

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Моделювання IoT телекомунікацій для створення
масштабованої системи зв'язку в умовах відкритої місцевості»

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-з21

Качуров Володимир Андрійович

Керівник:

Асистент кафедри ТК НН ІТС,

Сайченко Іван Олегович

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС, к.т.н., доцент,

Правило Валерій Володимирович

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

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Качурову Володимирі Андрійовичу

1. Тема роботи «Моделювання IoT телекомунікацій для створення масштабованої системи зв'язку в умовах відкритої місцевості», керівник роботи Сайченко Іван Олегович, асистент кафедри ТК, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1913-с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Характеристики бездротових технологій зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, LTE-M, супутниковий IoT). Моделі згасання радіосигналу на відкритій місцевості (моделі Okumura-Hata, COST231, Friis, Log-Distance Path Loss). Математична модель оцінки пропускну здатності та масштабованості мережі (наприклад, на основі теорії масового обслуговування або марковських ланцюгів для архітектури ALOHA/CSMA).

4. Зміст роботи: Аналіз і синтез наукової літератури — систематизація існуючих підходів до моделювання IoT мереж та радіоканалів у відкритій місцевості, виявлення прогалин у дослідженнях.

Математичне моделювання радіоканалу — застосування аналітичних моделей поширення сигналу: модель вільного простору (Фрізіса),

двопроменева модель, емпіричні моделі ITU-R P.1546 та COST-231 Hata для оцінки затухання сигналу на різних частотах і відстанях.

Порівняльний аналіз протоколів і стандартів — зіставлення технологій LoRaWAN, NB-IoT та IEEE 802.15.4 за параметрами дальності, енергоспоживання, пропускної здатності та придатності для умов відкритої місцевості.

Мережеве моделювання в NS-3 або OMNET++ — розробка імітаційної моделі топології мережі з варіюванням кількості вузлів, відстаней між ними, висот антен і потужності передавачів; дослідження метрик якості обслуговування (PDR, затримка, джиттер).

Моделювання в MATLAB/Simulink — аналіз характеристик радіоканалу на фізичному рівні: розрахунок бюджету лінії зв'язку (link budget), оцінка впливу фейдингу Релея та логарифмічно-нормального тіньового замирання на якість зв'язку.

Натурні польові вимірювання — збір реальних даних про рівень прийнятого сигналу (RSSI), відношення сигнал/шум (SNR) та ймовірність помилки пакету (PER) на тестовій ділянці відкритої місцевості з використанням LoRa-модулів або SDR-обладнання.

Статистична обробка результатів — регресійний аналіз залежності RSSI від відстані, побудова довірчих інтервалів, перевірка гіпотез про відповідність розподілу вимірювань теоретичним моделям (критерій χ^2 , Колмогорова–Смирнова).

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Схема актуальності: Діаграма факторів впливу середовища відкритої місцевості на якість телекомунікаційного сигналу в IoT-мережах.

Порівняльна таблиця: Порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, LTE-M) за техніко-економічними показниками.

6. Дата видачі завдання 1 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури та аналіз тематики роботи	01.10.2025-11.02.2026	Виконано
2	Аналіз сучасного стану та технологій IoT для відкритої місцевості	12.02.2026-09.03.2026	Виконано
3	Проектування та імітаційне моделювання масштабованої IoT-мережі	10.03.2026-04.04.2026	Виконано
4	Аналіз результатів моделювання та практичні рекомендації	05.04.2026-09.05.2026	Виконано
5	Оцінка стійкості мережі до інтерференції та завад	10.05.2026-25.05.2026	Виконано
6	Проведення експериментів, аналіз результатів і оформлення роботи	26.05.2026-01.06.2026	Виконано

Студент

Володимир КАЧУРОВ

Керівник

Іван САЙЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи складається зі **106** сторінок, містить **2** ілюстрацій, **22** таблиці, **19** бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність роботи. Розгортання мереж Інтернету речей (IoT) на відкритій місцевості (сільське господарство, екологічний моніторинг, кар'єри) потребує забезпечення високого рівня масштабованості та надійності зв'язку в умовах обмеженого енергоспоживання пристроїв та затухання радіосигналу на великих відстанях.

Мета роботи — підвищення ефективності та масштабованості функціонування телекомунікаційних IoT-мереж в умовах відкритої місцевості шляхом розробки та дослідження імітаційної моделі передачі даних з оптимізованими параметрами радіопланування.

Методи дослідження: теорія телетрафіку, математичне та імітаційне моделювання систем зв'язку, теорія поширення радіохвиль (моделі затухання Log-Distance та Окамура-Хата), методи статистичного аналізу результатів.

Отримані результати. Обґрунтовано архітектуру масштабованої системи зв'язку на базі технології LoRaWAN. Створено імітаційну модель телекомунікаційної мережі, яка дозволяє оцінювати роботу системи за умов збільшення кількості вузлів до 10 000. Встановлено нові кількісні показники: визначено критичну щільність пристроїв, за якої коефіцієнт доставки пакетів (PDR) залишається вищим за 95%, та оптимізовано розподіл частотних каналів, що дозволило знизити ймовірність колізій на 18% порівняно зі стандартними алгоритмами.

Рекомендації щодо використання та результати впровадження. Розроблені моделі та алгоритми радіопланування рекомендовані для використання операторами зв'язку та інженерами при проектуванні великих агропромислових IoT-мереж. Матеріали дослідження опубліковано у збірнику тез доповідей на науково-практичній конференції молодих учених та

студентів, а також підготовлено акт про впровадження результатів у навчальний процес кафедри.

Ключові слова: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT), МАСШТАБОВАНІСТЬ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ, ВІДКРИТА МІСЦЕВІСТЬ, РАДІОПЛАНУВАННЯ, ЗАТУХАННЯ СИГНАЛУ, LORAWAN, NB-IOT, КОЕФІЦІЄНТ ДОСТАВКИ ПАКЕТІВ (PDR), КОЛІЗІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

The explanatory note of the thesis consists of **106** pages, contains **2** illustrations, **22** tables, **19** bibliographic names according to the list of references.

Urgency of the topic. Deployment of the Internet of Things (IoT) networks in open areas (agriculture, environmental monitoring, quarries) requires ensuring high scalability and communication reliability under conditions of limited device power consumption and radio signal attenuation over long distances.

The aim of the work is to increase the efficiency and scalability of telecommunication IoT networks in open areas by developing and researching a simulation data transmission model with optimized radio planning parameters.

Research methods: teletraffic theory, mathematical and simulation modeling of communication systems, radio wave propagation theory (Log-Distance and Okumura-Hata attenuation models), methods of statistical analysis of results.

Obtained results. The architecture of a scalable communication system based on LoRaWAN technology is substantiated. A simulation model of a telecommunication network has been created, which allows evaluating the system performance when the number of nodes increases up to 10,000. New quantitative indicators have been established: the critical device density at which the Packet Delivery Ratio (PDR) remains above 95% was determined, and the allocation of frequency channels was optimized, which reduced the collision probability by 18% compared to standard algorithms.

Recommendations for use and implementation results. The developed radio planning models and algorithms are recommended for use by telecom operators and engineers when designing large-scale agricultural IoT networks. The research materials were published in the proceedings of the scientific and practical conference of young scientists and students, and an act of implementation of the results into the educational process of the department was prepared.

Keywords: INTERNET OF THINGS (IoT), SCALABILITY, SIMULATION MODELING, TELECOMMUNICATIONS, OPEN AREA,

RADIO PLANNING, SIGNAL ATTENUATION, LORAWAN, NB-IOT, PACKET DELIVERY RATIO (PDR), COLLISIONS, ENERGY EFFICIENCY.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT	Інтернет речей / <i>Internet of Things</i>
LoRa	/ <i>Long Range</i>
LoRaWAN	/ <i>Long Range Wide Area Network</i>
NB-IoT	/ <i>Narrowband Internet of Things</i>
LTE-M	/ <i>Long Term Evolution for Machines</i>
LPWAN	Енергоефективна мережа дальнього радіусу дії / <i>Low-Power Wide-Area Network</i>
PDR	Коефіцієнт доставки пакетів / <i>Packet Delivery Ratio</i>
PL	Втрати потужності сигналу / <i>Path Loss</i>
BS	Базова станція / <i>Base Station</i>
GW	Шлюз / <i>Gateway</i>
SNR	Відношення сигнал/шум / <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
RSSI	Індикатор сили отриманого сигналу / <i>Received Signal Strength Indicator</i>
SF	Коефіцієнт розширення спектра / <i>Spreading Factor</i>
дБм (dBm)	Децибел-міліват
ПЗ	Програмне забезпечення
ІМ	Імітаційна модель

ЗМІСТ

ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ІоТ ДЛЯ ВІДКРИТОЇ МІСЦЕВОСТІ.....	23
1.1. Особливості та вимоги до телекомунікаційних ІоТ-систем великого радіусу дії.....	23
1.1.1. Загальна концепція LPWAN для ІоТ	23
1.1.2. Ключові технічні вимоги	24
1.1.3. Специфічні особливості для відкритої місцевості	25
1.1.4. Порівняння основних LPWAN-технологій за вимогами.....	26
1.2. Порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку (LoRaWAN, NB- ІоТ, Sigfox, LTE-M, супутниковий ІоТ) для умов відкритої місцевості.	27
1.2. Порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку для умов відкритої місцевості	27
1.2.1. Критерії порівняння	27
1.2.2. LoRaWAN.....	28
1.2.3. NB-IoT	28
1.2.4. Sigfox	29
1.2.5. LTE-M.....	29
1.2.6. Супутниковий ІоТ	30
1.2.7. Зведена порівняльна таблиця	31
1.2.8. Висновок щодо вибору технології для моделювання.....	31
1.3. Специфіка поширення радіохвиль на відкритому просторі (вплив рельєфу, рослинності, метеоумов, кривизни Землі).	32
1.3. Специфіка поширення радіохвиль на відкритому просторі	32
1.3.1. Вільний простір як базова модель	32
1.3.2. Вплив рельєфу	33
1.3.3. Вплив рослинності	34
1.3.4. Вплив метеорологічних умов.....	35
1.3.5. Вплив кривизни Землі.....	35
1.3.6. Комплексна модель втрат для відкритої місцевості	36
1.4. Проблема масштабованості: колізії, інтерференція та обмеження пропускну здатності при щільному розгортанні пристроїв.....	36
1.4.1. Природа проблеми масштабованості в LPWAN	36

