} \quad (2.25)$$

Це припущення виправдовується тим фактом, що базовий код каналу, який використовується для модуляції використовує перемежувач: навіть якщо перешкода зосереджена на кількох послідовних символах, припускаємо, що хороший перемежувач буде поширюватися і дозволити коду каналу в кінцевому підсумку виправити помилки, спричинені перешкодою.

Крім того, завдяки техніці канального кодування, що використовується стандартом модуляції LoRa, припускаємо, що завжди будемо правильно отримувати пакет, який перевищує чутливість і витримає перешкоди, через те, що криві бітової помилки відносно SINR дуже зменшуються. різко, оскільки SINR зростає вище порогових значень, зазначених у матриці T формулі (2.20).

Формула (2.20) дозволяє зробити деякі цікаві спостереження щодо поведінки інтерференції між пакетами LoRa.

Перш за все, помічаємо, що один із двох сигналів, які використовують однакові коефіцієнти розширення та мають однакову потужність прийому, можна правильно декодувати, якщо вони перекриваються в часі протягом досить малого часу, щоб SINR кожного з них відносно інше після вирівнювання відповідно до рівняння. 3,25 вище 6 дБ.

Це моделює той самий ефект як показано на рисунку 2.1 для дуже високих і низьких зміщень (2.20) також стверджує, що деякі фактори розповсюдження є більш стійкими до перешкод, ніж інші: передача, що використовує SF 7, може пережити перешкоди за рахунок сигналу з SF 12, який на 20 дБ сильніший, однак пакети з SF 12 набагато стійкіші, оскільки вони все ще можуть бути правильно декодовані, якщо перешкода SF 7 до 36 дБ сильніша.

Загальна тенденція, яку можна спостерігати, полягає в тому, що збільшення коефіцієнта розповсюдження приносить додатковий опір перешкодам на 3 дБ.

Ця асиметрія залишає місце для міркувань щодо найкращого розподілу SF в мережі LoRaWAN, балансування діапазону, досліджуваних перешкод і пропускної здатності.

2.3.3 Модель шлюзу

Припускаємо, що один шлюз LoRa здатний емулювати 8 приймачів, що працюють паралельно.

Вказані 8 шляхів прийому, як показано на рисунку 2.3, підключені до однієї антени, і передбачається, що вони мають такі характеристики:

1. Центральна частота кожного тракту прийому повинна бути індивідуально налаштована. Кожен тракт прийому може бути центрований на іншій частоті, а кілька трактів прийому можуть бути центровані на одній частоті.

2. Будь-який SF можна отримати без попередньої конфігурації на будь-якому шляху прийому.

3. Якщо один і той самий канал прослуховують більше ніж один шлях прийому, припускаємо, що вони можуть паралельно управляти такою кількістю пакетів, якою кількість прослуханих шляхів прийому.

Пакети можуть навіть мати однаковий SF. Іншими словами, якщо є кілька шляхів прийому на одній і тій самій частоті і приходить пакет, лише один шлях прийому «блокує» вхідний сигнал, залишаючи іншим вільним відчутти більше вхідних пакетів і, можливо, дозволити правильне виявлення кількох вхідних пакетів. перекриття сигналів.

4. Якщо пакет приходить на певний канал LoRa і немає доступних шляхів прийому для прослуховування цього каналу, пакет втрачається.

2.4 Інші моделі мережі LoRa

2.1.1 Доступ до каналу

Далі посилаємось на мережу класу A LoRa, де передачі завжди ініціюються кінцевими пристроями.

Для цього кінцевий вузол може вибрати випадковим чином один канал у доступній лінійці каналів, який використовується спільно між усіма пристроями LoRa, підключеними до мережі.

Якщо не вказано інше, виконуючи необхідну роботу, будемо використовувати базову лінійку каналів.

Оскільки канали будуть вибрані випадковим чином, доступні шляхи прийому шлюзу рівномірно розподілені між трьома каналами, як показано в таблиці 2.3, щоб максимізувати покриття в кожному каналі.

Таблиця 2.3 – Моделювання каналів, використане в моделюванні

Індекс каналу	Частота	Кількість шляхів отримання
1	868.1	3
2	868.3	3
3	868.5	2

2.3.4 Модель застосування

Пристрої моделюються для створення трафіку відповідно до моделі періодичних звітів Mobile Autonomous Reporting (MAR).

Очікується, що періодичні звіти по висхідній лінії зв'язку стануть звичайною поведінкою в сценарії IoT, коли кілька пристроїв повинні будуть контролювати стан комунальних послуг, таких як газ, вода та електроенергія, і навколишнього середовища, періодично повідомляючи про вимірювання температури та вологості.

Ця модель особливо корисна для оцінки потенціалу.

Відповідно до моделі періодичних звітів MAR, розмір корисного навантаження програми є випадковою змінною, розподіленою по Парето, з параметром форми $\alpha = 2,5$ і мінімальним корисним навантаженням розміру програми 20 байт і обмеженням 200 байт: це означає, що надісланий чи отриманий пакети з корисним навантаженням більше ніж 200 байт обрізаються до розміру 200 байт.

Розподіл пристроїв з певним часом міжнадходження пакетів описано в таблиці 2.4.

Виконуючи роботу, не розглядаються передачі DL (повідомлення від шлюзів до кінцевих пристроїв).

Однак це не слід вважати серйозним обмеженням, оскільки більшість трафіку в мережах LoRaWAN, як очікується, буде Uplink (UL).

Щоб адаптувати цей розподіл до специфікації LoRa, його було змінено, щоб мати мінімальний розмір корисного навантаження 10 байт і обмеження 50 байт.

Крім того, кожному кінцевому пристрою призначається випадкова початкова затримка звітування, після чого вузол генерує новий пакет кожні τ секунд, щоб уникнути синхронізації всіх пристроїв.

Таблиця 2.4 – Розподіл часу між надходженням пакетів

Інтервал часу τ	Відсоток пристроїв
1 день	40%
2 години	40%
1 година	15%
30 хвилин	5%

З розповсюдження видно, що очікується, що майже половина пристроїв матиме дуже малу швидкість надходження пакетів – 1 пакет/добу.

З іншого боку, кожен з 5% пристроїв буде генерувати по 48 пакетів щодня: це означає, що загальний трафік невеликої кількості пристроїв, які часто

передають, очікується в шість разів більше, ніж трафік, створений 40% вузлів, які рідко передають.

Така ситуація констатує той факт, що налаштування періодичності навіть у невеликій кількості пристроїв можуть мати суттєвий вплив на продуктивність усієї досліджуваної мережі.

2.4 Висновки

В розділі представлено моделі різних компонентів системи LoRaWAN.

Зокрема подано основні моделі перешкод, моделі трафіку та поширення сингалів.

Також в розділі було представлено моделювання таких аспектів функціонування мережі LoRa, як: аналіз модуляції та поширення, модель вимірювання зв'язку, модель втрат при поширенні, моделювання втрат проникнення в будівлю, корельованого затінювання, модель продуктивності зв'язку, дослідження чутливість приймача, перешкоди, модель шлюзу.

Побудовані моделі стануть основою для розроблення удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

3 УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЯ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ЗА LORAWAN СТАНДАРТОМ

3.1 Основи удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

З метою розв'язання задачі проектування та оптимізації взаємодії компонентів IoT за стандартом LoRaWAN на основі запропонованих в розділі 2 моделей було розроблено удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Удосконалений метод включає наступні кроки:

1. Створення топології: набір вузлів (тобто пристроїв), які будуть використовуватися в мережі, створюється як набір об'єктів Node. MobilityModel може бути пов'язана з кожним вузлом, щоб відображати фізичне положення вузла та те, як воно змінюється з часом.

2. Побудова моделі: на раніше створений набір вузлів встановлюється певний стек протоколів. Зазвичай це робиться за допомогою хелперів, класів, які спеціалізуються на встановленні на вузол різних об'єктів, що реалізують необхідні рівні стеку ISO/OSI. Цей крок дає кожному вузлу можливість створювати, надсилати, отримувати та інтерпретувати пакети, що належать протоколу.

3. Побудова конфігурації: моделі протоколу налаштовуються на використання певних значень як своїх параметрів, а також створюються зв'язки між різними вузлами. Зазвичай це робиться шляхом «підписки» РНУ шарів кількох вузлів на той самий об'єкт каналу.

4. Запуск системи: запускається моделювання, і клас Simulator проходить через події та виконує відповідні виклики функцій. Під час моделювання джерела трасування запускають і зберігають дані або у відповідних структурах даних, або у файлі. У деяких випадках може бути корисно зупинити

моделювання (тобто запланувати подію зупинки), коли буде зібрано достатньо даних з джерел трасування.

5. Аналіз продуктивності: після зупинки моделювання зібрані дані можна проаналізувати та візуалізувати.

Розглянемо в деталях вищеописані кроки удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, а також опис способів їх налаштування.

3.1.2 Компоненти мережі, що беруть участь в процесі проектування

Розглянемо опис компонент, що беруть участь в процесі проектування та оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Їх необхідно налаштувати, щоб побачити їх вплив на продуктивність системи в цілому. Деякі помітні змінні:

1. Масштаб мережі: більша кількість ED в мережі призведе до більшої ймовірності перешкоди двох сигналів. З іншого боку, кількість шлюзів, які розгорнуті на фіксованій території, вплине на покриття пристроїв всередині будівель: більша щільність шлюзу дозволить пристроям, які відчувають сильне затінювання, спілкуватися.

2. Модель трафіку, створеного прикладним рівнем. При постійній щільності пристроїв менший час між надходженням повідомлень спричинить більше зіткнень між пакетами. Синхронність часу відправлення пакетів також може збільшити ймовірність подій руйнівних перешкод.

Компоненти моделі втрат на шляху можуть вплинути на діапазон покриття шлюзу: менша дисперсія затінювання або припущення, що враховує «легші» зовнішні стіни в будівлях, зменшує втрати, обчислені каналом, і дозволяє сигналу передавача поширюватися далі, перш ніж потрапити під зону чутливості приймача.

Аналогічно, багато різних показників необхідно розрахувати в системі LoRaWAN:

1. Розподіл коефіцієнта поширення: як коефіцієнти поширення розподіляються на різних відстанях від шлюзу, і як на це впливає використовувана модель втрат поширення.

2. Втрачені повідомлення: повідомлення прикладного рівня можуть бути відкинуті через норми робочого циклу, а повідомлення рівня РНУ можуть бути втрачені, оскільки вони надходять до шлюзу з недостатньою чутливістю або через руйнівні перешкоди. Швидкість втрати пакетів може бути досліджена як функція змінної, щоб виділити конкретну механіку системи.

3. Пропускна спроможність мережі: розглядаючи систему в цілому, може необхідно подивитися на швидкість вилучення необроблених даних, яких можна досягти. Тому основна увага зосереджена на ефективності мережі, а не на ймовірності того, що типовий пристрій успішно доставить пакет.

3.1.3 Обчислення коефіцієнта поширення

Перед початком проектування системи кожному пристрою присвоюється SF відповідно до процедури, описаної в Алгоритмі 3.1.

Спочатку обчислюємо рівень потужності, який кожен шлюз отримує від кінцевого пристрою.

Потім необхідним кроком є вибір шлюзу з найвищою отриманою потужністю і встановлюємо SF на основі цього значення.

Призначення виконується відповідно до чутливості шлюзу: призначаємо кінцевому пристрою найнижчу SF, яка все ще буде вище чутливості шлюзу.

Це робиться для того, щоб мінімізувати ToA для пакетів цього пристрою, і таким чином знизити ймовірність зіткнень.

Варто зауважити, що через тінь і наявність будівель найближчий шлюз до пристрою не завжди може бути тим, який отримує найвищу потужність від цього пристрою.

Ця процедура виконується для того, щоб не потребувати подальших адаптацій ADR.

Крім того, хоча в реальній мережі умови затінювання змінювалися б з часом, у випадку цієї тези канал вважався незалежним від часу, тому, як тільки SF налаштовані, немає необхідності в адаптації.

Як приклад цієї процедури, припустимо, що найкращий шлюз для пристрою отримує потужність -137 дБм.

Тому, враховуючи значення чутливості, наведені в таблиці 2.1, можна помітити, що $SF = 9$ буде занадто низьким, тоді як можна отримувати пакети кінцевого пристрою, якщо вони надсилаються за допомогою $SF \in \{10, 11, 12\}$.

Оскільки потрібно мінімізувати ToA, встановлюємо кінцевий пристрій на використання $SF = 10$.

Призначення SF, описане вище, можна візуалізувати на рисунку 3.1, де показано частину імітованого розгортання для різних моделей поширення.

Один єдиний шлюз був розміщений в координатах (0, 0).

ED представлені у вигляді хрестів, а коефіцієнт розповсюдження пристрою кодується кольором.

На рисунку 3.1а видно, що, якщо використовується лише модель втрат поширення Log-Distance, відстань пристрою від шлюзу є єдиним компонентом, який визначає SF: пристрої на відстані до 3500 метрів від шлюзу є налаштований на використання SF 7, тоді як більші відстані змушують пристрої використовувати вищі коефіцієнти поширення.

Максимальний радіус, який пристрій, що передає на 14 дБм ERP, може досягти за допомогою моделі, становить приблизно 7,5 км. Коли тінь додається до моделі поширення, як показано на рисунку 3.1б, межі між наборами пристроїв, які використовують той самий SF, стають більш розмитими: деякі пристрої, які були б трохи вище чутливості, отримують гіршу зв'язок через затінення, тоді як інших не карають так сильно.

Рисунок 3.1в показує ефект від додавання будівель до моделювання: деякі пристрої відчувають сильне затінювання, навіть якщо вони знаходяться в межах 1 км від шлюзу, і змушені використовувати більш високі коефіцієнти розповсюдження, щоб порівняти втрати на проникнення в будівлі.

З іншого боку, ті пристрої, які не розміщені всередині будівлі, зазнають таких же втрат, як на рисунку 3.1б.

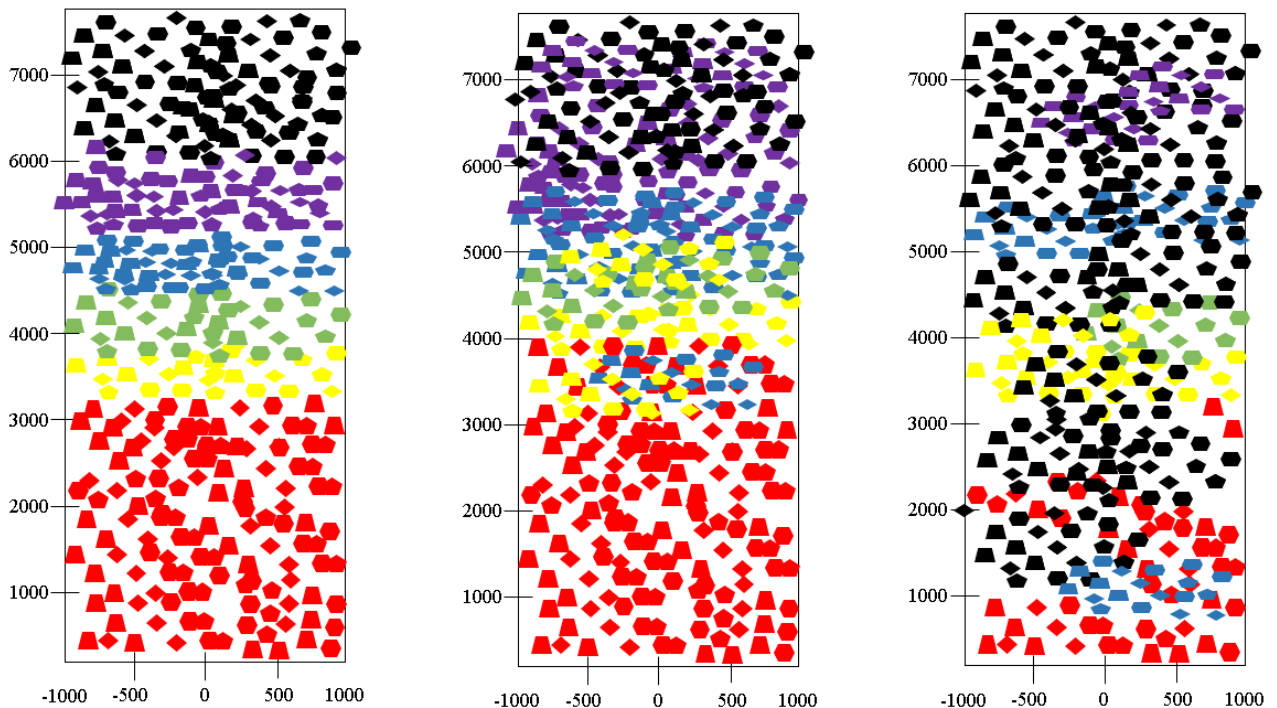


Рисунок 3.1 – Розподіл факторів розповсюдження для різних моделей поширення:

- а) звичайне поширення сигналу;
- б) поширення сигналу із затінюванням;
- в) поширення сигналу із затінюванням та перешкодами, спричиненими будівлями

Алгоритм 3.1 – Обчислення показника поширення

Вхідні дані: $S_i = GW$ чутливість до SF_i

- 1: для кожного ED e в мережі
- 2: для кожного GW g в мережі
- 3: Обчисліть отриману потужність для передачі від e до g
- 4: Виберіть ГВт, який отримав найсильніший сигнал з потужністю P
- 5: Призначте e найнижчий SF так, що $P > S_i$
- 6: повернення

3.2.1 Продуктивність пропускної здатності

Перша імітаційна кампанія спрямована на оцінку пропускної здатності мережі S як функції пропонованою мережею трафіку G.