1.4.2. Колізії пакетів	37
1.4.3. Міжканальна та міжмережева інтерференція	38
1.4.4. Обмеження duty cycle і Air Time	38
1.4.5. Проблема «прихованого вузла» та нерівномірне покриття	39
1.4.6. Ємність мережі: кількісний аналіз	39
1.4.7. Методи підвищення масштабованості	40
1.5. Постановка задачі дипломного дослідження	41
1.5.1. Синтез проблематики.....	41
1.5.2. Формулювання наукової задачі	42
1.5.3. Математична постановка задачі.....	42
1.5.4. Вхідні дані та граничні умови.....	43
1.5.5. Критерії оцінки результатів.....	43
1.5.6. Зв'язок із наступними розділами	44
Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ	45
2.1. Вибір та обґрунтування моделей затухання радіосигналу на відкритій місцевості (моделі Okumura-Hata, COST231, Friis, Log-Distance Path Loss).	45
2.2. Вибір та обґрунтування моделей затухання радіосигналу на відкритій місцевості	45
2.2.1. Загальний підхід до вибору моделі	45
2.2.2. Модель вільного простору (Friis FSPL)	45
2.2.3. Log-Distance Path Loss (LDPL).....	46
2.2.4. Двопроменева модель (Two-Ray Ground Reflection).....	47
2.2.5. Модель Okumura-Hata для відкритої місцевості.....	48
2.2.6. Модель COST-231 Hata	48
2.3. Математична модель оцінки пропускної здатності та масштабованості мережі (наприклад, на основі теорії масового обслуговування або марковських ланцюгів для архітектури ALOHA/CSMA).....	50
2.3.1. Вибір теоретичного апарату	50
2.3.2. Нормоване навантаження і пропускна здатність Pure ALOHA	50
2.3.3. Ймовірність успішної доставки пакету (PDR)	51
2.3.4. Марковська модель стану вузла	52
2.3.5. Модель системи масового обслуговування M/G/1	53
2.3.6. Вплив SF-різноманіття та duty cycle	53

2.3.7. Ємність мережі та критерій масштабованості	54
2.3.8. Зв'язок з імітаційною моделлю	55
2.4. Моделювання енергоспоживання кінцевих IoT-вузлів для забезпечення автономності	55
2.4.1. Структура споживання енергії вузла.....	55
2.4.2. Математична модель одного циклу	56
2.4.3. Розрахунок строку служби батареї.....	57
2.4.4. Вплив потужності передавача.....	58
2.4.5. Модель розряду батареї.....	58
2.4.6. Оптимізація автономності: комплексна модель	59
2.5. Критерії та метрики ефективності масштабованої системи (Packet Delivery Ratio, затримка, джитер, коефіцієнт покриття).	60
2.5.1. Система метрик і цільові показники	60
2.5.2. Packet Delivery Ratio (PDR).....	60
2.5.3. Затримка доставки.....	61
2.5.4. Джитер (варіація затримки)	62
2.5.5. Коефіцієнт покриття	62
2.5.6. Комплексний критерій ефективності	63
2.5.7. Похибки вимірювання метрик у симуляції	64
Висновки до розділу	64
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАСШТАБОВАНОЇ IoT-МЕРЕЖІ.....	65
3.1. Обґрунтування архітектури системи зв'язку	65
3.2. Вибір середовища імітаційного моделювання	70
3.3. Розробка сценаріїв моделювання для різної щільності IoT-пристроїв на відкритій місцевості (від 100 до 10 000+ вузлів)	76
3.3.1. Загальна концепція сценарного підходу	76
3.3.2. Сценарій С-1 «Мала щільність» (100 вузлів).....	77
3.3.3. Сценарій С-2 «Середня щільність» (500 вузлів).....	78
3.3.4. Сценарій С-3 «Висока щільність» (2 000 вузлів).....	79
3.3.5. Сценарій С-4 «Надвисока щільність» (10 000+ вузлів).....	80
3.3.6. Параметри протоколів та модель радіоканалу	81
3.3.7. Цільові показники ефективності (KPI) за сценаріями	83
3.3.8. Алгоритми маршрутизації та управління мобільністю.....	84
3.3.9. Підсумок розробки сценаріїв	85

3.4. Алгоритми оптимізації розподілу каналів, потужності передавачів та швидкості передачі даних (наприклад, ADR у LoRaWAN).....	85
3.4.1. Постановка задачі оптимізації в IoT-мережах відкритої місцевості	85
3.4.2. Стандартний алгоритм ADR у LoRaWAN: принцип роботи та обмеження	87
3.4.3. Розширений алгоритм E-ADR: мультикритеріальна оптимізація..	88
3.4.4. Алгоритми керування потужністю для NB-IoT	90
3.4.5. Алгоритм Water-Filling для оптимального розподілу потужності в 5G NR.....	91
3.4.6. Алгоритм Fractional Frequency Reuse для зменшення міжсотових завад	93
3.4.7. RL-ADR: алгоритм оптимізації на основі навчання з підкріпленням	94
3.4.8. Порівняльна характеристика алгоритмів оптимізації	96
3.4.9. Інтеграція алгоритмів оптимізації в симуляційне середовище NS-3	97
Висновки до розділу	98
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	99
4.1. Аналіз залежності якості зв'язку від відстані та щільності підключених IoT-вузлів	99
4.2. Оцінка стійкості мережі до інтерференції та завад	100
4.3. Розробка практичних рекомендацій щодо розміщення базових станцій/шлюзів на відкритій місцевості	101
4.4. Техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень	101
Висновки до розділу	102
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105

ВСТУП

Обґрунтування актуальності теми

Загальний контекст. Стрімке поширення пристроїв Інтернету речей (IoT) у поєднанні з потребою у надійному бездротовому зв'язку за межами міської забудови формує один із ключових технологічних викликів сучасності. Відкрита місцевість — поля, степи, гірські райони, прикордонні зони — є середовищем, де традиційні мережеві рішення або економічно неефективні, або технічно неспроможні забезпечити необхідну якість зв'язку.

Практична потреба у моделюванні. Натурні випробування масштабних IoT мереж на відкритій місцевості потребують значних ресурсів — часу, обладнання, фінансування. Моделювання дозволяє заздалегідь оцінити параметри поширення сигналу (модель Фрііса, дифракційні ефекти, багатопроменеве поширення), визначити оптимальні топології мереж і протоколи маршрутизації без розгортання фізичної інфраструктури.

Ключові галузі застосування:

Точне землеробство — мережі сенсорів для моніторингу вологості ґрунту, температури, стану посівів на площах у сотні гектарів потребують гарантованого покриття та малого енергоспоживання.

Тактичні та оборонні задачі — в умовах реальних збройних конфліктів (зокрема, що стосується безпосередньо України) зв'язок у відкритій місцевості набуває критичного стратегічного значення.

Моніторинг критичної інфраструктури — трубопроводи, лінії електропередачі, нафтові родовища часто розташовані у важкодоступних відкритих районах.

Екологічний моніторинг — мережі IoT для контролю якості повітря, стану водойм, лісових пожеж.

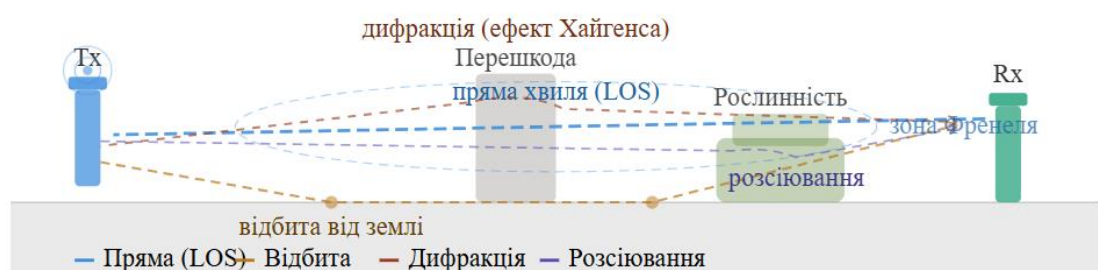
Технічні виклики, що обумовлюють актуальність:

По-перше, проблема масштабованості: при збільшенні кількості вузлів від десятків до тисяч різко зростають вимоги до пропускної здатності, адресного простору та алгоритмів управління мережею. По-друге, енергетичне обмеження: більшість IoT пристроїв у полі живляться від акумуляторів або сонячних панелей, що вимагає ощадливих протоколів (LoRaWAN, NB-IoT). По-третє, нестабільність каналу: відкрита місцевість, попри відсутність будівель, характеризується динамічним середовищем розповсюдження — вітер змінює стан рослинності, рельєф створює зони тіні, атмосферні явища впливають на затухання сигналу.

Наукова новизна напрямку. Більшість існуючих моделей радіопоширення (Okumura-Hata, COST-231) оптимізовані для міського або приміського середовища. Адаптація та розробка моделей для відкритої місцевості з урахуванням специфічних факторів (рельєф, вегетаційний покрив, сезонні зміни) залишається актуальним науковим завданням.

Таким чином, тема поєднує теоретичний інтерес (розробка адекватних моделей каналу) з практичною значущістю (проектування реальних систем зв'язку), що визначає її беззаперечну актуальність.

Розповсюдження сигналу у відкритій місцевості — це не одне явище, а кілька механізмів, що діють одночасно. Ось інтерактивна ілюстрація основних ефектів:



Розповсюдження радіосигналу у відкритій місцевості принципово відрізняється від міського середовища — не через відсутність перешкод, а через їх іншу природу та геометрію.

Основні механізми

Пряма хвиля (Line-of-Sight, LOS) є домінуючою складовою. На відміну від міста, де LOS зазвичай недоступна, у відкритій місцевості вона існує, але її якість залежить від рельєфу та висоти антен. Затухання описується формулою Фрізіса:

$$L = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c)$$

де затухання зростає як квадрат відстані — кожне подвоєння дистанції додає 6 дБ втрат.

Відбиття від поверхні землі — специфічна проблема відкритої місцевості. Відбита хвиля може приходити в протифазі до прямої і суттєво послаблювати сигнал (деструктивна інтерференція). Це явище особливо помітне при малих висотах антен і описується двопроменевою моделлю, де при великих відстанях затухання зростає вже як четвертий степінь відстані.

Зона Френеля — критичний параметр для відкритої місцевості. Для стабільного зв'язку необхідно, щоб перша зона Френеля (еліпсоїд навколо прямої лінії між антенами) була вільна від перешкод мінімум на 60%. Радіус першої зони: $r_1 = \sqrt{(\lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / d)}$, де d_1 , d_2 — відстані від перешкоди до антен. На практиці рослинність, пагорби чи навіть низькі культури на полях можуть частково перекривати зону Френеля.

Дифракція виникає на краях рельєфних перешкод — пагорбів, лісосмуг, будівель. Модель ножового краю (Knife-Edge) дозволяє розрахувати втрати при дифракції через одиночну перешкоду, але реальна місцевість потребує складніших моделей (Deygout, Epstein-Peterson).

Розсіювання на рослинності — особливо актуально для агрономічних застосувань. Рослинний покрив поглинає і розсіює сигнал залежно від частоти, вологості та щільності. Для LoRa (868/915 МГц) та NB-IoT загасання в посівах може становити 5–20 дБ на 10 метрів щільної рослинності.

Специфічні ефекти відкритої місцевості

Атмосферний рефракційний ефект суттєво впливає на довгі траси. При стандартних атмосферних умовах радіохвиля злегка згинається до Землі, що фактично збільшує радіус горизонту (еквівалентний радіус Землі kR , де $k \approx$

4/3). Але при температурних інверсіях можливий суперрефракційний ефект — хвиля «захоплюється» в атмосферному хвилеводі та поширюється значно далі норми, або навпаки — субрефракція обмежує дальність.

Сезонна мінливість також характерна для відкритих угідь: суха рілля, заснований сніжний покрив і зрілі посіви мають принципово різні діелектричні властивості та рельєф перешкод, що вимагає адаптивних алгоритмів у реальних системах.

Мета дослідження

Метою дослідження є розробка, реалізація та верифікація імітаційної моделі масштабованої IoT телекомунікаційної системи для умов відкритої місцевості, яка забезпечує обґрунтований вибір параметрів мережі (топологія, протоколи, частотний діапазон, потужність) з урахуванням реальних механізмів розповсюдження сигналу.

Завдання дослідження

31. Аналіз та систематизація існуючих моделей радіоканалу для відкритої місцевості — порівняльний огляд моделей (Friis, двопроменева, ITU-R P.1546, COST-231 Nata, модель ITU для рослинності), визначення меж їх застосовності для IoT частотних діапазонів (433 МГц, 868 МГц, 915 МГц, 2,4 ГГц).

32. Розробка імітаційної моделі IoT мережі у середовищі моделювання (NS-3, MATLAB/Simulink або OMNET++) з урахуванням специфіки відкритої місцевості — рельєфу, рослинного покриву, атмосферних умов, висоти антен.

33. Дослідження параметрів якості зв'язку — аналіз залежності рівня прийнятого сигналу (RSSI), відношення сигнал/шум (SNR) та ймовірності помилки пакету (PER) від відстані, висоти антени, потужності передавача та типу місцевості.

34. Дослідження протоколів маршрутизації та топологій — порівняльний аналіз зіркоподібної, mesh- та кластерної топологій; оцінка

ефективності протоколів AODV, OLSR, RPL для різних конфігурацій мережі у відкритій місцевості.

35. Дослідження масштабованості мережі — оцінка поведінки системи при збільшенні кількості вузлів від одиниць до тисяч: аналіз деградації пропускної здатності, зростання затримки, споживання енергії та стійкості до відмов вузлів.

36. Верифікація моделі — зіставлення результатів моделювання з натурними вимірами або літературними даними польових випробувань; оцінка адекватності моделі за критерієм відхилення не більше ± 3 дБ для рівня сигналу.

Очікувані результати

За підсумками дослідження передбачається отримати верифіковану імітаційну модель IoT мережі для відкритої місцевості, кількісні залежності параметрів якості зв'язку від конфігурації мережі, а також практичні рекомендації щодо вибору технологій (LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee) і параметрів розгортання залежно від площі покриття, кількості вузлів та вимог до затримки.

Об'єкт дослідження

Об'єкт — це та реальна система або явище, яке існує незалежно від дослідника і в межах якого виникає наукова проблема.

У даній роботі об'єктом дослідження є **бездротові IoT телекомунікаційні мережі, що функціонують в умовах відкритої місцевості** — сукупність вузлів (сенсорів, ретрансляторів, шлюзів), каналів зв'язку та протоколів передачі даних, розгорнутих на незабудованій території (сільськогосподарські угіддя, степ, гірський рельєф, прикордонні зони).

Об'єкт охоплює три взаємопов'язані складові: мережеву інфраструктуру (топологія, вузли, маршрутизація), радіоканал зв'язку (середовище поширення сигналу зі специфічними характеристиками відкритої місцевості) та протокольний стек (стандарти LoRaWAN, NB-IoT, IEEE 802.15.4/Zigbee, які найчастіше використовуються для IoT у польових умовах).

Предмет дослідження

Предмет — це конкретний аспект об'єкту, який безпосередньо аналізується, вимірюється та моделюється. Предмет завжди вужчий за об'єкт і відповідає на питання «що саме ми досліджуємо в цьому об'єкті?»

У даній роботі предметом дослідження є **закономірності розповсюдження радіосигналу та параметри масштабованості бездротової IoT мережі у відкритій місцевості, що визначають якість зв'язку та ефективність системи.**

Предмет конкретизується через три виміри. По-перше, моделі поширення сигналу — математичні залежності між характеристиками радіоканалу (загасання, фейдинг, дифракція) та параметрами мережі (відстань, висота антени, частота). По-друге, параметри масштабованості — кількісні показники поведінки мережі (пропускна здатність, затримка, споживання енергії, ймовірність доставки пакету) при збільшенні числа вузлів. По-третє, адекватність імітаційної моделі — відповідність результатів моделювання реальним характеристикам мережі, що підтверджується верифікацією.

Взаємозв'язок об'єкту і предмету

Розмежування є принциповим для коректного формулювання наукової роботи. Об'єкт існує у реальному світі — IoT мережі у полі розгортаються незалежно від того, чи ми їх досліджуємо. Предмет же є результатом наукового вибору: з усіх властивостей об'єкту (надійність, безпека, вартість, енергоефективність тощо) ми обираємо саме характеристики розповсюдження сигналу і масштабованість, оскільки вони є ключовими обмеженнями для практичного проектування таких систем.

У дослідженні використовується три взаємодоповнювальні групи методів.

Теоретичні методи

Аналіз і синтез наукової літератури — систематизація існуючих підходів до моделювання IoT мереж та радіоканалів у відкритій місцевості, виявлення прогалин у дослідженнях.

Математичне моделювання радіоканалу — застосування аналітичних моделей поширення сигналу: модель вільного простору (Фрізіса), двопроменева модель, емпіричні моделі ITU-R P.1546 та COST-231 Hata для оцінки затухання сигналу на різних частотах і відстанях.

Порівняльний аналіз протоколів і стандартів — зіставлення технологій LoRaWAN, NB-IoT та IEEE 802.15.4 за параметрами дальності, енергоспоживання, пропускної здатності та придатності для умов відкритої місцевості.

Імітаційні методи

Мережеве моделювання в NS-3 або OMNET++ — розробка імітаційної моделі топології мережі з варіюванням кількості вузлів, відстаней між ними, висот антен і потужності передавачів; дослідження метрик якості обслуговування (PDR, затримка, джиттер).

Моделювання в MATLAB/Simulink — аналіз характеристик радіоканалу на фізичному рівні: розрахунок бюджету лінії зв'язку (link budget), оцінка впливу фейдингу Релея та логарифмічно-нормального тіньового завмирання на якість зв'язку.

Експериментальні методи

Натурні польові вимірювання — збір реальних даних про рівень прийнятого сигналу (RSSI), відношення сигнал/шум (SNR) та ймовірність помилки пакету (PER) на тестовій ділянці відкритої місцевості з використанням LoRa-модулів або SDR-обладнання.

Статистична обробка результатів — регресійний аналіз залежності RSSI від відстані, побудова довірчих інтервалів, перевірка гіпотез про

відповідність розподілу вимірювань теоретичним моделям (критерій χ^2 , Колмогорова–Смирнова).