Сценарій характеризується єдиним центральним GW і N ED, які рівномірно розподілені по колу радіусом $r = 7500$ м навколо нього.

Це конкретне значення радіусу було вибрано, оскільки r — це максимальна відстань, на якій шлюз і кінцевий пристрій, що використовує $SF = 12$, можуть обмінюватися інформацією з вище чутливістю лише з урахуванням втрат поширення.

Моделювання для цього розділу було виконано на одному логічному каналі LoRa. Шлюз був налаштований так, щоб увімкнути лише один шлях прийому для всіх симуляцій, що вимірюють пропускну здатність.

Для обчислення пропускної здатності припустимо, що EDs $i = 1, \dots, N$ генерує кожні T_i секунд пакет, який займає канал протягом $t_{p,i}$ секунд для того, щоб бути переданим.

Зауважте, що для моделювання, обмеження робочого циклу не застосовувалися.

Зацікавленість полягає в тому, що потрібно тестувати схему доступу LoRaWAN, незалежно від місцевих правил, які можуть змінити її продуктивність.

Обчислюємо пропонований мережевий трафік, як описано в [32]:

$$G = \sum_{i=1}^N \frac{t_{p,i}}{T_i} \quad (3.1)$$

Іншими словами, пропонований трафік – це показник, який виражає частку часу, протягом якого канал займають передачі кінцевими пристроями. $G < 1$ означає, що канал використовується недостатньо, оскільки є моменти, коли передача через канал не проходить.

З іншого боку, $G > 1$ означає, що навіть при ідеальній синхронізації пристроїв деякі пакети обов'язково будуть намагатися використовувати канал одночасно, викликаючи зіткнення.

Для заданого значення G пропускна спроможність S тоді отримується як:

$$S = G * P_{\text{succ}}, \quad (3.2)$$

де ймовірність успіху даного пакета P_{succ} , апроксимується як відношення між кількістю успішно прийнятих пакетів і загальною кількістю надісланих пакетів під час моделювання.

Мережа, яка пропонує трафік 1 і має ідеальну синхронізацію між пристроями, щоб уникнути зіткнень і не втратити пакети, забезпечить пропускну здатність 1.

Звичайно, ідеальної синхронізації між пристроями неможливо досягти, тому очікується, що $S < 1$.

Особливо для мереж, де пристрої здійснюють доступ до каналу незалежно від координації, як-от часовий або частотний інтервал, як у випадку LoRaWAN, очікується, що пропускна здатність відповідатиме формі протоколу доступу до середовища ALOHA.

В якості першої перевірки симулятора, описаного в главі 4, очікуємо, що за ідеальних умов каналу форма кривої пропускну здатності для різного пропонованого трафіку буде формою типової мережі ALOHA.

Якщо вимкнути модель вимірювання зв'язку, усі кінцеві пристрої будуть налаштовані на передачу з $SF = 7$, і всі пакети мають однаковий ToA (за умови фіксованої довжини корисного навантаження) і приймаються з однаковою потужністю на центральному шлюзі.

Також припускаємо, що перекриваються пакети завжди фатально стикаються і, отже, втрачаються: це означає використання матриці T , яка заповнена дуже великими числами, так що при найменшому перекриванні двох пакетів виникають руйнівні перешкоди для обох передач.

Насправді, якщо використовувати інтерференційну матрицю рівняння, пакети з однаковим SF мали б ізоляцію 6 дБ, і пакети, що злегка перекриваються, можуть пережити зіткнення, як це було у випадку з екстремальними зміщеннями.

Використовуючи цей параметр, вираз для трафіку, який пропонує мережа з N пристроїв, може бути виражено як:

$$G = \frac{N * t_7}{T_i} \quad (3.3)$$

де t_7 є ToA для пакету, що використовує SF 7 і фіксовану довжину корисного навантаження.

Як і очікувалося, результат цього тесту, показаний на рисунку 3.2, відповідає типовій тенденції пропускної здатності ALOHA [33], для якої існує точний вираз:

$$S = G * e^{-2G} \quad (3.4)$$

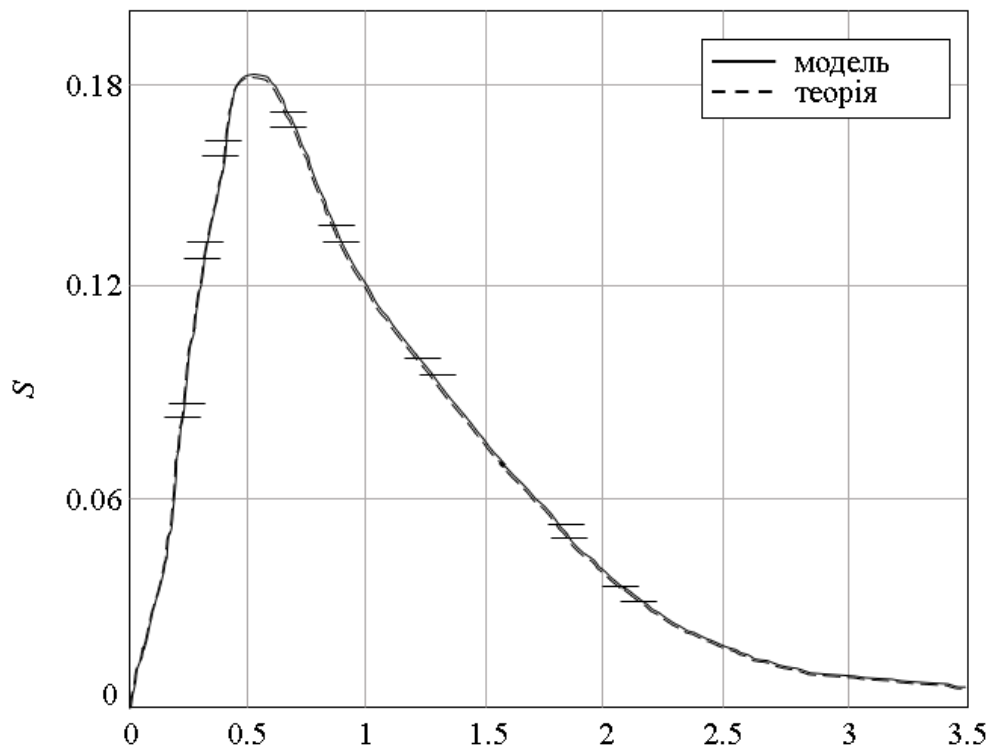


Рисунок 3.2 – Пропускна здатність для SF = 7 і ідеальних зіткнень пакетів

Після цієї першої перевірки можемо оцінити вплив використання різноманітних SF та реального бездротового каналу, використовуючи логарифмічний компонент пропонованої моделі вимірювання каналу: дійсно, наявність реального каналу мотивує використання всі можливі SF, щоб дозволити іншим пристроям спілкуватися з GW.

Той факт, що використовується декілька SF, також дозволяє мережі використовувати квазіортогональність передач з використанням різних SF, використовуючи матрицю зіткнень T .

Результати моделювання на рисунку 3.3 показують велике збільшення пропускної здатності порівняно з попереднім випадком.

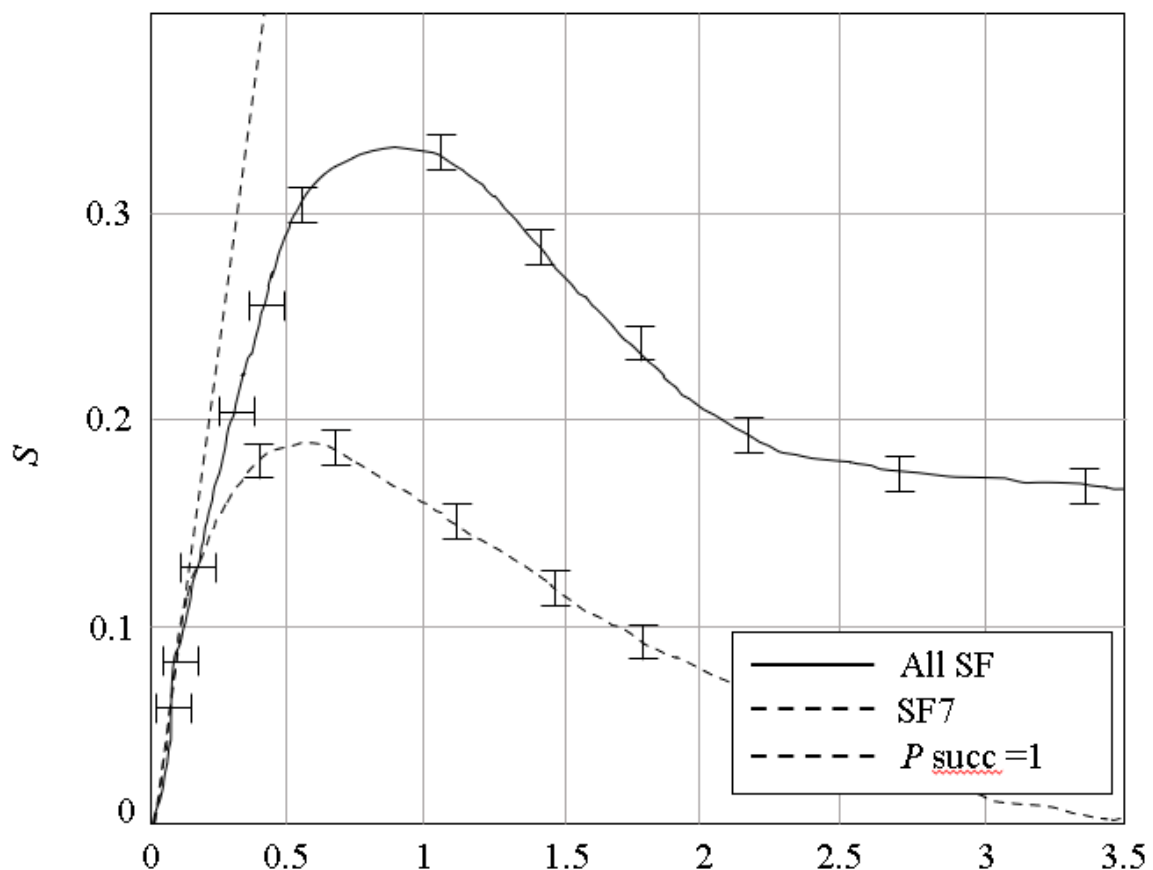


Рисунок 3.3 – Пропускна здатність мережі LoRa з реальним бездротовим каналом (суцільна лінія) і без нього (пунктир)

Також досліджували вплив передач $SF = 12$ на продуктивність мережі LoRa, особливо на перешкоди. Для цього була створена симуляція, в якій ED,

налаштовані на використання SF 12, не мали права передавати, навіть якщо їх трафік все ще враховувався до загальної суми створеного трафіку.

Таким чином, хоча деякі з згенерованих пакетів завжди не будуть передаватись і вважатимуться втраченими пакетами у відношенні P_{succ} , вони також не створюватимуть перешкод для інших передач у мережі.

Результати моделювання, показані на рисунку 3.4, демонструють, що виключення кінцевих пристроїв з найвищим SF є вигідним, коли навантаження на систему велике, оскільки зіткнення з іншими кінцевими пристроями зменшуються, і, таким чином, ймовірність успіху збільшується до $S_{gain} = 0,12$ щодо сценарій, за яким пристроям SF 12 дозволено передавати.

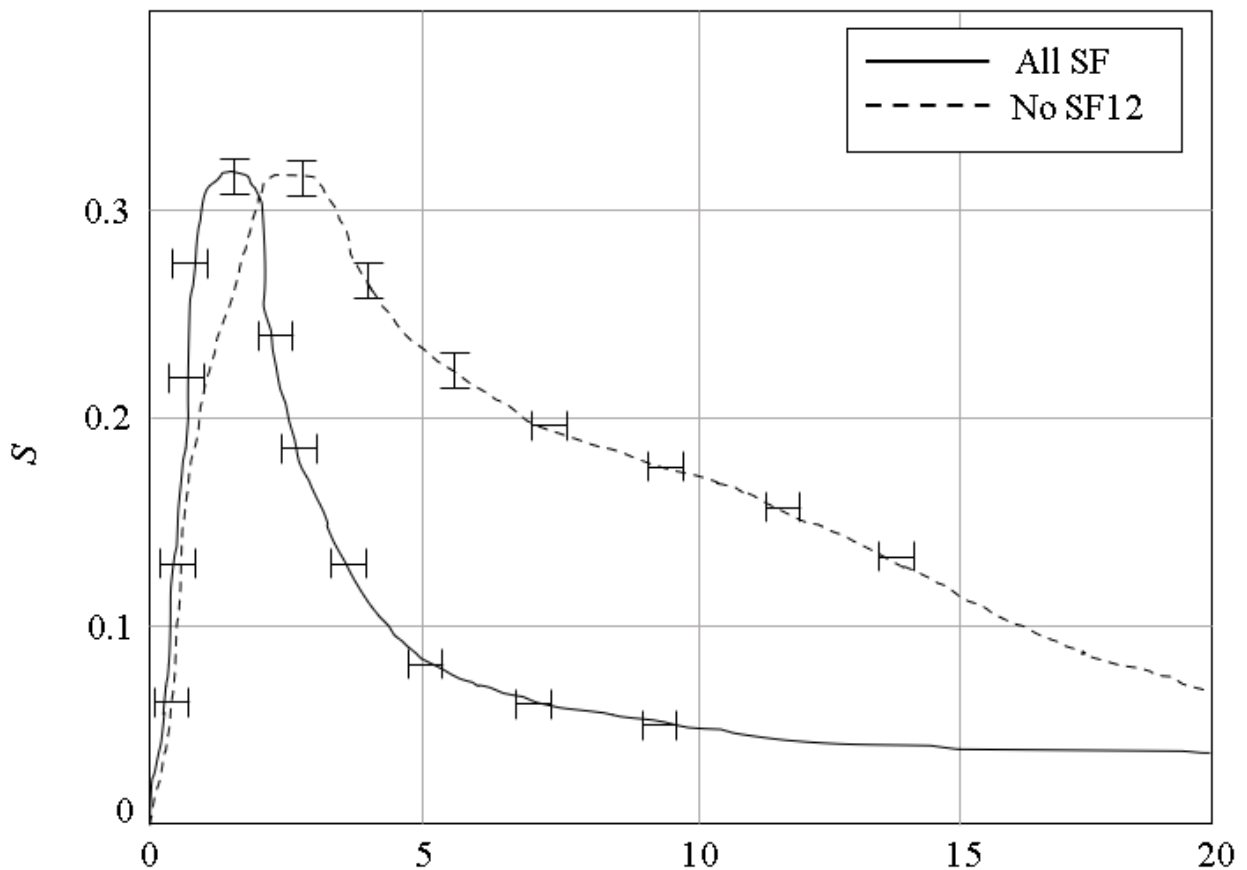


Рисунок 3.4 – Порівняння пропускної здатності з SF = 12 і без нього

З іншого боку, для низьких пропонованих значень трафіку, коли перешкоди не є обмежуючим фактором для пропускної здатності, той факт, що

деякі пакети не передаються, негативно впливає на пропускну здатність, викликаючи втрати до $S_{\text{loss}} = 0,1$.

Така поведінка відповідає мандату LoRa Alliance виключати з загальнодоступних мереж кінцеві вузли, які передають лише на $SF = 12$ і відмовляються змінювати свої SF: в той час як ці вузли матимуть більшу ймовірність успішної доставки пакета, з огляду на кращу чутливість від GW до SF 12, їх вплив на мережу в цілому буде згубним.

В результаті роботи дослідили вплив застосування обмежень робочого циклу до передач кінцевого пристрою.

Рисунок 3.6 показує ефект обмеження передачі пакетів ED до фіксованої максимальної швидкості, що відповідає робочому циклу 1%.

Ця швидкість залежить від SF, який використовується вузлом, оскільки вищі SF будуть використовувати канал довше в порівнянні з нижчими SF: оскільки G обчислюється на основі однакового періоду передачі для всіх пристроїв, при фіксованому значенні G деякі пристрої в мережа може бути обмежена робочим циклом, в той час як інші передають під цим отриманим обмеженням.

На рисунку 3.5 показано, що робочий цикл 1% насправді є вигідним для системи, оскільки він обмежує рух і, отже, зіткнення.

Це дозволяє стабілізувати пропускну здатність після падіння продуктивності аж до тих пір, поки всі вузли мережі не перебувають під впливом обмежень робочого циклу, стабілізуватися на фіксованому значенні $S_{1\%} = 0,14$.

Ця стабілізація протидіє безперервному падінню продуктивності, яке слідує за збільшенням пропонованого трафіку, якби не були застосовані обмеження, і може забезпечити підвищення продуктивності за дуже невеликої додаткової складності програмного забезпечення ED.

Довірчі інтервали були розраховані для всіх графіків, показаних вище, і підтверджують виграв у продуктивності, якого можна досягти як шляхом видалення пристроїв SF 12, так і шляхом застосування робочого циклу.