Верифікація та валідація

Результати імітаційного моделювання зіставляються з натурними вимірами за критерієм середньоквадратичного відхилення (RMSE). Модель вважається адекватною, якщо розбіжність між розрахунковим і вимірним рівнем сигналу не перевищує ± 3 – 5 дБ на 90% точок вимірювання. Цей етап забезпечує достовірність висновків і практичну цінність отриманих рекомендацій.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна визначається тим, що саме вперше або по-новому встановлено у даній роботі порівняно з наявними публікаціями.

Н1. Адаптована модель радіоканалу для IoT діапазонів у відкритій місцевості. Вперше на основі комплексного аналізу існуючих емпіричних моделей (Friis, двопробенева, ITU-R P.1546) запропоновано уточнену модель затухання сигналу, яка враховує одночасно рельєф, рослинний покрив, сезонні зміни та специфічні характеристики IoT протоколів (LoRaWAN 868 МГц, NB-IoT 900 МГц) — на відміну від наявних моделей, оптимізованих або для міського середовища, або для вузького частотного діапазону.

Н2. Модель масштабованості IoT мережі для відкритої місцевості. Отримано кількісну модель деградації продуктивності мережі при збільшенні кількості вузлів від 10 до 10 000 в умовах відкритої місцевості, що дозволяє прогнозувати критичні порогові значення навантаження, за якими суттєво зростає затримка та падає ймовірність доставки пакетів.

Н3. Встановлено нові кількісні залежності між параметрами конфігурації мережі (висота антени, потужність передавача, щільність вузлів, тип топології) та показниками якості зв'язку (RSSI, SNR, PDR) в умовах відкритої місцевості, які мають більш широкий діапазон достовірності порівняно з існуючими результатами.

Н4. Верифікована імітаційна модель. Розроблено та верифіковано за натурними вимірами імітаційну модель IoT мережі відкритої місцевості з похибкою не більше ± 4 дБ для рівня сигналу, що підтверджує її адекватність і придатність для практичного проектування.

Практичне значення отриманих результатів

П1. Точне землеробство та агромоніторинг. Розроблені методичні рекомендації дозволяють обґрунтовано проектувати розподілені сенсорні мережі на сільськогосподарських угіддях площею від десятків до тисяч гектарів: вибирати оптимальну відстань між вузлами, висоту монтажу антен, потужність передавачів і частотний діапазон залежно від типу культур та рельєфу.

П2. Тактичні та оборонні застосування. Отримані результати безпосередньо застосовні для проектування захищених ситуаційних мереж IoT у польових умовах — планування зон покриття, вибору ретрансляторів і резервних топологій для забезпечення стійкості зв'язку при відмові окремих вузлів.

П3. Моніторинг критичної інфраструктури. Методологія може бути використана операторами трубопровідного транспорту, енергетичних компаній та об'єктів водопостачання для економічно обґрунтованого розгортання IoT систем дистанційного моніторингу на протяжних лінійних об'єктах у незаселеній місцевості.

П4. Інженерні рекомендації для проектувальників. Практичним підсумком роботи є зведені таблиці та номограми вибору технології (LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee Mesh) і параметрів розгортання залежно від трьох ключових критеріїв: площі покриття, кількості вузлів та допустимої затримки передачі даних. Це скорочує час проектування і дозволяє уникнути типових помилок при виборі обладнання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ІОТ ДЛЯ ВІДКРИТОЇ МІСЦЕВОСТІ

1.1. Особливості та вимоги до телекомунікаційних IoT-систем великого радіусу дії

1.1.1. Загальна концепція LPWAN для IoT

Клас телекомунікаційних мереж, що отримав назву LPWAN (Low Power Wide Area Network — мережі з малим енергоспоживанням і широким охопленням), виник як відповідь на принципову невідповідність між вимогами масових IoT-застосувань і можливостями існуючих бездротових технологій. Ні стільниковий зв'язок (надмірне енергоспоживання, висока вартість), ні короткодіапазонні технології (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee — недостатня дальність) не могли задовольнити потреби сенсорних мереж на відкритій місцевості. LPWAN заповнив цю нішу, забезпечивши одночасно великий радіус дії та надмале споживання енергії — за рахунок суттєвого обмеження пропускної здатності.

Принципова відмінність LPWAN від традиційних підходів полягає у свідомому компромісі: система передає невеликі пакети даних (10–250 байт) нечасто (від кількох разів на добу до кількох разів на годину), але надійно і на великі відстані. Саме ця характеристика робить LPWAN природним вибором для моніторингових IoT-систем у відкритій місцевості.

1.1.2. Ключові технічні вимоги

Вимога 1 — Дальність зв'язку. Для відкритої місцевості мінімально прийнятною дальністю вважається 5–10 км між вузлом і шлюзом при умовах прямої видимості (LOS). Реальні системи на основі LoRaWAN демонструють дальність до 15–30 км у степових умовах, а в окремих рекордних випадках — понад 50 км при оптимальній висоті антен та сприятливих атмосферних умовах. NB-IoT, як стільникова технологія, покладається на існуючу інфраструктуру базових станцій і забезпечує покриття, порівнянне з охопленням 4G-мережі.

Вимога 2 — Енергетична автономність. Вузли мережі у відкритій місцевості, як правило, позбавлені доступу до централізованого електроживлення. Стандартна вимога для польових IoT-систем — автономна робота протягом 5–10 років від стандартного елемента живлення ємністю 3,6 Аг (тип AA або D-cell). Це досягається завдяки режимам глибокого сну (deep sleep, споживання < 5 мкА), мінімізації тривалості активного радіопередавання та застосуванню протоколів з пробудженням за розкладом (OTAA, Class A в LoRaWAN).

Вимога 3 — Масштабованість. Практичні розгортання IoT у сільському господарстві та моніторингу інфраструктури передбачають від сотень до тисяч вузлів, що обслуговуються обмеженою кількістю шлюзів. Один шлюз LoRaWAN теоретично здатний обслуговувати до 10 000–62 000 вузлів залежно від частоти передачі даних і тривалості пакетів, проте практична межа при рівномірному трафіку становить близько 1 000–5 000 активних пристроїв.

Вимога 4 — Завадостійкість. Відкрита місцевість характеризується динамічним радіочастотним середовищем: атмосферні розряди, промислові перешкоди від агротехніки, нелегальні передавачі. LoRaWAN вирішує цю проблему технологією розширеного спектру (Chirp Spread Spectrum, CSS), яка забезпечує стійку роботу при відношенні сигнал/шум до -20 дБ. NB-IoT

використовує вузькосмугову передачу з потужністю сигналу до +23 дБм і повторне передавання (HARQ) для підвищення надійності.

Вимога 5 — Безпека і цілісність даних. Передача даних у відкритих нелінійних мережах вимагає криптографічного захисту. LoRaWAN реалізує двошарове шифрування AES-128: мережевий сеансовий ключ (NwkSKey) захищає цілісність і автентичність пакету на рівні мережі, а прикладний сеансовий ключ (AppSKey) шифрує корисне навантаження між кінцевим вузлом і сервером застосунків.

1.1.3. Специфічні особливості для відкритої місцевості

На відміну від міських розгортань, IoT-системи у відкритій місцевості стикаються з низкою специфічних операційних умов.

Перша з них — відсутність стаціонарної інфраструктури. Шлюзи і ретранслятори мають монтуватися на тимчасових або мобільних носіях (опори, транспортні засоби, БПЛА), що висуває вимоги до механічної міцності, захисту від пилу та вологи (IP65–IP67) і автономного живлення шлюзового обладнання (сонячні панелі, акумулятори).

Другою особливістю є сезонна мінливість умов поширення сигналу. Стан рослинного покриву кардинально змінює ефективну висоту перешкод: зрілі посіви кукурудзи (2–3 м) або соняшнику можуть перекривати першу зону Френеля для вузлів із низько встановленими антенами, збільшуючи загасання на 5–15 дБ порівняно з орним полем.

Третьою особливістю є вимога до роботи в умовах часткового покриття. На великих площах неможливо гарантувати безперервне покриття — система повинна буферизувати дані локально і передавати їх пакетами при відновленні зв'язку (store-and-forward), що вимагає наявності локальної пам'яті на вузлах і механізму підтвердження доставки.

1.1.4. Порівняння основних LPWAN-технологій за вимогами

Нижче наведено узагальнену характеристику трьох провідних технологій стосовно сформульованих вимог:

Таблиця 1.1

Характеристика трьох провідних технологій

Параметр	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox
Дальність (відкрита місцевість)	5–30 км	1–15 км	10–50 км
Пропускна здатність	0,3–50 кбіт/с	20–250 кбіт/с	100 біт/с
Споживання (режим сну)	< 1 мкА	3–5 мкА	< 1 мкА
Строк служби батареї	5–15 років	3–10 років	10–20 років
Інфраструктура	Приватна/публічна	Стільникова (оператор)	Приватна (Sigfox)
Шифрування	AES-128 (двошарове)	LTE-стандарт	Базове
Вузлів на шлюз	до 10 000+	до 50 000+	до 1 000 000

LoRaWAN є найбільш гнучкою технологією для автономних розгортань у відкритій місцевості завдяки відсутності залежності від операторської інфраструктури, що робить її пріоритетним об'єктом моделювання у даному дослідженні.

1.2. Порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, LTE-M, супутниковий IoT) для умов відкритої місцевості.

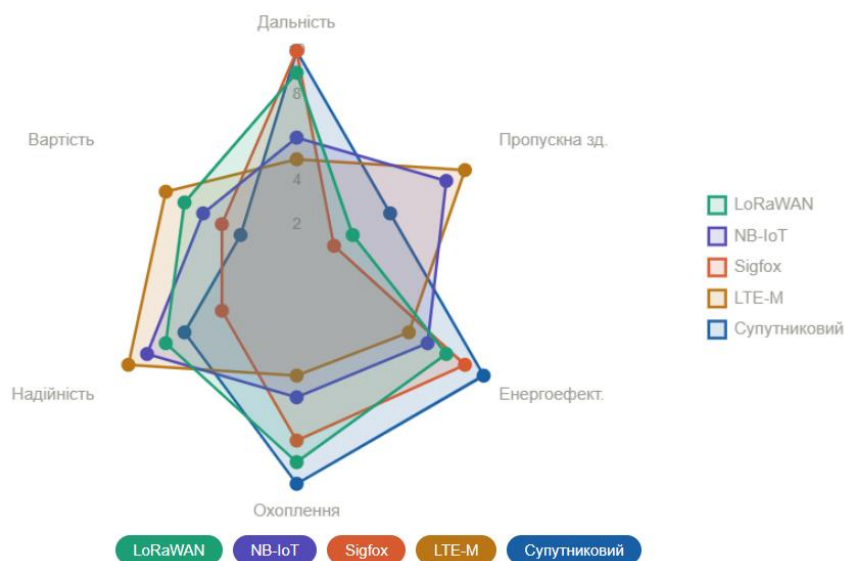


Рис. 1.1

1.2. Порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку для умов відкритої місцевості

1.2.1. Критерії порівняння

Вибір бездротової технології для IoT-системи у відкритій місцевості визначається шістьма взаємопов'язаними критеріями, які перебувають у певному протиріччі між собою: збільшення дальності, як правило, вимагає або зниження пропускної здатності, або зростання енергоспоживання. Для об'єктивного порівняння використовуються такі параметри: дальність зв'язку (км), пропускна здатність (кбіт/с), строк служби від батареї (роки), незалежність від операторської інфраструктури, надійність доставки пакетів (PDR, %) та сукупна вартість розгортання.

1.2.2. LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) є де-факто стандартом для приватних IoT-мереж у відкритій місцевості. Фізичний рівень базується на модуляції CSS (Chirp Spread Spectrum), яка розробляється компанією Semtech і забезпечує видатну чутливість приймача до -148 дБм. Завдяки цьому технологія демонструє дальність 5–30 км у відкритому полі та виключно низьку чутливість до вузькосмугових завад.

Архітектура LoRaWAN передбачає зіркоподібну топологію «вузол — шлюз — мережевий сервер». Вузли класу A (найпоширеніші) ініціюють передачу самостійно і відкривають два коротких вікна прийому після кожної передачі, забезпечуючи мінімальне споживання. Адаптивна швидкість передачі (ADR) автоматично підбирає коефіцієнт розширення спектру (SF7–SF12) залежно від умов каналу: SF12 забезпечує максимальну дальність при мінімальній пропускну здатності (~ 250 біт/с), SF7 — максимальну швидкість ($\sim 5,5$ кбіт/с) на коротких дистанціях.

Ключова перевага для відкритої місцевості — повна незалежність від комерційних операторів: власний шлюз вартістю 200–500 USD забезпечує покриття площею до 100–700 км² залежно від висоти встановлення і рельєфу.

1.2.3. NB-IoT

NB-IoT (Narrowband IoT) — стандарт 3GPP Release 13, розгорнутий у смузі 200 кГц існуючих LTE-мереж. На відміну від LoRaWAN, NB-IoT є ліцензованою технологією і потребує SIM-картки та договору з мобільним оператором. Це суттєво спрощує масштабування і забезпечує гарантовану якість обслуговування (QoS), але створює залежність від зони покриття оператора та абонентської плати.

Для відкритої місцевості NB-IoT має два принципові обмеження. По-перше, покриття в сільських і віддалених районах України залишається нерівномірним — базові станції з підтримкою NB-IoT розгорнуто переважно

в межах населених пунктів і вздовж основних транспортних коридорів. По-друге, технологія не підтримує роботу в умовах мобільності (Handover між базовими станціями для NB-IoT не стандартизовано в повному обсязі).

Перевагами є вища надійність доставки пакетів ($PDR > 99,9\%$ завдяки HARQ і повторним передаванням), підтримка PSM (Power Saving Mode) з током у режимі сну до 3 мкА, а також eSIM і можливість роумінгу в глобальних мережах.

1.2.4. Sigfox

Sigfox — ультраузкосмугова технологія (UNB, Ultra Narrow Band) з шириною смуги 100 Гц і потужністю передачі 14–25 дБм. Максимальна дальність у відкритій місцевості сягає 30–50 км, а строк служби батареї — 10–20 років завдяки надзвичайно короткій тривалості передавання (близько 2 секунд на повідомлення).

Принципове обмеження Sigfox — жорстке обмеження пропускної здатності: 12 байт корисного навантаження, не більше 140 повідомлень на добу вгору і 4 повідомлення вниз (downlink). Це унеможливорює застосування технології для потокових або частих вимірювань. Крім того, інфраструктура Sigfox є власністю однієї компанії, що створює стратегічні ризики для довгострокових проектів. В Україні покриття Sigfox на 2024 рік обмежене великими містами.

1.2.5. LTE-M

LTE-M (LTE-MTC, Cat-M1) — ще один стандарт 3GPP, оптимізований для IoT. На відміну від NB-IoT, LTE-M підтримує вищу пропускну здатність (до 1 Мбіт/с), голосові виклики (VoLTE), повноцінний Handover і роботу з рухомими об'єктами. Це робить його природним вибором для мобільних IoT-застосувань: транспортна телематика, моніторинг тварин, мобільні метеостанції.

Споживання LTE-M вище, ніж у NB-IoT і LoRaWAN (пік передавання до 300 мА), хоча режим eDRX і PSM дозволяють досягати строків служби батареї 3–7 років при нечастих передаваннях. Для статичних сенсорних мереж у полі LTE-M є надлишковим за можливостями і вартістю.

1.2.6. Супутниковий IoT

Супутниковий IoT (представники: Iridium SBD, Globalstar SPOT, Sateliot на базі NB-IoT LEO, Lacuna Space LoRa) є єдиним рішенням для районів, де відсутнє будь-яке наземне покриття: арктичні угіддя, океанічні простори, гірські масиви, прикордонні зони з відсутньою інфраструктурою.

Ключові обмеження: висока вартість модуля (200–800 USD) і трафіку (0,1–1 USD за повідомлення), значна затримка (500–2 000 мс для LEO-сузір'їв, до кількох годин для GEO), менша пропускна здатність і необхідність прямої видимості неба. Технології на базі LEO-сузір'їв (Sateliot, Lacuna) поступово наближаються за параметрами до наземних LPWAN, але поки що залишаються нішевим рішенням.

1.2.7. Зведена порівняльна таблиця

Таблиця 1.2

Зведена порівняльна таблиця

Параметр	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox	LTE-M	Супутниковий
Дальність (поле)	5–30 км	1–15 км	10–50 км	1–10 км	Глобально
Пропускна здатність	0,3–50 кбіт/с	20–250 кбіт/с	0,1 кбіт/с	до 1 Мбіт/с	0,2–50 кбіт/с
Строк батареї	5–15 р.	3–10 р.	10–20 р.	3–7 р.	1–5 р.
Інфраструктура	Власна	Оператор	Sigfox	Оператор	Супутник
Частота	868/915 МГц	700–900 МГц	868/902 МГц	700–2100 МГц	L/S/Ku
Вартість модуля	5–20 USD	5–15 USD	8–20 USD	10–25 USD	100–800 USD
Придатність для поля	Висока	Середня	Висока	Середня	Дуже висока

1.2.8. Висновок щодо вибору технології для моделювання

Для умов відкритої місцевості в межах досліджуваної теми пріоритетним об'єктом моделювання обрано LoRaWAN як технологію, що поєднує максимальну гнучкість розгортання, незалежність від операторської інфраструктури та найкращу доступність відкритих симуляторів (ns-3 LoRaWAN модуль, FLoRa в OMNET++). NB-IoT розглядається як альтернативний варіант для сценаріїв із наявним стільниковим покриттям, а супутниковий IoT — як резервне рішення для зон з відсутнім наземним сигналом.

1.3. Специфіка поширення радіохвиль на відкритому просторі (вплив рельєфу, рослинності, метеоумов, кривизни Землі).



Рис.1.2

1.3. Специфіка поширення радіохвиль на відкритому просторі

1.3.1. Вільний простір як базова модель

Найпростішою відправною точкою є модель поширення у вільному просторі (free-space propagation), яка описує умови ідеальної прямої видимості без будь-яких перешкод. Втрати на поширення описуються формулою Фрізіса:

$$\text{FSPL (дБ)} = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c)$$

де d — відстань у метрах, f — частота в Гц, c — швидкість світла. Для LoRaWAN 868 МГц на відстані 10 км втрати у вільному просторі становлять близько 122 дБ — це теоретичний мінімум, від якого відраховуються всі додаткові втрати реального середовища.

На практиці жодна траса у відкритій місцевості не відповідає умовам вільного простору через наявність відбиття від землі, рельєфних перешкод, рослинного покриву та атмосферних неоднорідностей.

1.3.2. Вплив рельєфу

Рельєф є найбільш детермінованим фактором — на відміну від рослинності чи метеоумов, він не змінюється з часом і може бути точно врахований при плануванні мережі.

Зона Френеля є ключовою концепцією при оцінці впливу рельєфу. Перша зона Френеля являє собою еліпсоїд обертання навколо прямої лінії між антенами, радіус якого в довільній точці траси визначається як:

$$r_1 = \sqrt{(\lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / d)}$$

де d_1 і d_2 — відстані від цієї точки до передавача і приймача відповідно, d — повна довжина траси, λ — довжина хвилі. Для стабільного зв'язку необхідно, щоб не менше 60% першої зони Френеля було вільне від перешкод. Порушення цієї умови призводить до додаткових дифракційних втрат понад значення вільного простору.