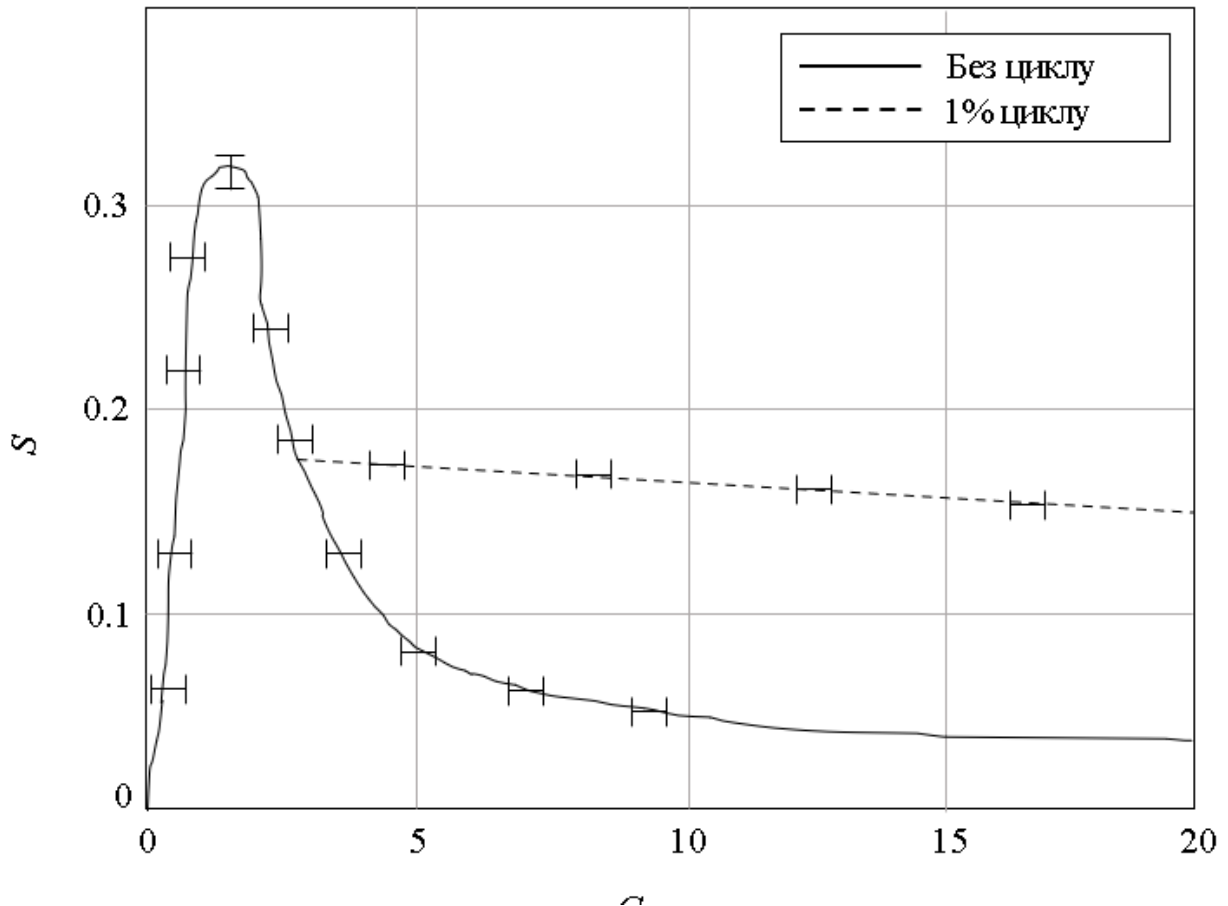


Рисунок 3.5 – Вплив обмежень робочого циклу на пропускну здатність

3.2.2 Ефективність ймовірності успіху

Друга імітаційна кампанія була спрямована на оцінку ймовірності успішного отримання пакета в мережі LoRa.

Оскільки нас цікавить продуктивність реальних мереж, цей сценарій моделювання містить 36 шлюзів, які розміщені в гексагональній сітці навколо центрального шлюзу, що емулює реальну систему з охопленням стільникового зв'язку великого простору.

У цих моделюваннях кожен шлюз охоплюватиме радіус 1,5 км, таким чином, область, в якій розміщуємо кінцеві пристрої, є колом радіусом 7,5 км з центром на центральному шлюзі.

Така велика мережа дозволяє моделювати міжстільникові перешкоди, окрім внутрішньостільникових перешкод: незважаючи на те, що моделювання має 37 шлюзів, нас цікавлять лише пристрої, що належать до зони, яку охоплює

центрального шлюзу, тому зібрані дані стосуються пакети, які були згенеровані в області інтересу.

Щоб додати реалістичності моделюванню, вся область містить будівлі, а також увімкнено створення корельованого затінювання.

Якщо положення пристрою випадковим чином призначено для області, зайнятої будівлею, цей пристрій буде позначено як «всередині», а передачі, що залучають його, будуть страждати від втрат на проникнення в будівлю. Що стосується генерації трафіку, посилаємось на модель періодичних звітів Mobile Autonomous Reporting, описану в [34]. Також розмір корисного навантаження на рівні програми рандомізовано відповідно до розподілу Парето, як описано в [35], з розміром корисного навантаження в діапазоні [10, 30] байтів. Цей набір параметрів дозволяє моделювати реалістичну мережу, однак моделювання такої великої мережі вимагає деяких оптимізацій, щоб прискорити обчислення.

Наближення, яке допомагає пришвидшити моделювання, передбачає відсікання тих кінцевих пристроїв, які створили б нерелевантні перешкоди на центральному шлюзі, відповідно до наступного критерію.

Назвемо I_r множину пристроїв, які знаходяться всередині кола радіуса r і з центром на центральному шлюзі, і O_r набір пристроїв за межами цього кола.

Нехай E_{I_r} — це загальна енергія, отримана на центральному шлюзі через пристрої всередині кола, а E_{O_r} — енергія, що доставляється пристроями за межами кола.

Після знаходження найменшого r , для якого $E_{I_r} \ll E_{O_r}$, обрізаємо всі пристрої, що належать до O_r , від'єднуючи РНУ від каналу та видаляючи вузли з моделювання.

Процедура описана в Алгоритмі 3.2, а ефекти можна побачити на рисунку 3.6: той факт, що змодельовані пристрої охоплюють площу, більшу, ніж осередок центрального шлюзу, дозволяє моделювати ефекти міжстільникових перешкод, крім внутрішньостільникових перешкод ефективним способом.

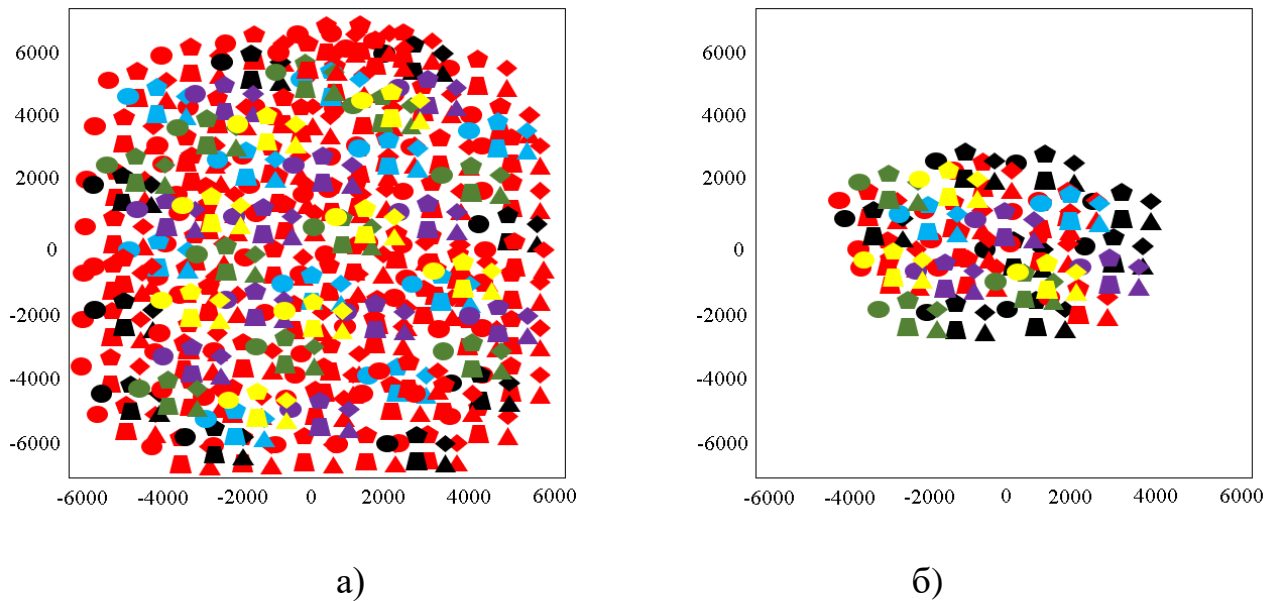


Рисунок 3.6 – Ефекти алгоритму обрізання: а) усі пристрої; б) пристрої, що залишилися після обрізки

Алгоритм 3.2 – Оцінювання ефекту міжстільникових перешкод

Вхідні дані: радіус = радіус моделювання

1: $r = 0$

2: вихід = помилка

3: для $sf \in 7, \dots, 12$

4: для $r < \text{радіус}$, вихід = false

5: внутрішня енергія = зовнішня енергія = 0

6: для кожного кінцевого пристрою e

7: якщо $e.SF = sf$

8: енергія = енергія e для передачі

9: якщо e відстань від центру $< r$

10: внутрішня енергія = внутрішня енергія + енергія

11: інакше

12: зовнішня енергія = зовнішня енергія + енергія

13: якщо $\text{externalEnergy} < \text{insideEnergy}/10$

14: вихід = правда

15: ще

16: $r = r + \epsilon$

17: повернення

На рисунку 3.7 показана імовірність успіху пакету як функція кількості кінцевих пристроїв у зоні покриття центрального шлюзу.

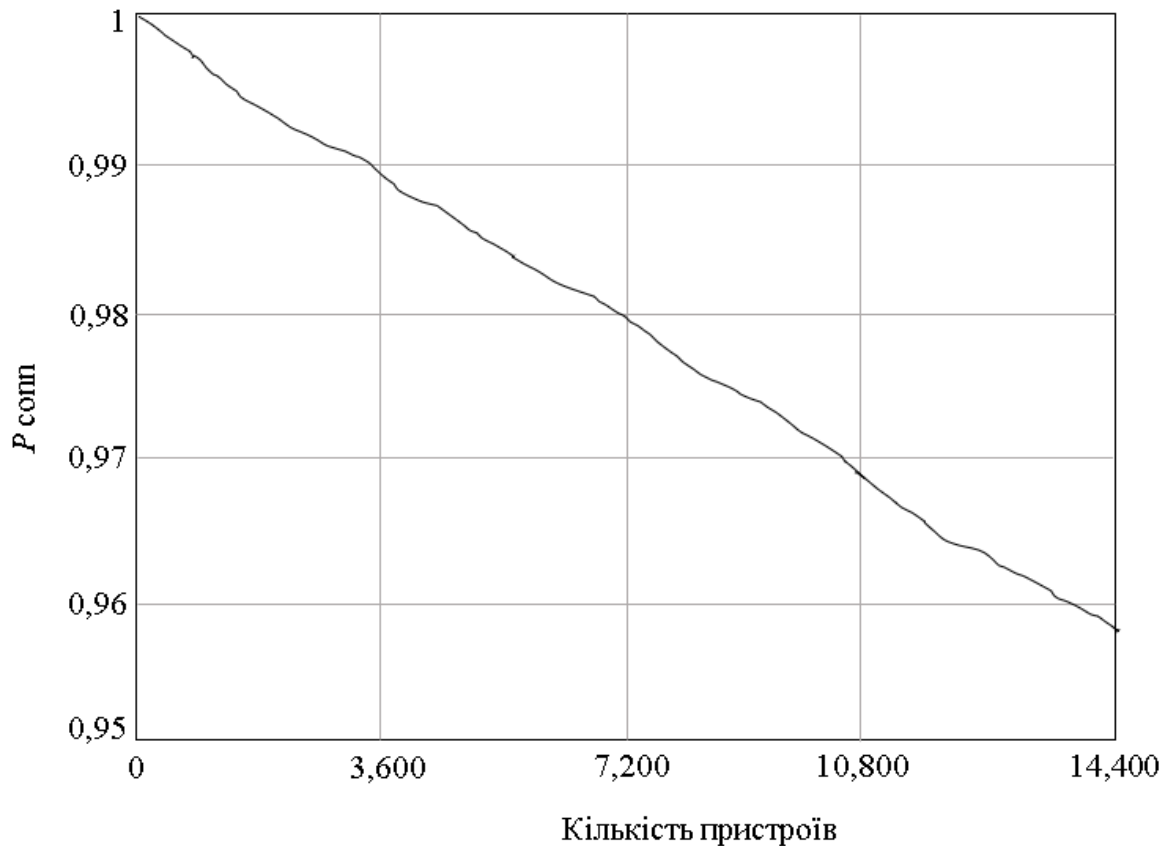


Рисунок 3.7 – Імовірність того, що пакет успішно отримано, як функція кількості кінцевих пристроїв

Ця ймовірність ігнорує пакети, які надходять до центрального шлюзу з чутливістю через велику втрату будівлі або затінення, таким чином, зниження ймовірності успіху пов'язано лише з перешкодами або недоступністю адекватних шляхів прийому на шлюзі. Відсоток вузлів, які не змогли досягти шлюзу з достатньою потужністю, становив, у випадку цього сценарію, 20%.

Симуляція охоплює 1 день і повторюється 10 разів, щоб імітувати різні сценарії затінення та розміщення ED. Обчислення довірчих інтервалів запевняє нас, що це дійсно була досить велика вибірка.

Тенденція до зменшення виявляється лінійною залежно від кількості пристроїв у мережі, з ймовірністю успіху близько 96% для шлюзу, якому поставлено завдання обслуговувати 14000 ED.

Це узгоджується з твердженням Semtech, що шлюз може підтримувати мережу з близько 10^4 вузлів [36], якщо цільова ймовірність успіху передачі зафіксована на рівні 95%.

3.2.3 Статистика факторів розповсюдження

Інша серія моделювання була спрямована на оцінку поведінки різних SF в LoRaWAN. У разі цих симуляцій мережа з $N = 8000$ пристроїв була розгорнута в колі радіусом 7500 м.

Тому кореляційне затінення та втрати будівлі були вимкнені, щоб гарантувати, що кожен пристрій міг досягти шлюзу з потужністю вище чутливості GW до пакетів SF 12.

Це також означає, що є лише дві причини, чому пакет може бути втрачений: або через перешкоди, або через недоступність відповідних шляхів прийому.

Усі ED обслуговуються одним шлюзом, розміщеним у центрі кола.

Для кожного SF було оцінено три статистичні дані:

P_{succ} – це ймовірність того, що пакет, надісланий із SF i , отримано правильно.

P_{int} – це ймовірність того, що пакет, надісланий із SF i , пошкоджений перешкодами.

P_{nmr} – це ймовірність того, що пакет, надісланий із SF i , не був отриманий, оскільки більше не було доступних шляхів отримання.

На рисунку 3.9 показані вищенаведені показники для моделювання, виконаного з використанням прикладної моделі періодичних звітів MAR [37].

Це означає мережу, яка генерує відносно низький обсяг трафіку, в якій перешкоди не відіграють переважної ролі: ймовірність успіху для кожного SF вище 80%, і вище 90% для SF 11 і нижче.

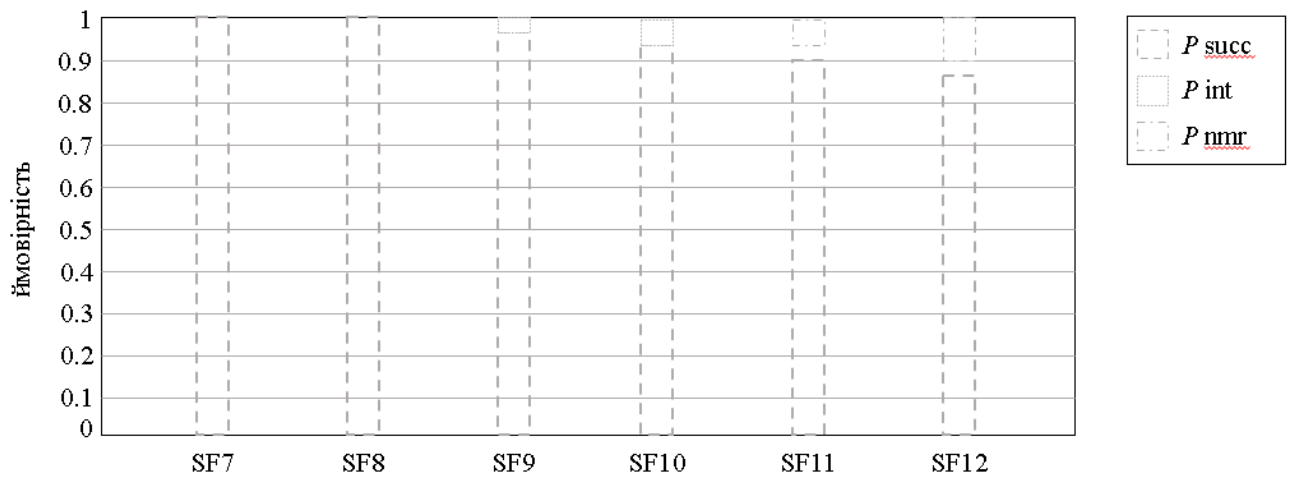


Рисунок 3.8 – Статистика SF для мережі з низьким трафіком

Спостерігається загальна тенденція: чим вище SF пристрою, тим вище стає ймовірність втрати пакетів цього пристрою через перешкоди.

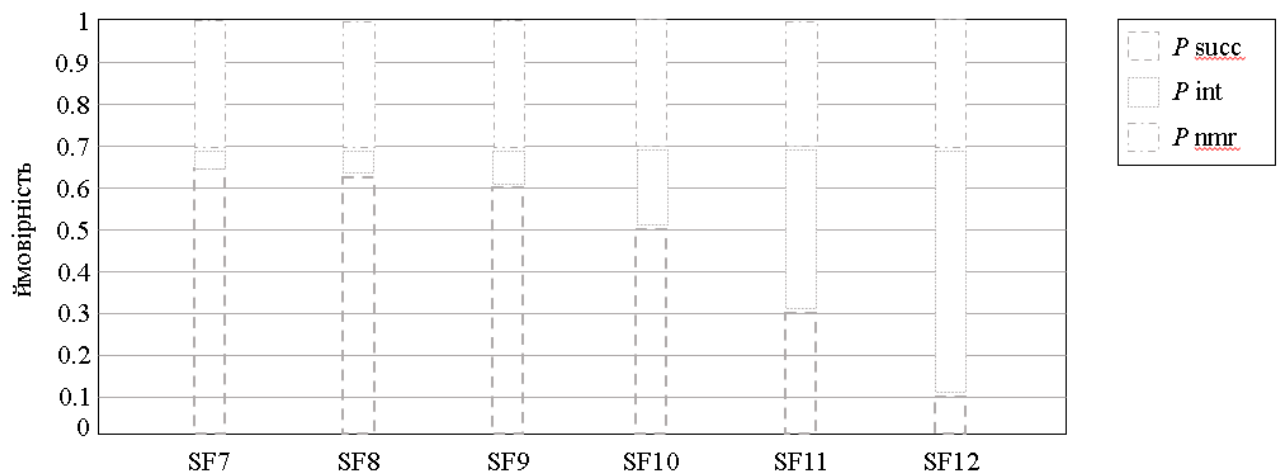


Рисунок 3.9 – Статистика SF для мережі з великим трафіком

Оскільки трафік у сценарії низький, пакети практично не були втрачені, оскільки не було доступних відповідних шляхів отримання.

Рисунок 3.10, з іншого боку, представляє ситуацію, коли мережа відчуває інтенсивний трафік.

Тому ED були налаштовані на надсилання пакетів раз на 10 хвилин.

Можна помітити, що тенденція, яка спостерігалася на рисунку 3.9, де перешкоди збільшувалися з SF, тому посилюється більш інтенсивним трафіком.

Іншою основною причиною втрати пакетів є відсутність шляхів прийому в шлюзі: цей ефект однаковою мірою відчуває кожен пристрій, незалежно від його SF, оскільки він залежить лише від перевантаженості системи.

3.2.4 Оцінка покриття шлюзу

В останній кампанії моделювання вивчаємо, як збільшення кількості шлюзів, що обслуговують фіксовану кількість ED, підвищить ймовірність того, що даний вузол зможе підключитися до мережевого сервера.

Цей аспект особливо цікавий для критичних додатків, де прийом пакетів будь-яким шлюзом має вирішальне значення.

Також змоделивали круговий міський сценарій радіусом 7,5 км, так що вся територія все ще покривалася одним шлюзом, де кінцеві пристрої обслуговуються все більшою кількістю шлюзів, розгорнутих у гексагональній сітці.

Для виконання цих симуляцій була використана модель повного поширення, тому значна частина ED зазнає сильних тіней, викликаних будівлями.

На рисунку 3.11 зображено ймовірність того, що ED вдасться підключитися щонайменше до одного шлюзу, порівняно з кількістю шлюзів, які були розгорнуті у фіксованому колі радіусом 7,5 км.

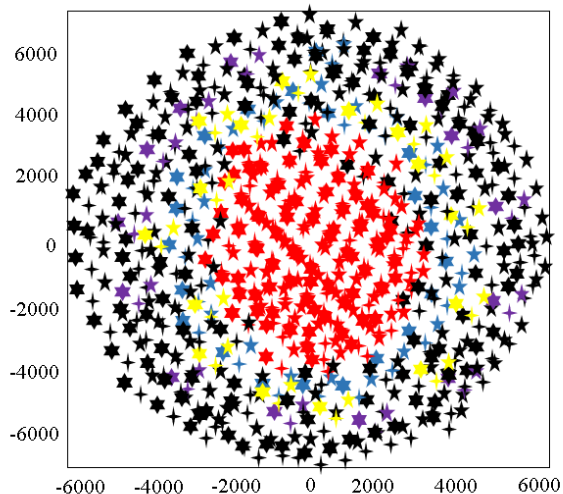
Моделювання показує, що для досягнення надійності понад 90% шлюзи повинні бути розгорнуті таким чином, щоб кожен шлюз охоплював 6 км² або, що еквівалентно, мав радіус 1200 м навколо нього.

Щоб досягти ймовірності покриття вище 95%, відстань між двома сусідніми шлюзами має становити 2000 м або менше.

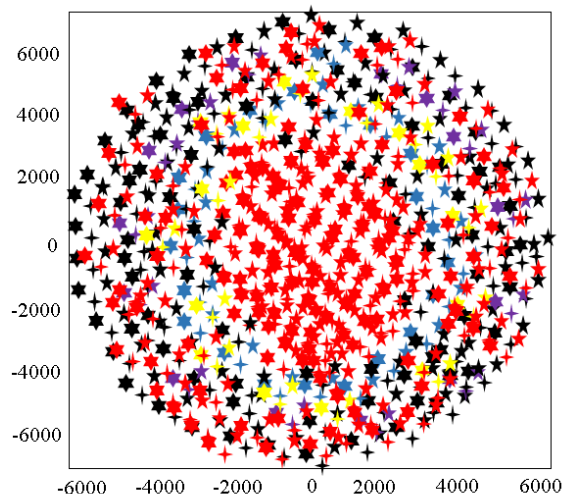
Це значення можна порівняти з цифрою, наведеною в [3] для радіусу, охопленого стільником СІоТ, фіксованого на 577 м: моделювання припускає, що

система LoRaWAN потребує меншої щільності розгортання GW для досягнення задовільного покриття порівняно з базовими станціями в Сценарій СІоТ.

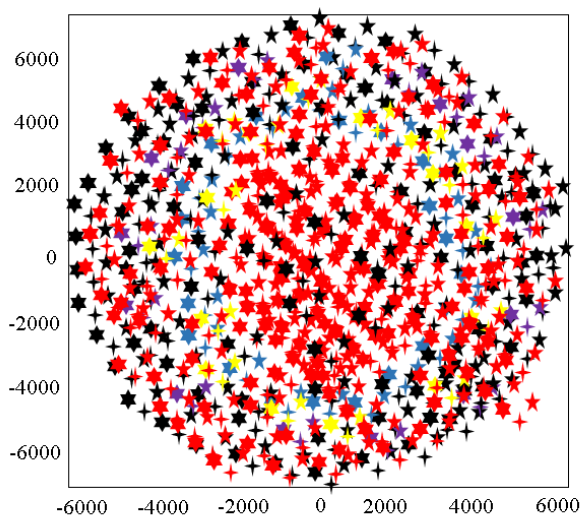
Одним із наслідків збільшення щільності шлюзів є те, що кількість кінцевих вузлів із $SF > 7$ зменшується, залишаючи місце для мережі, яка здебільшого складається з вузлів, що використовують SF 7 (рис. 3.10).



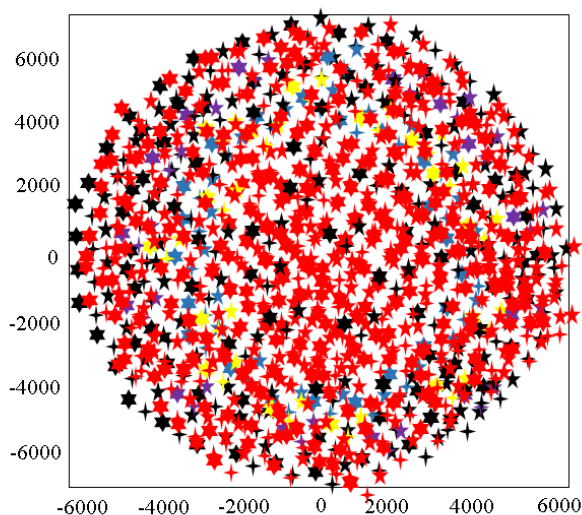
(a) 1 шлюз.



(b) 7 шлюзів.



(c) 19 шлюзів.



(d) 37 шлюзів.

Рисунок 3.10 – Покриття для різної щільності шлюзу

Це явище зображено на рисунку 3.11 мережа пристроїв використання одного і того ж SF призведе до збільшення кількості зіткнень між пакетами, оскільки різноманітність модуляції не використовується.

У реальній мережі LoRa механізм ADR повинен мати можливість підтримувати мережу в стані, коли ортогональність SF все ще може бути використана для збільшення пропускної здатності.

Звісно, продуктивність таких алгоритмів може бути досліджена в майбутньому за допомогою симулятора, розробленого під час виконання роботи.

Результати, отримані під час роботи, підкреслюють якості модуляції LoRa. Перш за все було показано, що, використовуючи квазіортогональність між різними SF, мережа, що використовує пристрої LoRa, досягає пропускної здатності, яка вища, ніж у стандартної системи ALOHA, без додавання будь-якого навантаження на схему MAC, як-от координація та синхронізація між пристроями або зондуванням несучого.

Ця функція дозволяє мережам LoRa добре масштабуватися, зберігаючи при цьому низьку складність, яка підходить для пристроїв IoT.

Крім того, завдяки модуляції та її високим значенням чутливості мережі LoRa можуть бути розгорнуті в міському сценарії зі зниженою щільністю щодо пропонуванних мереж CIoT.

Нарешті, SF є ще однією особливістю мережі, яку NS може налаштувати, щоб оптимізувати продуктивність мережі, знаходячи правильний баланс між стійкістю до перешкод, викликаних різноманітністю SF, і максимальним можливим покриттям.

Той факт, що стандарт LoRaWAN не визначає клітинки шлюзу, означає, що ED не прив'язані до одного шлюзу.

Шлюзи можна розміщувати вільно, не обов'язково дотримуючись попередньо визначеної схеми розгортання: це ключова функція, яка дозволяє таким краудсорсинговим рішенням, як The Things Network, розвиватися настільки швидко, заохочуючи користувачів розгортати власний шлюз і збільшувати охоплення та продуктивність ціла мережа.

Ця характеристика, однак, залишає місце для потенційних проблем, пов'язаних з тим, що ED в області, охопленій певним GW, може простіше спілкуватися з NS через GW іншої клітини через затінювання.

Таку поведінку можна розглядати як перевагу, оскільки дозволяється пристроям знаходити кілька GW, до яких доставляють свої пакети, і дозволяє уникнути тягаря процедур хендвера. З іншого боку, ця механіка може призвести до недоліків ГВ, які мають кращу експозицію.

Фактично, оскільки NS пересилає повідомлення DL через «найкращий» шлюз (тобто шлюз, який отримав повідомлення UL з найвищою потужністю), GW, розміщений у сприятливому положенні для покриття широкої території, може бути обтяжений зв'язком DL, який призначені для ED, які, по суті, ближчі до інших GW.

Така поведінка стає особливо актуальною у випадку передач із робочим циклом, які також застосовуються до GW.

Рішення цієї потенційної проблеми, звичайно, можна було б оцінити та порівняти через рамки, розроблені під час виконання роботи.

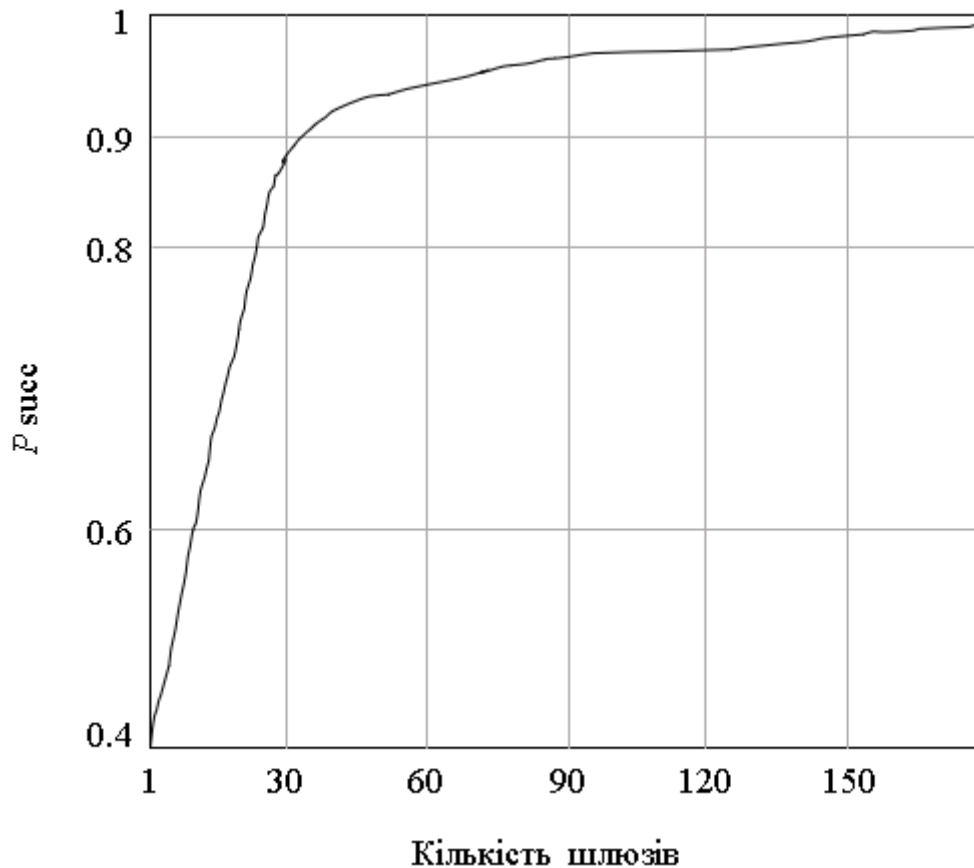


Рисунок 3.11 – Імовірність правильного отримання пакету на мережевому сервері як функція кількості шлюзів, що охоплюють кругову область радіусом 7,5 км

3.5 Висновок

В даному розділі представлено удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Удосконалений метод включає наступні кроки:

1. Створення топології: набір вузлів (тобто пристроїв).
2. Побудова моделі: на раніше створений набір вузлів встановлюється певний стек протоколів.
3. Побудова конфігурації: моделі протоколу налаштовуються на використання певних значень як своїх параметрів, а також створюються зв'язки між різними вузлами.
4. Запуск системи: запускається моделювання, і клас Simulator проходить через події та виконує відповідні виклики функцій.

5. Аналіз продуктивності: після зупинки моделювання зібрані дані можна проаналізувати та візуалізувати.

Результати роботи методу показали, що схема доступу LoRaWAN забезпечує більш високу пропускну здатність по відношенню до типової схеми на основі ALOHA, завдяки частковій ортогональності між її поширенням. факторів. Більш того, було доведено, що архітектура LoRaWAN добре масштабується, головним чином завдяки тому, що збільшення кількості шлюзів покращує охоплення і надійність висхідного зв'язку також. Застосування удосконаленого методу за участю мережі з декількома шлюзами і реалістичною моделлю трафіку демонструють успіх доставки пакетів вище 95% для шлюзу.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ЗА LORAWAN СТАНДАРТОМ

4.1 Реалізація стенду для симуляції мережі LoRa

З метою апробації ефективності розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом було здійснено ряд експериментальних досліджень.

З цією метою виконання мережевого моделювання системи LoRa було використано програмне забезпечення Network Simulator 3 (NS3) [39], пакет Discrete Event Simulation (DES) з відкритим кодом.

Симулятор був розширений завдяки створенню модуля `loga`, який реалізує різні моделі. Спочатку наводиться короткий вступ до програмного забезпечення NS3, а потім описується структура та впровадження нового модуля `loga`.

У той час як моделі, які є специфічними для мережі або протоколу, реалізуються в класах модуля, топологія і моделі, які мають використовуватися в конкретному моделюванні NS3, описуються за допомогою програми C++ або Python.

NS3 – це програмне забезпечення для моделювання мережі, призначене для дослідницького та освітнього використання, ліцензоване відповідно до загальної суспільної ліцензії GNU (GPL) та розроблене спільнотою користувачів [40].

Комбінуючи кілька об'єктів C++, причому кожен клас моделює певний аспект мережі, NS3 може детально моделювати складні мережі.

Класи, що моделюють пов'язані концепції або системи, згруповані в модулі: наприклад, модуль `wifi` містить кілька класів, які моделюють компоненти системи WiFi, такі як точки доступу, пристрої з підтримкою WiFi, рівень WiFi MAC і бездротовий канал.

Ці класи взаємопов'язані, і в поєднанні з деякими іншими модулями, які моделюють функціональність ядра, мобільність пристрою, поширення тощо, їх

можна використовувати для моделювання всієї мережі, що реалізує стандарт WiFi.

NS3 працює за принципом DES, що означає, що моделювання складається з серії подій, кожна з яких прив'язана до певного часу.

Завдання симулятора полягає в тому, щоб виконати ці події (тобто виконати відповідний виклик функції, пов'язаний з цією подією), які призводять до зміни стану моделювання і, можливо, до планування додаткових подій.

Прикладом події є передача пакету по бездротовому каналу: це представлено викликом функції з класу, що представляє рівень РНУ пристрою, до класу, що представляє канал, який, у свою чергу, планує подію, що представляє отримання пакет РНУ рівня іншого пристрою, можливо, після затримки каналу.

Після виконання події симулятор переходить у список подій для виконання наступного виклику функції.

Оскільки одна подія може запланувати кілька інших подій, не гарантується, що в якийсь момент моделювання завершиться.

У таких випадках може бути видана спеціальна подія зупинки для завершення моделювання.