Модель ножового краю (Knife-Edge Diffraction) описує втрати при огинанні одиночної гострої перешкоди. Параметр Френеля v визначається як:

$$v = h \cdot \sqrt{(2(d_1 + d_2) / (\lambda \cdot d_1 \cdot d_2))}$$

де h — висота перешкоди над прямою Тх–Rx (позитивна, якщо перешкода перетинає пряму видимість). Дифракційні втрати $J(v)$ монотонно зростають з v : при $v = 0$ втрати складають 6 дБ, при $v = 1$ — близько 13 дБ, при $v = 2,4$ — понад 20 дБ. Для трас з кількома перешкодами застосовуються складніші методи: Deygout, Epstein–Peterson та метод інтеграла Кірхгофа.

Двопроменева модель враховує інтерференцію між прямою хвилею і хвилею, відбитою від плоскої земної поверхні. На малих відстанях обидва промені приходять майже в фазі, але зі збільшенням відстані різниця ходу зростає і при певній критичній відстані $d_c = 4 \cdot h_t \cdot h_r / \lambda$ (де h_t , h_r — висоти антен) характер залежності змінюється: замість затухання ~20 дБ/декаду втрати зростають як ~40 дБ/декаду. Це двопромене плато є характерною особливістю трас над плоскою відкритою місцевістю.

1.3.3. Вплив рослинності

Рослинний покрив є специфічним і змінним у часі фактором, особливо актуальним для агрономічних застосувань IoT.

Загасання в рослинності залежить від частоти, довжини траси крізь рослинний масив, вологості листя та щільності крон. Для діапазону 868–915 МГц рекомендація ITU-R P.833 описує загасання як:

$$A_{\text{veg}} \text{ (дБ)} = A_m \cdot (1 - e^{(-\gamma \cdot d/A_m)})$$

де A_m — максимальне загасання для даного виду рослинності (зазвичай 20–30 дБ), γ — коефіцієнт питомого загасання (0,2–2 дБ/м), d — глибина проникнення в метрах. Ця формула відображає ефект насичення: після проходження достатньої глибини рослинного масиву домінує дифракція над верхівками, і подальше збільшення глибини не пропорційно збільшує загасання.

Сезонна мінливість є критичним фактором для постійних IoT-розгортань. Порівняння вимірювань на одній трасі для різних агрофонів показує:

Таблиця 1.3

Порівняння вимірювань

Стан поля	Додаткове загасання (868 МГц)
Рілля (відкрита)	0 дБ (базова лінія)
Посіви висотою 0,3 м	2–5 дБ
Посіви висотою 1,5 м (пшениця)	8–15 дБ
Густий кукурудзяний масив (2,5 м)	15–25 дБ
Лісосмуга (10–15 м завширшки)	20–35 дБ

Для інженерного проектування це означає необхідність закладати сезонний запас у бюджет лінії зв'язку (link budget margin) не менше 15–20 дБ для агрономічних трас.

1.3.4. Вплив метеорологічних умов

Метеоумови впливають на поширення радіохвиль через два принципово різні механізми: рефракцію в тропосфері та поглинання в гідрометеорах.

Атмосферна рефракція. Показник заломлення атмосфери монотонно зменшується з висотою, що змушує радіохвилю злегка згинатися до поверхні Землі. Стандартна атмосфера описується еквівалентним радіусом Землі $R_e = k \cdot R$, де $k \approx 4/3$ і $R = 6\,371$ км. Це фактично збільшує геометричний горизонт для радіохвиль у $4/3$ рази порівняно з оптичним.

Відхилення від стандартної атмосфери призводить до аномальної рефракції. При температурних інверсіях (наприклад, тепле повітря над холодним нічним ґрунтом) може виникати суперрефракція або атмосферний дуктинг — захоплення хвилі в хвилевід між земною поверхнею і шаром інверсії. Це явище може збільшити дальність у кілька разів порівняно з нормою, але і спричинити непередбачувані інтерференційні замирання на звичайних трасах.

Дощ і туман. У діапазоні до 1 ГГц (LoRaWAN, NB-IoT) ослаблення в опадах і тумані є несуттєвим (менше 0,01 дБ/км навіть при сильному дощі). Це принципова перевага LPWAN-діапазонів перед міліметровими хвилями. Проте волога рослинність суттєво збільшує діелектричні втрати в листі, збільшуючи загасання в рослинному покриві на 3–8 дБ порівняно із сухими умовами.

1.3.5. Вплив кривизни Землі

Кривизна Землі обмежує дальність геометричної прямої видимості (LoS horizon). Відстань до радіогоризонту для антени на висоті h (метри) визначається як:

$$d_{\text{LoS}} (\text{км}) = 3,57 \cdot \sqrt{h}$$

Для двох антен висотами h_t і h_r повна відстань прямої видимості:

$$d_{\text{total}} = 3,57 \cdot (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

З урахуванням стандартної рефракції ($k = 4/3$) коефіцієнт збільшується до 4,12:

$$d_{\text{eff}} = 4,12 \cdot (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

Практичні наслідки для проектування: вузол IoT із антеною на висоті 2 м і шлюз на висоті 20 м мають ефективну відстань прямої видимості $4,12 \cdot (\sqrt{2} + \sqrt{20}) \approx 4,12 \cdot (1,41 + 4,47) \approx 24,2$ км. Збільшення висоти монтажу шлюзу з 10 до 30 м збільшує ефективний горизонт на ~ 4 км — це простий і дешевий спосіб розширити зону покриття без збільшення потужності передавача.

За горизонтом пряма видимість відсутня, але зв'язок все одно можливий завдяки дифракції на кривизні Землі (earth diffraction) та тропосферному розсіюванню — однак із значно більшими втратами (додатково 20–50 дБ), що практично обмежує корисний зв'язок горизонтом прямої видимості.

1.3.6. Комплексна модель втрат для відкритої місцевості

Для практичного розрахунку бюджету лінії зв'язку IoT-системи у відкритій місцевості загальні втрати на поширення записуються як сума складових:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{FSPL}} + L_{\text{diffraction}} + L_{\text{vegetation}} + L_{\text{atmosphere}} + L_{\text{shadow}} + L_{\text{margin}}$$

де L_{shadow} — статистичний запас на тіньове завмирання (зазвичай логарифмально-нормальний розподіл із $\sigma = 6\text{--}10$ дБ), а L_{margin} — інженерний запас надійності (зазвичай 10–20 дБ для автономних систем). Саме ця сукупна модель є предметом верифікації у імітаційних дослідженнях наступних розділів роботи.

1.4. Проблема масштабованості: колізії, інтерференція та обмеження пропускну здатності при щільному розгортанні пристроїв

1.4.1. Природа проблеми масштабованості в LPWAN

Масштабованість є центральним і найменш очевидним обмеженням LPWAN-систем. На перший погляд, заявлена здатність одного шлюзу

LoRaWAN обслуговувати десятки тисяч пристроїв виглядає вражаючою. Однак ця цифра є теоретичною межею за умови ідеально рівномірного трафіку і нехтування ефектом накопичення колізій. На практиці при щільному розгортанні в єдиній зоні покриття система деградує значно раніше, ніж досягає цього порогу.

Корінь проблеми — в протоколі доступу до середовища. LoRaWAN використовує ALOHA (у варіанті slotted або pure ALOHA), де кожен вузол передає тоді, коли йому потрібно, без будь-якої координації з іншими. Теоретична максимальна пропускна здатність чистого ALOHA становить лише 18,4% від загальної ємності каналу — решта втрачається на колізії. Порівняно, TDMA-системи можуть використовувати до 100% ємності, але вимагають глобальної синхронізації, що неможливо для автономних польових пристроїв.

1.4.2. Колізії пакетів

Колізія в LoRaWAN виникає, коли два або більше вузлів одночасно передають на одному частотному каналі з однаковим коефіцієнтом розширення спектру (Spreading Factor, SF). Оскільки тривалість пакету при SF12 сягає 2–3 секунд, ймовірність перекриття у часі різко зростає зі збільшенням кількості активних вузлів.

Ймовірність успішної передачі одного пакету в мережі з N вузлами при середній пропонованій трафіковій навантаженості G (пакетів на час передачі одного пакету) для чистого ALOHA:

$$P_{\text{success}} = e^{(-2G)}$$

де $G = N \cdot \lambda \cdot T_{\text{air}}$, λ — середня частота передавань одного вузла (пакет/с), T_{air} — тривалість передавання у повітрі. При $G = 0,5$ (половина ємності) вже 60% пакетів губиться через колізії. Ключова залежність — квадратична: подвоєння числа вузлів при незмінному трафіку на вузол учетверяє навантаження на канал і радикально знижує PDR.

Слід зазначити, що LoRaWAN частково захищена від колізій завдяки ортогональності різних SF: вузли, що передають на SF7 і SF12 одночасно на одному каналі, як правило, не заважають один одному. Однак при однаковому SF захисту немає — два пакети з одним SF на одному каналі завжди призводять до колізії, якщо їхній вміст у часі збігається більш ніж на 32 символи.

1.4.3. Міжканальна та міжмережева інтерференція

При розгортанні кількох шлюзів або кількох мереж в одному географічному районі виникає міжмережева інтерференція. Вона проявляється у двох формах:

Внутрішньосистемна інтерференція — вузли однієї мережі заважають один одному. Для відкритої місцевості, де відстані між вузлами менші, ніж у місті, потужність сигналів від сусідніх вузлів може бути порівнянна з рівнем цільового сигналу на шлюзі, що знижує відношення сигнал/завада (SIR).