Підхід NS3, орієнтований на події, гарантує, що, навіть якщо симуляція містить лише дві події, які заплановані далеко в часі одна від одної, симулятор виконуватиме їх одну за одною.

Такий підхід прискорює моделювання, зберігаючи при цьому реалістичність, оскільки між двома подіями не планувалося змін у стані системи.

NS3 також надає вбудований генератор псевдовипадкових чисел (PRNG), і забезпечує $1,8 \cdot 10^{19}$ незалежних потоків випадкових чисел, кожен з яких складається з $2,3 \cdot 10^{15}$ підпотоків.

Кожен підпотік має період $7,6 \cdot 10^{22}$: це означає, що період генератора становить $3,1 \cdot 10^{57}$.

Випадкові величини надаються як об'єкти, які звертаються до одного з незалежних потоків базового генератора випадкових чисел і виводять випадкові числа відповідно до певний розподіл, що описується набором параметрів.

Той факт, що кожній випадковій величині присвоюється інший потік PRNG, гарантує, що між різними випадковими величинами не буде енобхідної кореляції.

Також доступна система для виконання різних «прогонів» симуляції, що гарантує, що кожне повторення використовує окремий потік.

NS3 також має систему відстеження, яка використовується для моніторингу змінних під час моделювання та, за бажанням, ініціювання дії при виявленні зміни.

Ця система використовується для збору даних під час моделювання під час оптимізованих запусків, коли ведення журналу вимкнено, а дані не можуть бути зібрані за допомогою стандартного виводу програми.

Після створення класу `LoraChannel` і відповідних моделей втрат поширення, вузли, що представляють ED, створюються і призначаються рівномірно випадкове положення всередині кола радіуса r , використовуючи стандартний клас `NS3 UniformDiscPositionAllocator`.

Потім клас `LoraHelper` використовується для налаштування стеку LoRaWAN на кінцевих пристроях і для підключення їх до екземпляра каналу. Для всіх симуляцій, виконаних під час виконання роботи, підтвердження повідомлень було вимкнено: це має подвійний ефект: спрощення моделювання та надання деяких функцій, які прискорюють моделювання. ED попередньо налаштовані для того, щоб мати можливість спілкуватися в мережі, тому не потрібно виконувати будь-які процедури приєднання.

Потім створюються вузли шлюзу, розподіляються в шістнадцятковій сітці та налаштовуються для використання стеку LoRaWAN і розподілу шляхів прийому сигналу.

Функції зворотного виклику також підключаються до джерел трасування в коді для збору інформації про зміни в стані моделювання. І ED, і GW налаштовані на фіксовану позицію протягом усього моделювання.

На цьому етапі створюється набір будівель, який охоплює всю зону моделювання.

Будівлі розташовані у вигляді сітки прямокутників, де кожна будівля має розміри 130 на 64 м, а відстань між двома будинками 32 і 17 м для вулиць, що йдуть з півночі на південь, і зі сходу на захід відповідно.

Приклад макета будівлі можна побачити на рисунку 4.1, де будівлі представлені у вигляді сірих квадратів.

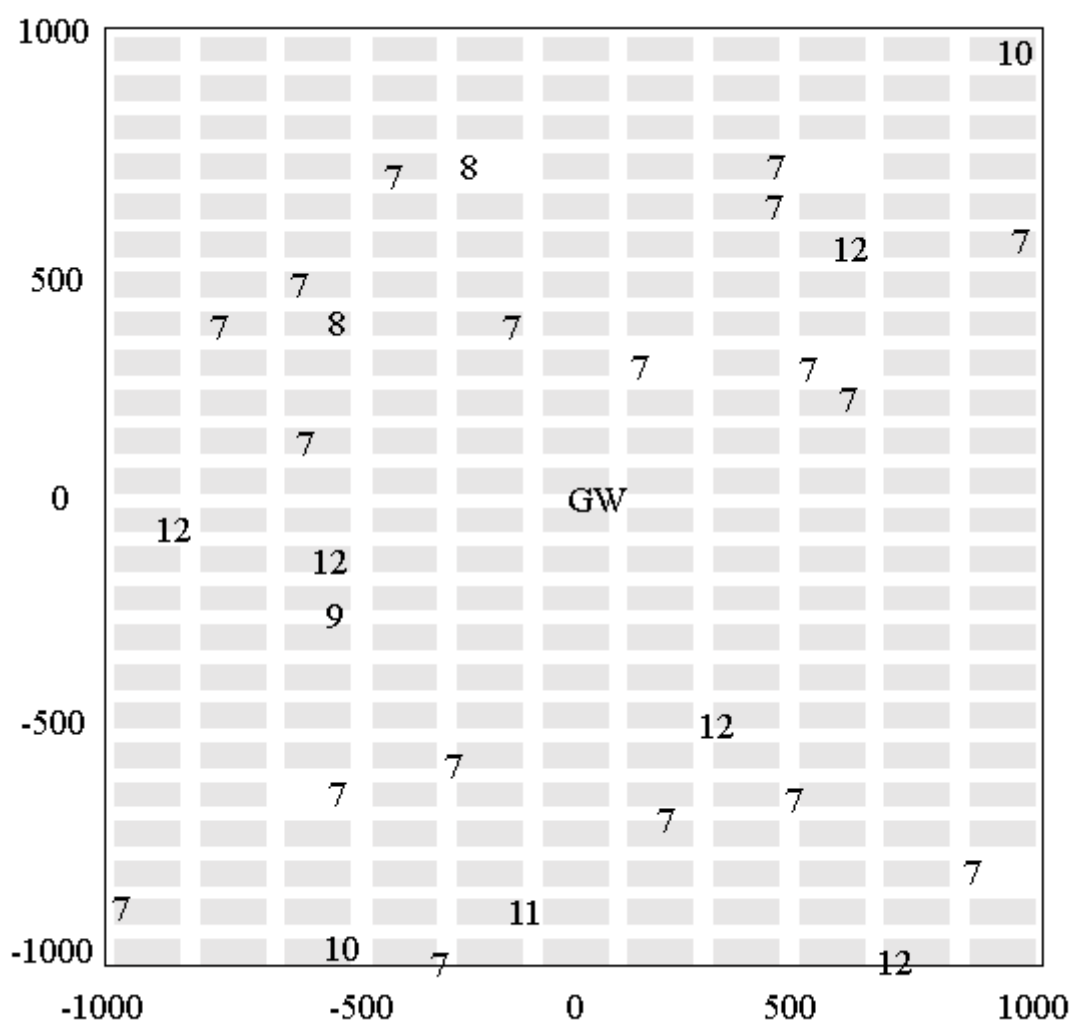


Рисунок 4.1 – Приклад випадкового розподілу вузлів навколо шлюзу

Після того, як будівлі були створені, модель втрат поширення готова до використання.

Ця інформація використовується для налаштування коефіцієнта розповсюдження кожного ED.

Після цього кроку можна виконати необов'язковий крок, який полягає в обрізанні пристроїв, які не можуть дістатися до шлюзу через сильну тінь і відстань.

В якості останнього кроку налаштування програми PeriodicSender встановлюються на кожному ED і налаштовуються на запуск і зупинку у фіксований час.

Нарешті, розпочинається моделювання, і після його завершення скрипт збирає результати зі своїх структур даних і зберігає їх у файлі або відображає їх як вихід програми.

4.2 Модуль lora

Щоб змоделювати поведінку LoRaWAN, був створений новий модуль lora. Цей модуль, по суті, являє собою набір класів, які працюють разом, щоб описати поведінку LoRa EDs і GWs на різних рівнях, від PHY до рівня програми.

Набір класів, необхідних для моделювання стеку протоколів на пристрої, подано в Додатку А на рисунку А.1.

На додаток до тих класів, що представляють шар у стеку (LoraPhy і LoraMac), деякі інші класи використовувалися для моделювання аспектів системи, таких як втрати, спричинені будівлями, корельована тінь, перешкоди та обмеження робочого циклу.

Робота, зосереджена на реалізації ED і GW, оскільки саме на цьому рівні використовується модуляція LoRa.

4.2.1 PeriodicSender

Клас прикладного рівня `PeriodicSender` складається з генератора пакетів, який створює заповнені нулем пакети рандомізованого розміру корисного навантаження.

Слід зазначити, що створення більш «реалістичного» вмісту корисного навантаження не вплине на результати моделювання, оскільки моделі посилянь не враховують вміст пакетів в абстракції посилянь.

Період передачі програми `m_interval` визначає затримку події «передати випадковий пакет», яка запланована відразу після передачі, і може бути встановлена як атрибут класу.

Необхідно зауважити, що на рівні програми передача просто означає, що пакет пересилається вниз на рівень LoRa MAC.

Оскільки виклик функції, який передає пакет, також планує наступну передачу, ця програма продовжуватиме надсилати пакети, поки не буде зупинена за допомогою виклику певної функції.

Коли програма вперше запускається на вузлі, випадкова затримка для першої події надсилання пакету вибирається через випадкову змінну $d \sim U([0, m_interval])$.

4.2.2 LoraMac

Клас `LoraMac` моделює рівень MAC пристрою LoRaWAN. Цей клас використовується для відстеження доступних мережевих каналів через об'єкт `LogicalLoraChannelHelper`, а також для врахування обмежень робочого циклу, які вимагаються нормативами: цей клас зобов'язаний не надсилати повідомлення, що надходять з верхнього рівня, якщо це означатиме порушення правила робочого циклу, а також поставити їх у чергу та надіслати у більш відповідний час.

Для того, щоб відстежувати різні робочі цикли на різних піддіапазонах і відокремити логіку робочого циклу від класу, був створений клас `DutyCycleHelper`.

Точніше, два підкласи `EndDeviceLoraMac` і `GatewayLoraMac` реалізують поведінку, характерну для ED і GW відповідно.

`EndDeviceLoraMac` – це об’єкт, де визначається клас пристрою і впливає на поведінку ED: оскільки цей клас контролює стан базового рівня PHY, він також повинен правильно обробляти вихід радіостанції зі сну, коли потрібно відкрити вікно прийому. відкритий, або для постійного прослуховування, коли потрібно впровадити клас C.

Хоча поточна реалізація підтримує лише пристрої класу A, реалізація інших способів поведінки в майбутніх ітераціях роботи буде простою, оскільки використовується спадковість для реалізації певної поведінки в підкласах.

Клас реалізує процедуру, за допомогою якої рівень MAC бере пакет із прикладного рівня і передається на нижній рівень PHY, а також показує, як випадковий канал вибирається ED для ініціації передачі.

Потім зберігає в черзі лише один пакет за раз, однак різні реалізації, де зберігається черга пакетів із затримкою, все ще можливі за ціною трохи більшої складності.

Клас `GatewayLoraMac` відрізняється від `EndDeviceLoraMac` тим, що він реалізує простіший рівень mac для прямих пересилань.

Ці класи також відповідають за інтерпретацію команд MAC, які або включені в поле `FOpts`, або містяться в `FRMPayload`, навіть якщо ці функції на даний момент не реалізовані.

Пакети LoRa з їх специфічною структурою були реалізовані як розширення базового класу пакетів.

4.2.3 LoraPhy

Клас `LoraPhy` моделює фізичний рівень пристрою Semtech LoRa. Зокрема, це клас, який моделює поведінку мікросхем LoRa SX1272 і SX1301 в ED і GW відповідно.

Коли пристрій має надіслати повідомлення, роль цього класу полягає в тому, щоб взяти пакет із рівня MAC і доставити його до класу каналу. Крім того, він вирішує, чи правильно прийнятий пакет, отриманий з каналу, на основі його потужності та перешкод, які відчуває пристрій.

Клас використовує атрибут `m_state`, що представляє стан мікросхеми, який може приймати одне з наступних значень:

- 1) TX при передачі пакета;
- 2) RC під час прийому вхідного пакета;
- 3) IDLE під час прослуховування вхідних пакетів;
- 4) SLEEP у режимі низького споживання енергії.

Кожен із наведених вище станів може бути пов'язаний з різним споживанням напруги та струму за допомогою моделі енергії, яка враховує енерговитрати пристрою та згодом може дати оцінку терміну служби акумулятора пристрою.

Незважаючи на те, що енергетична модель ще не була повністю інтегрована в симулятор, при розробці класів було приділено особливу увагу, тому поєднання моделей lora та енергії в майбутніх ітераціях цієї роботи буде тривіальним.

Розроблені класи `LoraMac`, `LoraPhy` також має два підкласи, `EndDeviceLoraPhy` і `GatewayLoraPhy`, які більш детально представляють рівні PHY ED і GW.

Обидві реалізації обчислюють перешкоди аналогічно, за допомогою класу `LoraInterferenceHelper`, який відстежує кожен сигнал, що надходить на пристрій, а потім використовує ці знання, щоб обчислити, чи був певний пакет порушений перешкодами.

Кроки, які виконує об'єкт `EndDeviceLoraPhy` щоразу, коли його повідомляє клас `LoraChannel` про те, що сигнал надходить до антени.

Перш за все, об'єкт виконує виклик `Add` до свого екземпляра `LoraInterferenceHelper`, так що помічник створить екземпляр класу `Event` для

представлення сигналу та додасть його до списку, який відстежує всі події (тобто пакети), який надійшов на цей пристрій.

Подія містить усю інформацію, необхідну для виконання обчислень перешкод, а саме часовий вікно, протягом якого пакет впливав на антену, його коефіцієнт поширення, отриману потужність та логічний канал, у який він був надісланий.

Після того, як пакет відстежується помічника перешкод, його потужність порівнюється з чутливістю пристрою до цього коефіцієнта розповсюдження, і подія закінчення прийому планується лише в тому випадку, якщо пристрій фактично здатний отримати пакет.

Крім того, описана вище процедура виконується тільки в тому випадку, якщо базовий РНУ знаходиться в стані IDLE: якщо пристрій перебуває в режимі сну, приймає або передає, прийом іншого пакету неможливий.

Слід зазначити, що навіть якщо сигнал знаходиться під чутливістю, подія все одно додається до списку перешкод, оскільки її все одно потрібно буде враховувати.

Це міркування також стосується стану пристрою: навіть якщо пристрій сплячий, сигнали, що надходять, все одно повинні бути зареєстровані, оскільки вони стануть впливовими, якщо пристрій прокинеться і почне слухати до закінчення сигналу.

Екземпляр `LoraInterferenceHelper EndDeviceLoraPhy` запитується, щоб з'ясувати, чи був поточний пакет знищений перешкодами чи ні.

На основі результату виклику цієї функції пристрій або пересилає правильно отриманий пакет до стека, або ні, перш ніж перейти в режим сну в будь-якому випадку.

Процедуру, яка використовується для визначення того, чи зазнає пакет фатальних перешкод від інших сигналів, можна дізнатися таки чином: набір сигналів перешкод групується відповідно до коефіцієнта поширення, потім для кожного SF сукупна енергія перешкод обчислюється як сума енергії від кожного сигналу.

Енергія одержується як добуток отриманої потужності та часу перекриття з передбачуваним сигналом.

Реалізація класу `GatewayLoraPhy` дещо складніша, ніж `EndDeviceLoraPhy`, оскільки необхідно реалізувати декілька шляхів прийому.

Для цього клас `GatewayLoraPhy` містить у якості змінної-члена список об'єктів `ReceptionPath`.

Цей клас представляє шлях прийому: його змінні вказують, чи отримує він подію та канал, який він прослуховує.

Коли метод `StartReceive` `GatewayLoraPhy` викликається `LoraChannel`, але може бути виконана, лише якщо список шляхів прийому містить екземпляр `ReceptionPath`, який є вільним і прослуховує канал вхідного пакету.

Якщо передача, що надходить, перевищує чутливість, шлях прийому позначається як зайнятий і пов'язується з `Event`, що представляє отриманий сигнал.

Аналогічно, процедура `EndReceive` містить деякі додаткові кроки для звільнення шляху прийому, який був пов'язаний з вхідною передачею.

Класи `LoraPhy` також є місцем, де застосовуються теги пакетів. У NS3 тег пакета – це настроювана структура даних, яка містить певну інформацію про пакет і яку можна приєднати до нього.

Точніше, у випадку цієї дипломної роботи був створений клас `LoraTag`. Цей тег створений для того, щоб містити інформацію про фактор поширення, який використовується пакетом, і, у випадку, коли пакет знищено через перешкоди, про фактор поширення, який спричинив втрату.

Таким чином, щоразу, коли пакет втрачається на рівні РНУ через перешкоди, тег пакета змінюється, щоб сценарій моделювання знав, що сталося з кожним окремим пакетом у симуляції.

4.2.4 `LoraChannel`

Клас `LoraChannel` моделює бездротовий канал, який спільно використовують усі пристрої в LoRaWAN: цей клас відповідає за прийняття пакетів, які рівень РНУ хоче передати, і доставку їх до набору об'єктів `LoraPhy` з потужністю прийому, яка обчислюється відповідно до моделі вимірювання зв'язку.

Під час фази конфігурації об'єкти `LoraPhy` «додаються» до об'єкта каналу, який реєструє їх у списку. Клас `LoraChannel` дозволяє взаємоз'єднання між зареєстрованими РНУ двома методами: `Send` і `Receive`.

Коли РНУ повинен надіслати повідомлення в каналі, він може зробити це, викликавши функцію `Send` з такими параметрами, як коефіцієнт поширення повідомлення, сам пакет РНУ-рівень, тривалість, потужність передачі та номер каналу.

Після виклику цього методу канал проходить через список РНУ і планує подію `Receive` для тих вузлів, які зареєстровані як прослуховують цей канал зв'язку.

Щоб визначити час, на який планувати дану подію `Receive`, канал використовує `PropagationDelayModel`, абстрактний клас NS3 за замовчуванням, який, враховуючи `MobilityModel` (тобто, положення) передавача і приймача, може обчислити затримку відповідно до різних моделі.

Під час виконання роботи використовувалася модель затримки `ConstantSpeedPropagationDelayModel`, яка просто обчислює час польоту з урахуванням відстані між двома пристроями.

Подія `Receive` планується з набором параметрів, які цільовий РНУ повинен знати для виконання набору викликів функцій: тривалість сигналу, коефіцієнт розширення, канал і потужність у місці приймача.

Цей останній параметр обчислюється `LoraChannel`, вдаючись до `PropagationLossModel`, об'єкта, який обчислює втрату потужності на основі потужності передачі та розташування передавача та приймача. `PropagationLossModel`, що використовується в моделюванні, складається з конкатенації трьох моделей втрат, описаних у наступних параграфах.

Перша модель представлена класом `LogDistancePropagationLossModel`, який обчислює втрати зовнішнього шляху.

Ця модель доступна за замовчуванням в NS3, і її потрібно лише налаштувати для використання відповідних параметрів.

`CorrelatedShadowingPropagationLossModel` складається з класу, який реалізує корельовану тінь.

Клас працює шляхом поділу змодельованого двовимірного простору в сітці.

Кожного разу, коли до класу надходить запит на обчислення затінення для передачі, що йде від точки *a* до точки *b*, він перевіряє, чи вже квадрат сітки, що містить позицію *a*, має пов'язану з ним карту затінювання.

Якщо карта затінювання не знайдена, створюється новий об'єкт `ShadowingMap`, що складається з порожньої сітки значень.

Цей об'єкт, таким чином, запитується, щоб знайти затінення в заданій позиції *b*.

Екземпляр `ShadowingMap` обчислює положення чотирьох вершин сітки навколо *b* і, якщо для цих точок ще не було створено жодних значень, він генерує значення тіні для цих позицій відповідно до звичайної випадкової величини з відповідною дисперсією. Після цього кроку значення затінення для точки *b* інтерполюється відповідно до процедури.

Нарешті, модель `BuildingPenetrationLoss` є користувацьким класом, який реалізує втрати будівлі відповідно до [41-45], використовуючи структури даних про будівлі, отримані за допомогою класу побудованого `BuildingsHelper` за замовчуванням.

`BuildingsHelper` – це об'єкт, який містить карту всіх будівель, створених під час симуляції, а потім може прикріпити до вузла інформацію про те, всередині будівлі чи за її межами та на якому поверсі, на основі списку будівель і вузла. позиція.

Ця інформація потім використовується класом `BuildingPenetrationLoss` для визначення втрат, які зазнає передача через будівлі.

Втрати при передачі між парою (a, b) пристроїв обчислюються як сума трьох компонентів, підраховуючи внески обох пристроїв: якщо a і b обидва знаходяться в приміщенні, загальні втрати вважатимуться рівними сумі двох втрат на зовнішній стіні, двох втрат на проникнення всередину стіни і двох прибутків через висоту підлоги.

Однією великою перевагою використання симулятора, такого як NS3, є те, що кожна з цих трьох моделей втрат можна вимкнути або замінити іншою надзвичайно простим способом.

Це також полегшує оцінку та порівняння багатьох різних моделей поширення, оскільки багато класичних моделей вже реалізовані в NS3 за замовчуванням.

Після обчислення загальної втрати для даного посилання планується подія Receive, яка просто полягає у виклику методу StartReceive екземпляра LoraPhy з відповідними параметрами.

Під час моделювання створюється лише один екземпляр класу LoraChannel, і всі пристрої РНУ підключаються до нього.

Важливо зауважити, що LoraChannel абсолютно не знає про такі проблеми, як чутливість і перешкоди: його єдине завдання – обчислити отриману потужність і затримку в місці розташування кожного іншого пристрою в мережі, враховуючи потужність передачі та положення передавача.

Щоб прискорити моделювання з використанням вузлів, які охоплюють дуже велику площу, можна ввести поріг потужності, щоб кожна передача, яка надходить нижче цього порогового значення, навіть не доставлялася на рівень РНУ.

Крім цього, спосіб значно скоротити час обчислень, необхідний для моделювання мереж лише UL, полягає в тому, щоб перевірити, чи є пристрій РНУ, на який канал доставляє повідомлення, ED або GW, і виконує лише необхідні обчислення для отриману потужність і заплануйте подію прийому, якщо РНУ прийому є GW.

4.2.5 LoraNetDevice

Клас `LoraNetDevice` моделює «мережеву карту LoRa»: цей `NetDevice` можна приєднати до вузла, чії програми потім можуть використовувати картку для надсилання даних на інші пристрої LoRa. `LoraNetDevice`, по суті, використовується для утримання разом усіх об'єктів LoRa, які потрібно об'єднати у вузол: `LoraPhy` та `LoraMac`.

Необхідно звернути увагу на абстрактний клас `NetDevice` та його орієнтацію на IP-зв'язок.

У документації API `LrWpanNetDevice` зазначено, що «`ns3::NetDevice` включає специфічний для IP API, такий як методи `GetMulticast`, `Send` і `SendTo`, які погано відображають примітив 802.15.4 MAC MCPS `DataRequest`.

Отже, основний дизайн полягає в тому, щоб забезпечити, наскільки це має сенс, API класу `ns3::NetDevice`, але покладатися на те, що користувач отримує доступ до покажчика `LrWpanMac`, щоб здійснювати виклики API, специфічні для 802.15.4».

Аналогічно, модуль `lora` використовує `NetDevice` як інкапсулюючий клас і використовує лише загальну версію `Send`, яка адаптована для обробки базового рівня MAC. Не надається підтримка таких концепцій, як багатоадресні адреси та адреси IPv6.

4.2.6 Інші класи системи

Набір додаткових класів був написаний для того, щоб керувати моделюванням легше.

`HexGridPositionAllocator` – це клас, який можна використовувати для обчислення позицій шлюзів, щоб вони розміщувалися в макеті гексагональної сітки.

Клас працює, розподіляючи перший шлюз у центрі простору моделювання, а потім створюючи «кільця» навколо центрального шлюзу, дотримуючись бажаного шаблону гексагональної сітки.

Отримане розташування показано на рисунку 4.2, де в центрі кожного шестикутника розміщено шлюз. Враховуючи гексагональну сітку з кількістю кілець, можемо обчислити загальну кількість N шлюзів, за такою формулою [46]:

$$N = 3n^2 - 3n_r + 1. \quad (4.1)$$

Допоміжний клас під назвою `LogicalLoraChannelHelper` був створений для переміщення логіки керування каналом за межі реалізацій `LoraMac`.

Цей клас містить список отриманих об'єктів `LogicalLoraChannel`, кожен з яких характеризується власною частотою, пропускну здатністю та номером заданого каналу.

Передбачається, що цей клас буде використовуватися для керування каналами, доступними для зв'язку, а також для додавання та видалення їх у відповідь на відповідні команди MAC у майбутній ітерації.

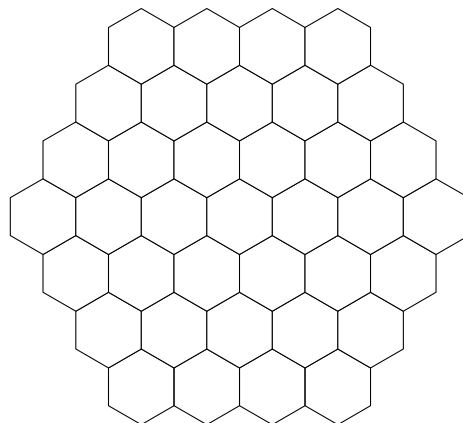


Рисунок 4.2 – Шестикутна сітка, створена за допомогою `HexGridPositionAllocator` [47]

`LoraMacHeader` і `LoraFrameHeader` – це підкласи класу `Header`, який використовується для представлення заголовка `Packet`.

Ці класи підтримують серіалізацію та десеріалізацію ряду полів, які залежать від протоколу.

Хоча в поточній ітерації цієї дипломної роботи заголовки заповнюються нулем, щоб зменшити складність системи, у наступних ітераціях вони будуть використовуватися для передачі команд MAC, стандартного основного номера версії, адрес та іншої інформації.

4.3 Помічники та тести

Крім основних будівельних блоків, описаних вище, для полегшення налаштування мережі LoRa було реалізовано набір допоміжних розроблених класів.

Помічник (хелпер) – це елемент дизайну NS3, призначений для допомоги розробникам сценаріїв у налаштуванні топологій і вузлів, які повністю налаштовані для використання потрібного модуля [48].

Щоразу, коли створюється екземпляр програми `PeriodicSender`, його період має бути встановлений.

Щоб спростити правильну конфігурацію багатьох із цих класів, програми можна розгорнути на наборі вузлів за допомогою розробленого класу `PeriodicSenderHelper`.

Цей помічник визначає звітний період вузла відповідно до специфікації [49-50], щоб дотримуватись відповідного розподілу періодів між вузлами.

Потім був написаний інший набір помічників, щоб належним чином встановити та налаштувати стек LoRa відразу на заданому наборі вузлів: класи `LoraHelper`, `LoraPhyHelper` і `LoraMacHelper` були розроблені для синергії для створення та розгортання об'єктів `LoraNetDevice`, `LoraMac` і `LoraPhy` на широкий набір вузлів, щоб переконатися, що рівні налаштовані для належного зв'язку один з одним і що рівні PHY правильно під'єднані до екземпляра `LoraChannel`, який вони спільно використовують.

Крім того, разом із модулем був написаний набір тестів, щоб забезпечити коректність програмного забезпечення після кожного оновлення та відповідність рекомендаціям NS3.

Елементарна доставка повідомлень перевіряється, щоб переконатися, що рівень РНУ на кінцевому пристрої здатний отримати повідомлення від пристрою в межах досяжності.

Тести поділу каналів переконуються, що пристрій, який прослуховує канал i , не отримає повідомлення, надіслані в каналі j , коли $i \neq j$.

Перевірка перешкод перевіряє, що пакет може бути знищений перешкодою з достатньо високою потужністю.

Крім того, вони також перевіряють, що комунікації по різних каналах не заважають.

Нарешті, тести потужності паралельного декодування шлюзу гарантують, що шлюз може отримувати до 8 і не більше 8 повідомлень паралельно.

4.4 Результати роботи

Аналізуючи різні показники, отримані завдяки модулю lora, доданому до NS3.

Перш за все, оцінюються деякі результати щодо продуктивності споектованої мережі.

Потім налаштовується мережа з реалістично змодельованим середовищем і моделлю трафіку, щоб оцінити ймовірність втрати пакета в LoRaWAN.

Потім були проведені деякі експерименти, щоб оцінити ефективність кожного окремого коефіцієнта розповсюдження на перешкоди, а також те, як швидкість успішності пакетів змінюється з коефіцієнтом поширення.

Нарешті, були проведені деякі тести покриття в реалістичних умовах, щоб оцінити щільність шлюзу, яка необхідна для покриття міста з глибокою тінню від будівель (Додаток Б, рисунок Б.1).

4.5 Висновки

В розділі представлено програмно-апаратну реалізацію розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом було здійснено ряд експериментальних досліджень.

З цією метою виконання мережевого моделювання системи LoRa було використано програмне забезпечення Network Simulator 3 (NS3), пакет Discrete Event Simulation (DES) з відкритим кодом.

Симулятор був розширений завдяки створенню модуля lora, який реалізує різні моделі.

Спочатку наводиться короткий вступ до програмного забезпечення NS3, а потім описується структура та впровадження нового модуля lora.

Експериментальні дослідження спроектованої мережі lora шляхом програмно-апаратної реалізації удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом показали в цілому оптимізацію взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, зокрема, успіх доставки пакетів вище 95% для шлюзу.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз та дослідження технологій Інтернету речей, зокрема, LPWAN, LoRa, виокремлено вимоги до IoT. В розділі було досліджено найпопулярніші рішення щодо проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей, їх продуктивність та здатності до масштабування, було виявлено переваги та недолік. В розділі також було зроблено огляд технологій IoT, зокрема, рішень для підключення до Інтернету речей: низькошвидкісні бездротові персональні мережі, стільниковий Інтернет речей, глобальні мережі малої потужності. В розділі було розглянуто основні аспекти функціонування IoT, а саме: модуляція LoRa, реалізація LoRa, пакети фізичного рівня LoRa, основні мікросхеми Semtech і незалежні реалізації. Також в розділі було досліджено принцип роботи стандарту LoRaWAN, зокрема: топологія та класи пристроїв, структура пакетів і команди MAC, шифрування та активація пристрою та діапазони частот. Було зроблено висновок, що задача проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом є на сьогодні надзвичайно актуальною, та про необхідність розроблення удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

В другому розділі представлено моделі різних компонентів системи LoRaWAN. Зокрема подано основні моделі перешкод, моделі трафіку та поширення сингалів. Також в розділі було представлено моделювання таких аспектів функціонування мережі LoRa, як: аналіз модуляції та поширення, модель вимірювання зв'язку, модель втрат при поширенні, моделювання втрат проникнення в будівлю, корельованого затінення, модель продуктивності зв'язку, дослідження чутливість приймача, перешкоди, модель шлюзу.

У третьому розділі представлено удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Удосконалений метод включає наступні кроки:

1. Створення топології: набір вузлів (тобто пристроїв).

2. Побудова моделі: на раніше створений набір вузлів встановлюється певний стек протоколів.

3. Побудова конфігурації: моделі протоколу налаштовуються на використання певних значень як своїх параметрів, а також створюються зв'язки між різними вузлами.

4. Запуск системи: запускається моделювання, і клас Simulator проходить через події та виконує відповідні виклики функцій.

5. Аналіз продуктивності: після зупинки моделювання зібрані дані можна проаналізувати та візуалізувати.

Результати роботи методу показали, що схема доступу LoRaWAN забезпечує більш високу пропускну здатність по відношенню до типової схеми на основі ALOHA, завдяки частковій ортогональності між її поширенням факторів. Більш того, було доведено, що архітектура LoRaWAN добре масштабується, головним чином завдяки тому, що збільшення кількості шлюзів покращує охоплення і надійність висхідного зв'язку також.

В четвертому розділі представлено програмно-апаратну реалізацію розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом було здійснено ряд експериментальних досліджень. З цією метою виконання мережевого моделювання системи LoRa було використано програмне забезпечення Network Simulator 3 (NS3), пакет Discrete Event Simulation (DES) з відкритим кодом. Симулятор був розширений завдяки створенню модуля lora, який реалізує різні моделі. Спочатку наводиться короткий вступ до програмного забезпечення NS3, а потім описується структура та впровадження нового модуля lora. Експериментальні дослідження спроектованої мережі lora шляхом програмно-апаратної реалізації удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом показали в цілому оптимізацію взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, зокрема, успіх доставки пакетів вище 95% для шлюзу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Воробйов В. С., Бармак О. В. Дослідження аспектів проектування та оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за стандартом LoRaWAN. *Збірник наукових праць XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021»*. Хмельницький, 2021. с. 15-16.
2. P. Chaudhari, A. K. Tiwari, S. Pattewar and S. N. Shelke. Smart Infrastructure Monitoring using LoRaWAN Technology. *International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSCAN53069.2021.9526490.
3. S. E. Efimov, N. V. Stepanov and A. M. Turlikov. Research LoRaWAN Collide Signals with Used SDR, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470748.
4. A. Xanthopoulos, A. Valkanis, G. Beletsioti, G. I. Papadimitriou and P. Nicopolitidis. "On the Use of Backoff Algorithms in Slotted ALOHA LoRaWAN Networks," *2020 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/CITS49457.2020.9232577.
5. H. E. Elbsir, M. Kassab, S. Bhiri and M. H. Bedoui, "Evaluation of LoRaWAN Class B efficiency for downlink traffic. *16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2020, pp. 105-110, doi: 10.1109/WiMob50308.2020.9253405.
6. A. I. Petrariu, A. Lavric and E. Coca, LoRaWAN Gateway: Design, Implementation and Testing in Real Environment. *IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2019, pp. 49-53, doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990791.
7. Y. Jeon and Y. Kang. Implementation of a LoRaWAN protocol processing module on an embedded device using Secure Element. *34th International Technical*

Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/ITC-CSCC.2019.8793333.

8. F. L. de Almeida, M. Barros de Almeida and A. Petronio. Análise experimental e melhorias de desempenho de junção à rede via OTAA através de estratégias de ciclo útil em redes LoRAWAN, *14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2021, pp. 324-331, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529921.

9. X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang, P. Chatzimisios. Low power wide area machine- to-machine networks: key techniques and prototype. *IEEE Communications Magazine*. 2015. vol. 53. no. 9. pp. 64–71.

10. LoRa-Alliance, LoRa AllianceOR FAQs is there really a need for lpwan. URL: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>. (дата звернення: 25.04.2022).

11. R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Vin~as, M.-D. Cano, A. F. Skarmeta. Performance evaluation of lora considering scenario conditions. *Sensors*. 2018. vol. 18. no. 3. p. 772.

12. R. Sanchez-Iborra and M.-D. Cano. State of the art in lp-wan solutions for industrial iot services. *Sensors*. 2016. vol. 16. no. 5. p. 708.

13. F. C. Commission. Fcc regulations: 2013. Cfr 47. part 15.247 operation within the bands 902–928 mhz, 10–1–13 Edition). URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2013-title47-vol1/pdf/CFR-2013title47-vol1-sec15-247.pdf>. (дата звернення: 25.04.2022).