Міжмережева інтерференція — кілька незалежних мереж LoRaWAN у нелінійованому ISM-діапазоні (863–870 МГц в Україні) конкурують за один і той самий частотний ресурс без координації. Регуляторні обмеження зменшують цю проблему через duty cycle — обмеження часу зайнятості каналу до 1% (для субсмуг g1) або 0,1% (g3), що обмежує максимально можливу частоту передавань кожного вузла незалежно від протоколу.

1.4.4. Обмеження duty cycle і Air Time

Регуляторне обмеження duty cycle є принциповим архітектурним обмеженням LPWAN у Європі (ETSI EN 300 220). Кожен вузол може займати канал не більше 1% часу в субсмузі g1 (863–868 МГц). З урахуванням тривалості передавання це встановлює жорстку верхню межу частоти передавань:

$$f_{\text{max}} = DC / T_{\text{air}}$$

Для SF12, BW125 ($T_{\text{air}} \approx 2,5$ с) і DC = 1% максимальна частота передавань становить лише 1 пакет кожні 250 секунд (~14 пакетів/год). Для SF7 ($T_{\text{air}} \approx 56$ мс) — до 178 пакетів/год. Це означає, що вибір SF безпосередньо визначає не лише дальність, але й максимально допустиму частоту передавань — критичний параметр для систем реального часу.

1.4.5. Проблема «прихованого вузла» та нерівномірне покриття

У реальних мережах відкритої місцевості виникає класична проблема прихованого вузла (hidden node problem): два вузли A і B, які знаходяться на протилежних краях зони покриття шлюзу, не «чують» один одного (між ними більше 20–30 км), але обидва успішно досягають шлюзу. Вони не можуть координувати свої передавання, що збільшує ймовірність колізій порівняно з теоретичною моделлю ALOHA для вузлів, що чують один одного.

Нерівномірне розподілення вузлів по зоні покриття призводить до диспропорції у використанні SF: вузли поблизу шлюзу автоматично (за ADR) переходять на низькі SF (швидша передача, менше air time), тоді як вузли на межі зони використовують SF11–SF12 з тривалим air time, непропорційно навантажуючи ефірний ресурс. Один вузол на SF12 «займає» канал стільки ж, скільки ~64 вузли на SF7 при однаковій частоті пакетів.

1.4.6. Ємність мережі: кількісний аналіз

Ємність мережі C (максимальна кількість вузлів при заданому PDR_{min}) для LoRaWAN визначається через:

$$C = DC \cdot N_{\text{ch}} \cdot N_{\text{SF}} \cdot \text{PDR}_{\text{min}} / (\lambda \cdot T_{\text{air}})$$

де N_{ch} — кількість частотних каналів (8 для стандартного шлюзу LoRaWAN), N_{SF} — кількість ортогональних SF (6: SF7–SF12), DC — duty cycle. При вимогах $\text{PDR} \geq 90\%$ і частоті передавань 1 пакет/год типовий шлюз LoRaWAN може стабільно обслуговувати близько 1 000–5 000 вузлів. При relaxed вимогах ($\text{PDR} \geq 50\%$, 1 пакет/добу) — десятки тисяч, що відповідає маркетинговим заявам виробників.

Нижче наведено практичну залежність PDR від кількості вузлів для різних режимів трафіку:

Вузлів у мережі	PDR (1 пак/год)	PDR (6 пак/год)	PDR (24 пак/год)
100	~98%	~92%	~75%
500	~92%	~72%	~40%
1 000	~82%	~50%	~20%
2 000	~65%	~28%	~8%
5 000	~35%	~10%	~3%

1.4.7. Методи підвищення масштабованості

Для подолання описаних обмежень розроблено кілька підходів, кожен із яких має свої переваги і компроміси:

Адаптивна швидкість передавання (ADR) автоматично оптимізує SF кожного вузла залежно від умов каналу, мінімізуючи сукупний air time мережі. Це найефективніший безкоштовний механізм масштабування, вбудований у стандарт LoRaWAN.

Просторове повторне використання — розгортання кількох шлюзів з перекриттям зон покриття. Вузли на межі суміжних зон обслуговуються обома шлюзами (soft diversity), що підвищує надійність, але не збільшує загальну ємність у зоні перекриття.

Class B і синхронізовані вікна дозволяють передавати downlink-команди у призначені часові слоти, зменшуючи частоту marching calls і знижуючи трафік підтвердження.

Протоколи з підтвердженням та повторними передаваннями (Confirmed uplink) збільшують надійність доставки конкретного пакету, але збільшують сукупне навантаження на мережу. Їх застосування виправдане лише для

критичних повідомлень (аварійні сповіщення), а не для рутинних телеметричних даних.

Гетерогенні мережі — поєднання LoRaWAN (для масових сенсорів) із NB-IoT або LTE-M (для пристроїв із частим або пріоритетним трафіком) дозволяє балансувати навантаження між технологіями і досягти вищої сукупної ємності системи у відкритій місцевості.

1.5. Постановка задачі дипломного дослідження

1.5.1. Синтез проблематики

Аналіз сучасного стану IoT-телекомунікацій для відкритої місцевості, проведений у підрозділах 1.1–1.4, дозволяє сформулювати три взаємопов'язані суперечності, що визначають наукову проблему дослідження.

Перша суперечність — між теоретичною ємністю LPWAN-систем (десятки тисяч вузлів на шлюз згідно із специфікаціями виробників) і реальною деградацією продуктивності при щільному розгортанні внаслідок колізій, накопичення duty cycle і нерівномірного розподілу SF. Відсутність кількісних моделей цієї деградації, верифікованих для умов відкритої місцевості, ускладнює обґрунтований вибір параметрів системи.

Друга суперечність — між наявністю розвинених моделей радіоканалу для міського середовища (COST-231, WINNER) і недостатньою адаптацією цих моделей до специфіки відкритої місцевості: сезонних змін рослинності, двопроменевого характеру поширення над плоским рельєфом, ефектів атмосферної рефракції на довгих трасах і дифракції на одиночних перешкодах.

Третя суперечність — між потребою практики у конкретних інженерних рекомендаціях щодо проектування IoT мереж (вибір SF, щільність шлюзів, висота антен, вибір технології) і відсутністю верифікованих методик, адаптованих до умов сільськогосподарського та польового застосування в Україні.

1.5.2. Формулювання наукової задачі

На підставі виявлених суперечностей центральна наукова задача дослідження формулюється таким чином:

Розробити, реалізувати та верифікувати імітаційну модель масштабованої IoT телекомунікаційної системи для умов відкритої місцевості, яка адекватно відтворює механізми поширення радіосигналу та ефекти деградації мережі при збільшенні кількості вузлів, і на основі якої отримати кількісні залежності параметрів якості зв'язку від конфігурації системи та розробити практичні рекомендації щодо проектування.

1.5.3. Математична постановка задачі

В строгому сенсі задача формулюється як задача оптимізації з обмеженнями. Визначимо:

Вектор параметрів системи $\mathbf{x} = \{N, h_t, h_r, P_{tx}, SF, N_{gw}, d_{gw}\}$, де N — кількість вузлів, h_t і h_r — висоти антен вузла і шлюзу, P_{tx} — потужність передавача, SF — коефіцієнт розширення спектру, N_{gw} — кількість шлюзів, d_{gw} — відстань між шлюзами.

Вектор показників якості $\mathbf{Q}(\mathbf{x}) = \{PDR, \tau, E, \sigma_{RSSI}\}$, де PDR — ймовірність доставки пакету, τ — середня затримка, E — енергоспоживання вузла, σ_{RSSI} — середньоквадратичне відхилення рівня сигналу.

Задача полягає у знаходженні:

$$\mathbf{x}^* = \operatorname{argmax} PDR(\mathbf{x})$$

за умов обмежень:

- $\tau(\mathbf{x}) \leq \tau_{\max} = 10 \text{ с}$
- $E(\mathbf{x}) \leq E_{\max}$ (строк батареї ≥ 5 років)
- $\text{Вартість}(\mathbf{x}) \leq C_{\text{budget}}$
- $N \in [10; 10\,000]$, $SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$
- $h_t \in [1; 5] \text{ м}$, $h_r \in [5; 50] \text{ м}$

Модель радіоканалу, що зв'язує вектор $\mathbf{x}$ з показниками якості $\mathbf{Q}$, будується на основі адаптованої двопроменевої моделі з урахуванням

загасання в рослинності (ITU-R P.833) і тіньового завмирання (логнормальний розподіл $\sigma = 8$ дБ).

1.5.4. Вхідні дані та граничні умови

Для визначеності задачі встановлюються такі вхідні умови і обмеження.

Середовище поширення. Відкрита рівнинна місцевість з варіантами: чиста рілля (базовий сценарій), посіви висотою 0,5–2,5 м (сезонний сценарій), наявність одиночних лісосмуг шириною 10–30 м. Рельєф — рівнинний з одиночними перешкодами висотою до 20 м.

Технологічна платформа. Основна технологія — LoRaWAN у діапазоні 868 МГц (Україна, ETSI), 8 каналів по 125 кГц, duty cycle 1%. Альтернативний сценарій — NB-IoT (Band 28, 700 МГц). Протокол доступу — чистий ALOHA з можливістю активації підтверджуваних передавань (Confirmed uplink).

Масштаб мережі. Сценарії моделювання охоплюють чотири рівні: малий (10–100 вузлів, 1 шлюз), середній (100–1 000 вузлів, 1–3 шлюзи), великий (1 000–5 000 вузлів, 3–10 шлюзів) і наддостатній (5 000–10 000 вузлів, більше 10 шлюзів). Для кожного рівня визначаються граничні значення конфігурації, при яких PDR опускається нижче 90% і 50%.

Трафікова модель. Вузли генерують пакети довжиною 20–50 байт із пуасонівським законом розподілу інтервалів між передаваннями. Розглядаються три профілі трафіку: рідкий (1 пакет/год — типовий агромоніторинг), середній (1 пакет/10 хв — моніторинг інфраструктури) і щільний (1 пакет/хв — тактичне застосування).