14. K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*. 2019. vol. 5. no. 1. pp. 1–7.

15. IoT Analytics iot connectivity. URL: <https://iot-analytics.com/iot-segments/iot-connectivity>. (дата звернення: 25.04.2022).

16. LoRa-Alliance, LoRa Alliance about the lorawan specification. URL: <https://LoRa-alliance.org/LoRawan-for-developers>. (дата звернення: 25.04.2022).

17. LoRa-Alliance, LoRa Alliance about lora alliance. URL: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>. (дата звернення: 25.04.2022).

18. LoRa-Alliance. A technical overview of lora and lorawan. *White paper*. 2015. URL: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawan>. (дата звернення: 25.04.2022).
19. R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. *Ict Express*. 2017. vol. 3. no. 1. pp. 14–21.
20. S. Corporation, Sx1272/3/6/7/8: Lora modem. *Designer's Guide AN1200.13*. 2013. URL: <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRa%20Design%20Guide.pdf>. (дата звернення: 25.04.2022).
21. LoRa / LoRaWAN Tutorial 16 snr limit receiver sensitivity. URL: https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part16.pdf. (дата звернення: 25.04.2022).
22. Semtech-Corporation. *Lora modulation basics*, AN1200.22. 2015.
23. Leverage - LPWAN White Paper link budget. Dec 2016. URL: <https://www.leverage.com/research-papers/lpwan-white-paper>. (дата звернення: 25.04.2022).
24. SmartMakers GmbH lorawan-range. part 1: The most important factors for a good lorawan radio range. URL: <https://smartmakers.io/en/>.
25. URL: [lorawan-range-part-1-the-most-important-factors-for-a-good-lorawan-signal-range/](https://smartmakers.io/en/lorawan-range-part-1-the-most-important-factors-for-a-good-lorawan-signal-range/). (дата звернення: 25.04.2022).
26. LoRa-Alliance. Lorawan security full end-to-end encryption for iot application providers. *White Paper*. 2017. URL: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-security-whitepaper>, (дата звернення: 25.04.2022).
27. Semtech - LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview lorawan network elements: Security. URL: <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>. (дата звернення: 25.04.2022).
28. A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, N. Strachan. Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks. *IEEE SENSORS*. 2016. pp. 1–3.
29. J. Navarro-Ortiz, S. Sendra, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler.

Integration of lorawan and 4g/5g for the industrial internet of things. *IEEE Communications Magazine*. 2018. vol. 56. no. 2. pp. 60–67.

30. A. Lavric and V. Popa. Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: a survey. *IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. 2017. pp. 1–5.

31. R. Parada, D. Ca´rdenes-Tacoronte, C. Monzo, and J. Melia`-Segu´1. Internet of things area coverage analyzer (ithaca) for complex topographical scenarios. *Symmetry*. 2017. vol. 9. no. 10. p. 237.

32. G. Callebaut and L. Van der Perre. Characterization of lora point-to-point path-loss: Mea- surement campaigns and modeling considering censored data. *IEEE Internet of Things Jour- nal*. 2019.

33. R. El Chall, S. Lahoud, and M. El Helou. Lorawan network: radio propagation models and performance evaluation in various environments in lebanon. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. vol. 6. no. 2. pp. 2366–2378.

34. Dragino Products lora iot development kit. URL: <https://www.dragino.com/products/LoRa/item/120-LoRa-iot-kit.html>. (дата звернення: 25.04.2022).

35. Adeunis Wireless Products and Solutions iot sensors fdt network tester. URL: <https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-network-tester/>. (дата звернення: 25.04.2022).

36. Dragino compare list for dragino lora gateway. URL: https://www.dragino.com/downloads/index.php?dir=LoRa_Gateway/. (дата звернення: 25.04.2022).

37. Semtech-Corporation. Lora and lorawan: A technical overview. *Technical Paper*. 2019.

38. CloudRF radio planning tool. URL: <https://cloudrf.com/>. (дата звернення: 25.04.2022).

39. Semtech what is lora?. URL: <https://lora-developers.semtech.com/get-started/what-is-lora/>. (дата звернення: 25.04.2022).

40. Semtech SX1276 products wireless rf. URL:

<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>. (дата звернення: 25.04.2022).

41. Semtech SX1301 products wireless rf. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-gateways/sx1301>. (дата звернення: 25.04.2022).

42. LoRa-Alliance. Lorawan 1.1 specification, technical specification. 2017. URL: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11>. (дата звернення: 25.04.2022).

43. LoRa Overview cayenne docs. URL: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora>. (дата звернення: 25.04.2022).

44. R. Wenner. LoRa CHIRP Spread Spectrum lora chirp. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dxYY097QNs0>. (дата звернення: 25.04.2022).

45. M. Knight. Decoding LoRa exploring next-generation wireless networks. URL: https://github.com/matt-knight/research/tree/master/2016_12_29_ccc-33c3. (дата звернення: 25.04.2022).

46. Qoitech. How Spreading Factor affects LoRaWAN device battery life the things conference partner. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/article/how-spreading-factor-affects-lorawan-device-battery-life>. (дата звернення: 25.04.2022).

47. ETSI. Etsi tr 103 526: Technical characteristics for low power wide area networks chirp spread spectrum (lpwan-css). *ETSI Technical Report*. 2018.

48. Federal Communications Commission what we do. URL: <https://www.fcc.gov/about-fcc/what-we-do>, Jul 2017. (дата звернення: 25.04.2022).

49. LoRa-Alliance, Rp002-1.0.0 lorawan regional parameters, Regional Parameters, 2010. URL: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2019-11/rp_2-1.0.0_final_release.pdf. (дата звернення: 25.04.2022).

50. L. Maziero et al. Monitoring of Electric Parameters in the Federal University of Santa Maria Using LoRaWAN Technology. *PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895425.

Додаток А

(обов'язковий)

Набір класів, необхідних для моделювання стеку протоколів на пристрої

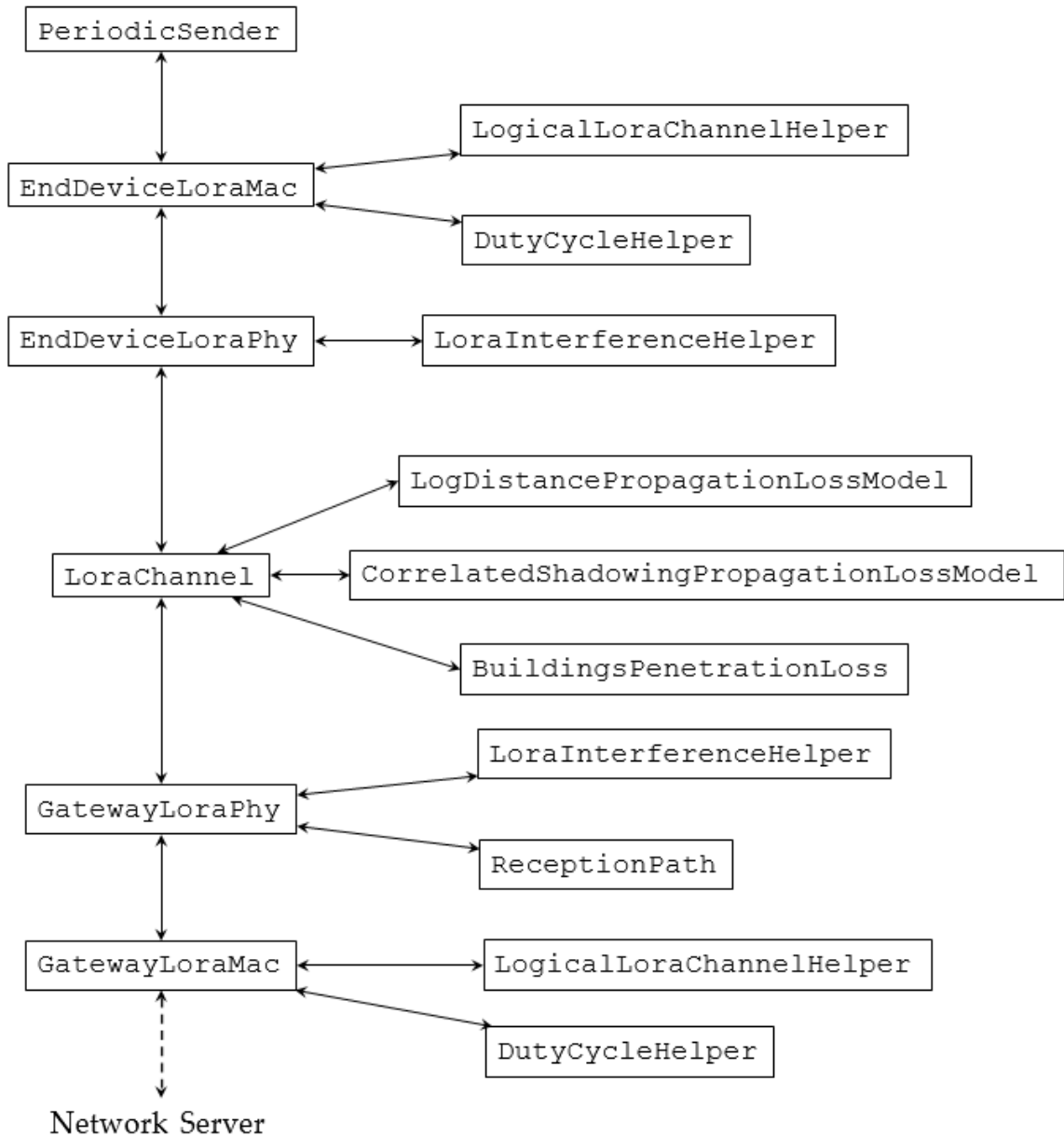


Рисунок А.1 – Стэк LoRaWAN, як він був представлений у модулі lora

Додаток Б
(обов'язковий)

Розподіл факторів розповсюдження для різних моделей поширення

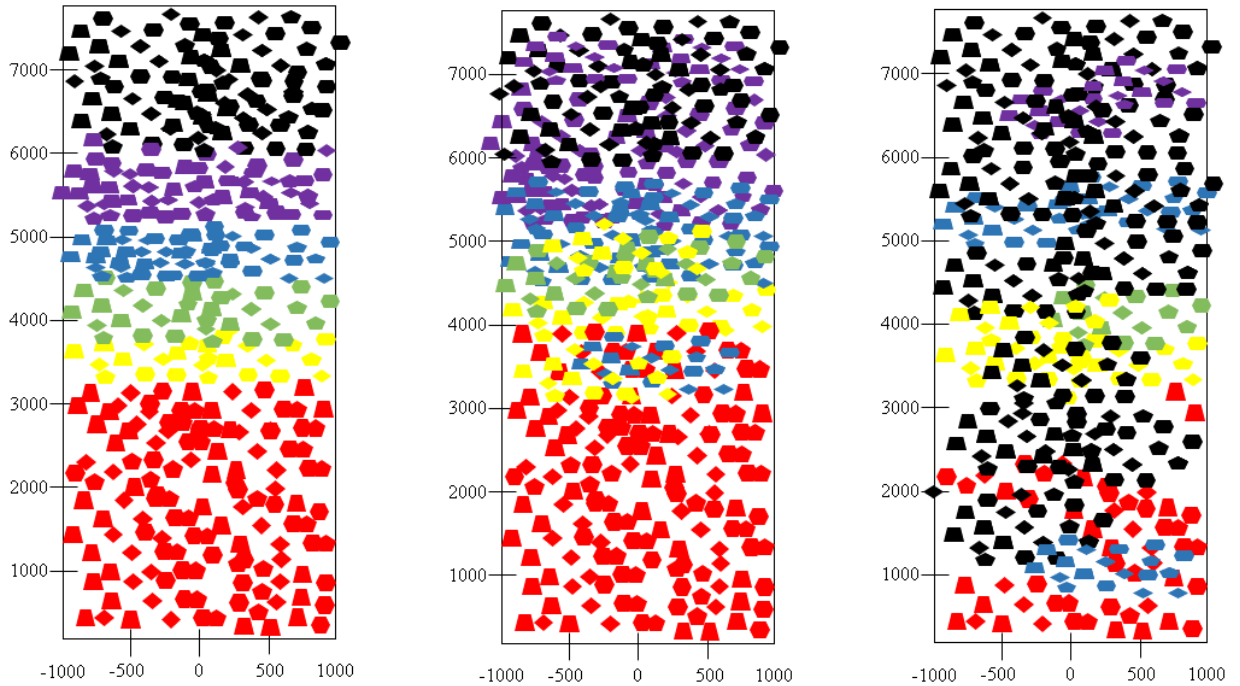


Рисунок Б.1 – Розподіл факторів розповсюдження для різних моделей поширення:

- а) звичайне поширення сигналу;
- б) поширення сигналу із затінюванням;
- в) поширення сигналу із затінюванням та перешкодами, спричиненими будівлями

Додаток В**(обов'язковий)**

Копія тез доповіді на Всеукраїнській науково-практичній конференції Актуальні
Проблеми Комп'ютерних Наук (АПКН-2021)

УДК 004.7.056.5

Воробйов В. С., Бармак О. В.

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АСПЕКТІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ЗА СТАНДАРТОМ LORAWAN

Розглянуто аспекти проектування компонентів інтернету речей. Розглянуто тришарову структуру IoT. Окреслено ключові задачі, які необхідно вирішувати щодо застосування IoT: масштабованість вартість пристрою обчислювальна потужність пристрою термін служби акумулятора пристрою покриття в приміщенні. Означено тришарову структуру IoT. Представлено аспекти продуктивності пристроїв Інтернету речей. Здійснено висновок щодо застосовності стандарту широкополосну мережі низької потужності (LPWAN) LoRaWAN для вирішення задачі проектування компонентів інтернету речей.

Aspects of designing components of the Internet of Things are considered. The three-layer structure of IoT is considered. The key tasks that need to be addressed regarding the use of IoT are outlined: scalability of the cost of the device computing power of the device battery life of the coating device in the room. The three-layer structure of IoT is indicated. Aspects of productivity of the Internet of Things devices are presented. The conclusion on the applicability of the standard of low-power broadband network (LPWAN) LoRaWAN to solve the problem of designing the components of the Internet of Things.

Все більше повсякденних об'єктів підключається до Інтернету, поступово будуючи майбутнє, описане парадигмою Інтернету речей (IoT) [1]. Очікується, що ринок розумних пристроїв значно зросте і за оцінками до 2022 року 20 млрд. IoT-пристроїв або більше будуть активними, а отже, прогнозований щорічний економічний вплив становитиме від 2,7 трильйонів до 6,2 трильйонів доларів до 2025 року [2]. Сфери застосування цієї нової парадигми зв'язку та збору даних включають сфери охорони здоров'я, транспорту, розумних будинків, сільського господарства, виробництва та управління міською інфраструктурою. Також очікується, що охорона здоров'я та виробництво будуть домінуючими ринками [3-9]. Існують різні архітектури, які намагаються представити, як працюватимуть пристрої IoT. Однак найпростішу модель можна визначити у стеку, що складається з трьох компонентів, кожен з яких відповідає різним завданням високого рівня: (1) рівень збору дані множиною давачі, та множина механізмів керування; (2) мережевий рівень, який з'єднує пристрої, щоб вони мали змогу обмінюватися

інформацією між собою або з централізованим сховищем даних; (3) прикладний рівень, який полягає у зберіганні, інтерпретації та використанні зібраних даних.

Тришарова структура IoT. Сценарій IoT ставить перед собою деякі ключові задачі, які необхідно вирішувати, що працює на мережевому рівні:

- 1) масштабованість: прогнозується, що щільність пристроїв становитиме близько 60000 пристроїв на км² [3]. Мережам IoT потрібно буде підтримувати модуляції та схеми доступу до середнього рівня, які дозволяють створити таке густонаселене бездротове середовище, та динамічно адаптувати параметри мережі для досягнення максимальної ефективності в умовах частого перевантаження мережі та зіткнення пакетів;
- 2) вартість пристрою: радіочіпи повинні бути максимально дешевими, щоб допомогти постачальникам завоювати перевагу на ринку за рахунок зниження ціни на пристрій. Вартість підписки на доступ до мережі також повинна бути якомога нижчою;
- 3) термін служби акумулятора пристрою: більшість пристроїв IoT працюватимуть від батарейок, і необхідна тривала автономність, щоб скоротити витрати на обслуговування мережі. Загальноприйнята цільова цифра для тривалості роботи акумулятора зондувального та звітного пристрою становить від 5 до 10 років на 2 батарейках типу AA, залежно від частоти передачі;
- 4) обчислювальна потужність пристрою: очікується, що пристрої IoT матимуть найпростіші процесори. Це обмеження обмежує складність мережеских протоколів та модуляцій, які необхідно використовувати цим пристроям.
- 5) глибоке покриття в приміщенні: очікується, що пристрої зможуть спілкуватися навіть у разі сильного затінення. Це стосується особливо критичних додатків, де вимоги щодо швидкості успішної доставки повідомлень будуть дуже жорсткими.

Незважаючи на те, що вищезазначені вимоги мають бути виконані, наступні два аспекти не вважаються вирішальними для продуктивності пристроїв Інтернету речей:

- 1) пропускна здатність: пристрої IoT не повинні підтримувати високу пропускну здатність. Натомість очікується, що дані будуть надаватися нечасто і в невеликих кількостях.
- 2) постійне з'єднання: переважна більшість пристроїв IoT не вимагатиме постійної активності. Це, наприклад, залишає місце для мережевого протоколу використовувати режим сну пристрою, щоб зменшити споживання акумулятора за рахунок затримки передачі.

Для вирішення задачі проектування компонентів інтернету речей можливим мережевим протоколом IoT може бути обрано широкополосні мережі низької потужності (LPWAN) LoRaWAN.

Для оптимізації взаємодії таких компонент необхідним є моделювання для оцінки пропускної здатності, покриття та багатьох інших важливих показників, які можна використовувати для проектування ефективної мережі із застосуванням технології LoRaWAN.

Перелік посилань

1. H. E. Elbsir, M. Kassab, S. Bhiri and M. H. Bedoui, "Evaluation of LoRaWAN Class B efficiency for downlink traffic," 2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2020, pp. 105-110, doi: 10.1109/WiMob50308.2020.9253405.
2. F. Van den Abeele, J. Haxhibeqiri, I. Moerman and J. Hoebeke, "Scalability Analysis of Large-Scale LoRaWAN Networks in ns-3," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 6, pp. 2186-2198, Dec. 2017, doi: 10.1109/IJOT.2017.2768498.
3. M. L. Jovanović, M. Koprivica and N. Neškovi, "Implementation of IoT System for Securing Telecommunications Infrastructure Based on LoRaWAN Operator's Network," IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861632.
4. A. Lavric, A. I. Petrariu and L. Anchidin, "Internet of Things Software Defined Radio Technology for LoRaWAN Wireless Communication: A survey," 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425135.
5. Y. Jeon and Y. Kang, "Implementation of a LoRaWAN protocol processing module on an embedded device using Secure Element," 2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2019, pp. 1-3.
6. X. Chen, J. Wang and L. Wang, "A Fast Session Key Generation Scheme for LoRaWAN," 2019 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC), 2019, pp. 63-66, doi: 10.1109/ANZCC47194.2019.8945521.
7. L. Maziero et al., "Monitoring of Electric Parameters in the Federal University of Santa Maria Using LoRaWAN Technology," 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895425.
8. E. Sisinni et al., "LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 8, pp. 5607-5616, Aug. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2958620.
9. N. P. Manchev, K. K. Angelov, P. G. Kogias and S. M. Sadinov, "Development of Multichannel LoRaWAN Gateway for Educational Applications in Low-Power Wireless Communications," 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878492.

Додаток Г
(обов'язковий)
Презентація доповіді

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Воробйов Володимир

Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Науковий керівник – д.т.н. проф. Бармак О.В.

Хмельницький - 2022

1

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Об'єкт дослідження – процес оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Предмет дослідження – моделі, удосконалений метод та програмно-технічні засобами оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

2

Мета і задачі дослідження

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних задач:

1. Провести аналіз та дослідження технологій Інтернету речей, зокрема, LPWAN, LoRa, виокремлено вимоги до IoT.
2. Розробити моделі різних компонентів системи LoRaWAN.
3. Розробити удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.
4. Спроекувати та дослідити програмно-апаратну реалізацію розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

3

Наукова новизна отриманих результатів

1. Удосконалено метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, який на відміну від відомих враховує модуляцію та поширення сигналу, втрати при поширенні, втрати проникнення в будівлю, корельоване затінювання, чутливість приймача, фізичні перешкоди, особливості функціонування шлюзу, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

2. Набули подальшого розвитку програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, які забезпечують успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

Практичне значення отриманих результатів

В результаті виконаного наукового дослідження було розроблено програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю

4

Актуальність дослідження

- Все більше і більше повсякденних об'єктів підключаються до Інтернету, поступово будуючи майбутнє, описане парадигмою Інтернету речей (IoT).
- Очікується, що ринок розумних пристроїв значно зросте, за оцінками, до 2023 року буде активним 20 мільярдів пристроїв IoT або більше, що, отже, принесе прогнозований щорічний економічний ефект у діапазоні від 2,7 трлн до 6,2 трлн доларів до 2025 року.
- Сфери застосування цієї нової парадигми підключення та збору даних включають галузі охорони здоров'я, транспорт, розумні будинки, сільське господарство, виробництво та управління міською інфраструктурою, серед багатьох інших, при цьому охорона здоров'я та виробництво, як очікується, будуть домінуючими ринками

5

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Основи методу

Метод ґрунтується на кроках:

- Створення топології: набір вузлів (тобто пристроїв), які будуть використовуватися в мережі, створюється як набір об'єктів Node. MobilityModel може бути пов'язана з кожним вузлом, щоб відображати фізичне положення вузла та те, як воно змінюється з часом.

6

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Основи методу

Метод ґрунтується на кроках:

- Побудова моделі: на раніше створений набір вузлів встановлюється певний стек протоколів. Зазвичай це робиться за допомогою хелперів, класів, які спеціалізуються на встановленні на вузол різних об'єктів, що реалізують необхідні рівні стеку ISO/OSI. Цей крок дає кожному вузлу можливість створювати, надсилати, отримувати та інтерпретувати пакети, що належать протоколу.

7

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Основи методу

Метод ґрунтується на кроках:

- Побудова моделі: на раніше створений набір вузлів встановлюється певний стек протоколів. Зазвичай це робиться за допомогою хелперів, класів, які спеціалізуються на встановленні на вузол різних об'єктів, що реалізують необхідні рівні стеку ISO/OSI. Цей крок дає кожному вузлу можливість створювати, надсилати, отримувати та інтерпретувати пакети, що

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Основи методу

Метод ґрунтується на кроках:

- Побудова конфігурації: моделі протоколу налаштовуються на використання певних значень як своїх параметрів, а також створюються зв'язки між різними вузлами. Зазвичай це робиться шляхом «підписки» РНУ шарів кількох вузлів на той самий об'єкт каналу.

9

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Основи методу

Метод ґрунтується на кроках:

- Запуск системи: запускається моделювання, і клас Simulator проходить через події та виконує відповідні виклики функцій. Під час моделювання джерела трасування запускають і зберігають дані або у відповідних структурах даних, або у файлі. У деяких випадках може бути корисно зупинити моделювання (тобто запланувати подію зупинки), коли буде зібрано достатньо даних з джерел трасування.

10

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Основи методу

Метод ґрунтується на кроках:

- ❑ Аналіз продуктивності: після зупинки моделювання зібрані дані можна проаналізувати та візуалізувати.

11

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Показники, які необхідно розрахувати для системи LoRaWAN

- ❑ Розподіл коефіцієнта поширення: як коефіцієнти поширення розподіляються на різних відстанях від шлюзу, і як на це впливає використовувана модель втрат поширення.

12

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Показники, які необхідно розрахувати для системи LoRaWAN

- ❑ Втрачені повідомлення: повідомлення прикладного рівня можуть бути відкинуті через норми робочого циклу, а повідомлення рівня РНУ можуть бути втрачені, оскільки вони надходять до шлюзу з недостатньою чутливістю або через руйнівні перешкоди. Швидкість втрати пакетів може бути досліджена як функція змінної, щоб виділити конкретну механіку системи.

13

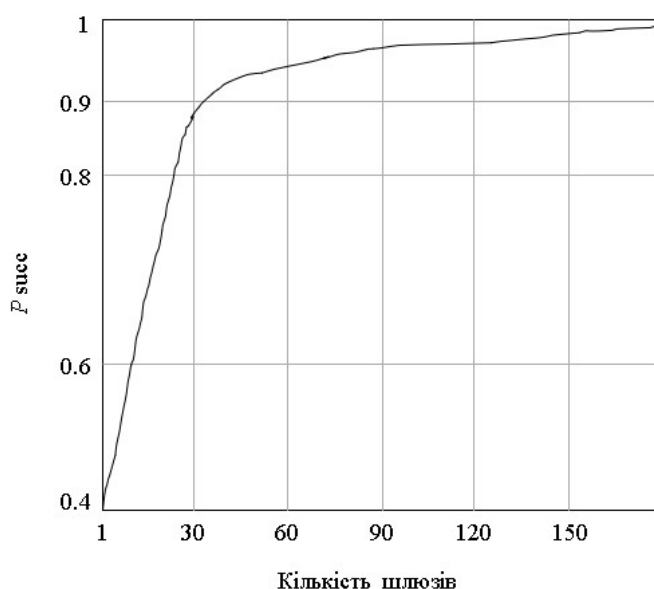
Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Показники, які необхідно розрахувати для системи LoRaWAN

- ❑ Пропускна спроможність мережі: розглядаючи систему в цілому, може бути цікаво подивитися на швидкість вилучення необроблених даних, яких можна досягти. Тому основна зосереджена на ефективності мережі, а не на ймовірності того, що типовий пристрій успішно доставить пакет.

14

Удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом



Ймовірність правильного отримання пакету на мережевому сервері як функція кількості шлюзів, що охоплюють кругову область радіусом 7,5 км

15

Практична реалізація компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Реалізація стенду для симуляції мережі LoRa

Для моделювання системи LoRa було використано програмне забезпечення Network Simulator 3 (NS3), пакет Discrete Event Simulation (DES) з відкритим кодом.

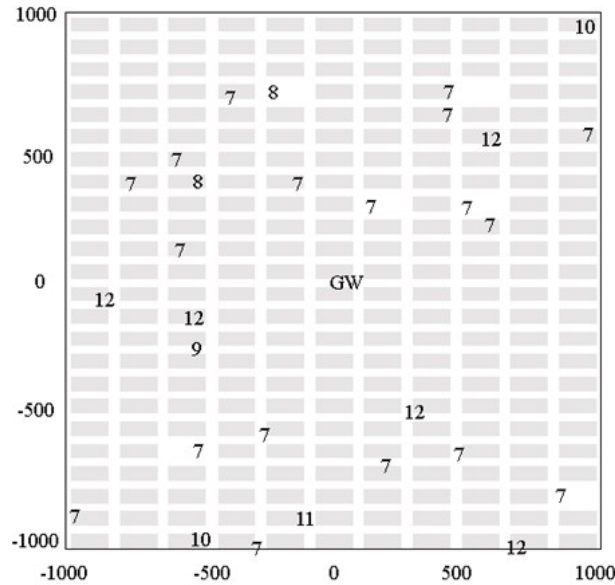
Симулятор був розширений завдяки створенню модуля loga, який реалізує різні моделі. Спочатку наводиться короткий вступ до програмного забезпечення NS3, а потім описується структура та впровадження нового модуля loga.

Моделі було реалізовано в класах модуля, топологія і моделі, які мають використовуватися в конкретному моделюванні NS3, описуються за допомогою програми C++.

16

Практична реалізація компонентів інтернету речей за LoraWan стандартом

Приклад випадкового розподілу вузлів навколо шлюзу



17

Практична реалізація компонентів інтернету речей за LoraWan стандартом

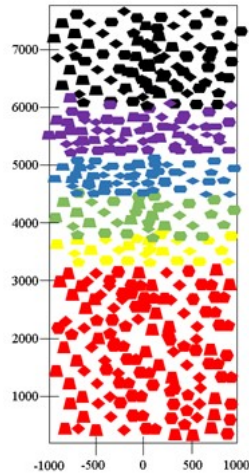


Набір класів, необхідних для моделювання стеку протоколів на пристрої

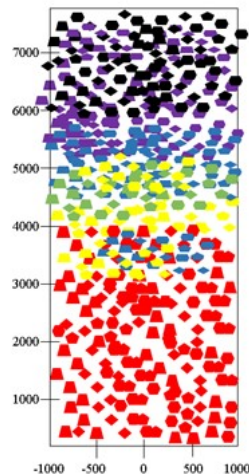
18

Практична реалізація компонентів інтернету речей за LoRaWan стандартом

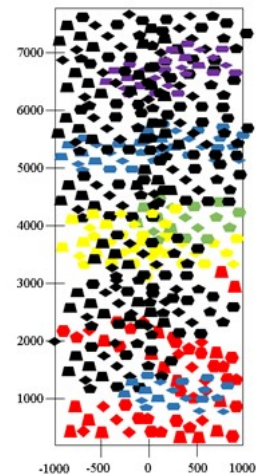
Розподіл факторів розповсюдження для різних моделей поширення



звичайне
поширення
сигналу



поширення
сигналу
із затінюванням



поширення сигналу
із затінюванням
та перешкодами,
спричиненими будівлями

19

Публікації за матеріалами дипломної роботи

1. Воробйов В. С., Бармак О. В. Дослідження аспектів проектування та оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за стандартом LoRaWAN. *Збірник наукових праць XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021»*. Хмельницький, 2021. с. 15-16.

Висновки

У першому розділі проведено аналіз та дослідження технологій Інтернету речей, зокрема, LPWAN, LoRa, виокремлено вимоги до IoT. В розділі було досліджено найпопулярніші рішення щодо проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей, їх продуктивність та здатності до масштабування, було виявлено переваги та недолік. В розділі було розглянуто основні аспекти функціонування IoT, а саме: модуляція LoRa, реалізація LoRa, пакети фізичного рівня LoRa, основні мікросхеми Semtech і незалежні реалізації. Також в розділі було досліджено принцип роботи стандарту LoRaWAN, зокрема: топологія та класи пристроїв, структура пакетів і команди MAC, шифрування та активація пристрою та діапазони частот. Було зроблено висновок, що задача проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом є на сьогодні надзвичайно актуальною, та про необхідність розроблення удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

21

Висновки

В другому розділі представлено моделі різних компонентів системи LoRaWAN. Зокрема подано основні моделі перешкод, моделі трафіку та поширення сингалів. Також в розділі було представлено моделювання таких аспектів функціонування мережі LoRa, як: аналіз модуляції та поширення, модель вимірювання зв'язку, модель втрат при поширенні, моделювання втрат проникнення в будівлю, корельованого затінення, модель продуктивності зв'язку, дослідження чутливість приймача, перешкоди, модель шлюзу.

22

Висновки

У третьому розділі представлено удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

Результати роботи методу показали, що схема доступу LoRaWAN забезпечує більш високу пропускну здатність по відношенню до типової схеми на основі ALOHA, завдяки частковій ортогональності між її поширенням. факторів. Більш того, було доведено, що архітектура LoRaWAN добре масштабується, головним чином завдяки тому, що збільшення кількості шлюзів покращує охоплення і надійність висхідного зв'язку також.

23

Висновки

В четвертому розділі представлено програмно-апаратну реалізацію розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом було здійснено ряд експериментальних досліджень. З цією метою виконання мережевого моделювання системи LoRa було використано програмне забезпечення Network Simulator 3 (NS3), пакет Discrete Event Simulation (DES) з відкритим кодом. Симулятор був розширений завдяки створенню модуля lora, який реалізує різні моделі. Спочатку наводиться короткий вступ до програмне забезпечення NS3, а потім описується структура та впровадження нового модуля lora. Експериментальні дослідження спроектованої мережі lora шляхом програмно-апаратної реалізації удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом показали в цілому оптимізацію взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, зокрема, успіх доставки пакетів вище 95% для шлюзу.

Ім'я користувача:
Кафедра КІ

Дата перевірки:
29.04.2022 08:58:34 EEST

Дата звіту:
29.04.2022 08:58:55 EEST

ID перевірки:
1010993764

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100005591

Назва документа: **Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандарто...**

Кількість сторінок: 88 Кількість слів: 16512 Кількість символів: 120423 Розмір файлу: 2.65 MB ID файлу: 1010898883

1.05% Схожість

Найбільша схожість: 0.88% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1010898795)



0.27% Цитат



Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.



Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 7%

ID: 103210 Название: Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом Добавлено в БД: 2022-04-29 Авторы: Воробйов В.С. Руководители: Бармак О.В. Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	113729	760	512 (0%)	8 (1%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Воробйов Володимир Сергійович

Тема: Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг дипломної роботи:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 90

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____
Дипломна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз та дослідження технологій Інтернету речей, зокрема, LPWAN, LoRa, виокремлено вимоги до IoT. В другому розділі представлено моделі різних компонентів системи LoRaWAN. У третьому розділі представлено удосконалений метод оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом. В четвертому розділі представлено програмно-апаратну реалізацію розробленого удосконаленого методу оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом було здійснено ряд експериментальних досліджень.

4. Позитивні сторони роботи: В результаті виконаного наукового дослідження було розроблено програмно-технічні засоби оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом, і який забезпечує успіх доставки пакетів з високою ефективністю.

5. Негативні сторони роботи: Не в повній мірі здійснено аналіз методів оптимізації взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому рівні.

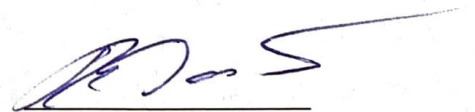
8. Інші зауваження: —

9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої дипломної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «відмінно»

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Джулій В.М. , к.т.н., доцент, кафедри кафедри кібербезпеки та комп'ютерних систем і мереж Хмельницького національного університету

“ 27 ” квітня 2022р.



Завідувачу кафедри КІІС
д-р.техн.наук, проф. Говорущенко Т. О.

Воробйова В.С.

ГІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-20-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіатоповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

29.04.2022

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА СИСТЕМНОГО ПРОГРАМУВАННЯ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Проектування та оптимізація взаємодії компонентів інтернету речей за LoRaWAN стандартом

Автор: Воробйов Володимир Сергійович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія та програмування

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Бармак О.В., д.т.н, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є незначними, законними і не є плагіатом, оскільки:

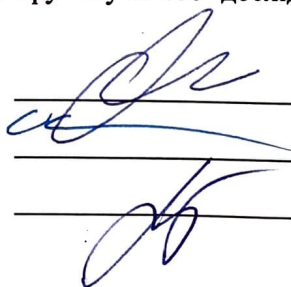
- окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 85 джерелами з бібліотек та 29 джерелами з мережі Інтернет (найбільша схожість: 0.88%);
- всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 1.05% і адресується до 10 першоджерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІСП



О.В. Бармак

О. С. Савенко

Т. О. Говорущенко