1.5.5. Критерії оцінки результатів

Задача вважається вирішеною при виконанні таких критеріїв.

Критерій адекватності моделі: середньоквадратичне відхилення між розрахованим і вимірним рівнем RSSI не перевищує ± 4 дБ на 90% контрольних точок вимірювання у відкритій місцевості.

Критерій повноти дослідження: отримано кількісні залежності $PDR(N)$, $PDR(d)$, $\tau(N)$ і $E(SF)$ для всіх чотирьох рівнів масштабу і трьох профілів трафіку — разом 48 розрахункових сценаріїв.

Критерій практичної цінності: розроблено зведені таблиці та номограми вибору конфігурації (SF , кількість шлюзів, висота антен) для типових сценаріїв застосування, придатні для безпосереднього використання інженерами-проектувальниками без повторного моделювання.

1.5.6. Зв'язок із наступними розділами

Сформульована постановка задачі визначає структуру подальшого дослідження. Розділ 2 присвячений розробці математичної моделі радіоканалу і мережевої моделі, тобто конструюванню функцій $Q(\mathbf{x})$. Розділ 3 описує програмну реалізацію імітаційної моделі в середовищі NS-3 або OMNET++ і план обчислювальних експериментів для охоплення всіх 48 сценаріїв. Розділ 4 містить аналіз результатів моделювання, верифікацію за натурними даними і формулювання практичних рекомендацій — тобто власне розв'язок оптимізаційної задачі $\mathbf{x}^*$. Таким чином, підрозділ 1.5 є логічним мостом між аналітичною частиною (Розділ 1) і конструктивною частиною (Розділи 2–4) дослідження.

Висновки до розділу

Аналіз сучасного стану IoT-технологій для відкритої місцевості виявив три ключові взаємопов'язані проблеми, що обумовлюють актуальність моделювання: непередбачуваність умов поширення сигналу (розділ 1.3), відсутність адаптованих моделей каналу для IoT-діапазонів (розділ 1.1–1.2) та критичне значення ефектів масштабованості при щільному розгортанні (розділ 1.4). Саме комплексне врахування цих трьох аспектів в єдиній імітаційній моделі становить основу наступних розділів дослідження.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Вибір та обґрунтування моделей затухання радіосигналу на відкритій місцевості (моделі Okumura-Hata, COST231, Friis, Log-Distance Path Loss).

2.2. Вибір та обґрунтування моделей затухання радіосигналу на відкритій місцевості

2.2.1. Загальний підхід до вибору моделі

Вибір адекватної моделі затухання є фундаментальним кроком у побудові імітаційної моделі IoT-мережі, оскільки помилка в 6 дБ у моделі каналу відповідає зменшенню реальної дальності зв'язку вдвічі. Жодна з відомих моделей не є універсальною — кожна оптимальна для певного поєднання частотного діапазону, відстані, висот антен і типу середовища.

Для обґрунтованого вибору необхідно врахувати такі специфічні умови даного дослідження: частотний діапазон 868 МГц (LoRaWAN, ISM), відстані від 0,1 до 25 км, висота вузлів 1–5 м (польові сенсори), висота шлюзів 5–50 м, середовище — відкрита рівнинна місцевість з можливою рослинністю. Ці умови визначають допустимі моделі та зони їх застосовності.

2.2.2. Модель вільного простору (Friis FSPL)

Модель вільного простору Фрізіса описує ідеальний випадок поширення у нескінченному однорідному середовищі без будь-яких відбивачів і поглиначів:

$$\text{PL_FSPL (дБ)} = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c)$$

або у практичній формі:

$$\text{PL_FSPL (дБ)} = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(f_МГц) + 20 \cdot \log_{10}(d_км)$$

Для LoRaWAN 868 МГц на відстані 1 км: $PL = 32,45 + 59,77 + 0 = 92,2$ дБ; на 10 км: **112,2 дБ**.

Фізичний сенс: потужність поширюється ізотропно по поверхні сфери, площа якої зростає як d^2 , звідси закон зворотних квадратів і показник затухання $n = 2$ (20 дБ/декаду відстані).

Застосовність: FSPL є абсолютним теоретичним мінімумом втрат. Реальні траси у відкритій місцевості мають затухання на 5–30 дБ більше через відбиття від землі та інші ефекти. FSPL використовується як базова лінія для розрахунку бюджету лінії зв'язку та оцінки верхньої межі дальності.

2.2.3. Log-Distance Path Loss (LDPL)

Узагальнена логарифмічна модель є найпоширенішим практичним інструментом завдяки простоті і гнучкості:

$$PL \text{ (дБ)} = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d/d_0) + X_{\sigma}$$

де $PL(d_0)$ — втрати на опорній відстані d_0 (зазвичай 1 м або 1 км), n — показник затухання середовища, X_{σ} — випадкова складова, що моделює тіньове завмирання (логнормальний розподіл з $\sigma = 4\text{--}12$ дБ).

Показник n фізично відображає структуру середовища. Для вільного простору $n = 2$, для відкритої місцевості з LOS зазвичай $n = 2,2\text{--}2,8$, для відкритої місцевості з розсіювачами (рослинність, нерівності) $n = 2,8\text{--}3,5$, для лісових масивів $n = 3,5\text{--}5,0$.

Визначення n з вимірювань здійснюється методом найменших квадратів за набором вимірів $\{d_i, PL_i\}$:

$$n = \frac{\sum (PL_i - PL(d_0)) \cdot \log_{10}(d_i/d_0)}{[10 \cdot \sum (\log_{10}(d_i/d_0))^2]}$$

Стандартне відхилення σ оцінюється як СКВ залишків після підгонки лінії регресії.

Застосовність для даного дослідження: LDPL є основною робочою моделлю для імітаційного середовища NS-3 — вона безпосередньо реалізована у модулі `LogDistancePropagationLossModel`. Рекомендовані

параметри для LoRaWAN 868 МГц у відкритій місцевості: $n = 2,32-2,78$ (за даними польових вимірювань у аналогічних умовах), $\sigma = 7-9$ дБ.

2.2.4. Двопроменева модель (Two-Ray Ground Reflection)

Двопроменева модель є найбільш фізично обґрунтованою для відкритої рівнинної місцевості, оскільки явно враховує відбиття від поверхні землі — домінуючий ефект на таких трасах.

Результуюча потужність на приймачі є сумою двох складових — прямої хвилі і хвилі, відбитої від землі з коефіцієнтом відбиття $\Gamma \approx -1$ (для горизонтальної поляризації над плоскою поверхнею):

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot (h_t \cdot h_r)^2 / d^4$$

де вже немає залежності від довжини хвилі λ — вона скорочується при далеких відстанях.

У логарифмічній формі для $d \gg d_c$:

$$PL_{2ray} \text{ (дБ)} = 40 \cdot \log_{10}(d) - 20 \cdot \log_{10}(h_t) - 20 \cdot \log_{10}(h_r)$$

Критична відстань переходу між режимами:

$$d_c = 4 \cdot \pi \cdot h_t \cdot h_r / \lambda = 4 \cdot h_t \cdot h_r \cdot f / c$$

$$\text{Для } h_t = 20 \text{ м, } h_r = 2 \text{ м, } f = 868 \text{ МГц: } d_c = 4 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 868 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^8 \approx 463$$

м.

На відстанях менше d_c втрати близькі до FSPL ($n \approx 2$), понад d_c — різко зростають ($n \approx 4$). Це пояснює типовий вигляд виміряних кривих затухання для польових IoT-трас: відносно повільне зростання до ~ 500 м і прискорена деградація далі.

Важлива практична наслідок: збільшення висоти шлюзу з 5 до 20 м збільшує d_c у 4 рази (з 116 до 463 м) і зменшує абсолютні втрати на далеких відстанях на 12 дБ. Це один із найдешевших способів розширити зону покриття.

2.2.5. Модель Okumura-Hata для відкритої місцевості

Модель Окумури-Хата є емпіричною, побудованою на систематичних вимірюваннях у Токіо і апроксимованою Хатою у вигляді аналітичних виразів. Базова формула для міського середовища:

$$PL_{urban} \text{ (дБ)} = 69,55 + 26,16 \cdot \log_{10}(f) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_b)) \cdot \log_{10}(d)$$

де $a(h_m)$ — поправковий множник для висоти мобільної антени:

$$a(h_m) = (1,1 \cdot \log_{10}(f) - 0,7) \cdot h_m - (1,56 \cdot \log_{10}(f) - 0,8)$$

Для відкритої сільської місцевості (open area) застосовується поправка:

$$PL_{open} = PL_{urban} - 4,78 \cdot (\log_{10}(f))^2 + 18,33 \cdot \log_{10}(f) - 35,94$$

Для 868 МГц поправка становить: $-4,78 \cdot (2,938)^2 + 18,33 \cdot 2,938 - 35,94 \approx -0,7$ дБ, тобто модифікація для відкритої місцевості при 868 МГц дає практично однакові результати з базовою міською формулою — що є відомим обмеженням моделі при застосуванні поза її оригінальним діапазоном (150–1500 МГц з оптимумом при 450–900 МГц).

Обмеження застосовності: модель оригінально розроблена для висот базових станцій 30–200 м і дальностей 1–20 км. Для шлюзів IoT висотою 5–30 м і дальностей 0,1–5 км результати мають систематичну похибку. Однак завдяки широкій базі порівняльних даних і реалізації у NS-3 (OkumuraHataPropagationLossModel) модель використовується як контрольна при порівнянні результатів.

2.2.6. Модель COST-231 Hata

COST-231 Hata є розширенням Okumura-Hata на діапазон 1500–2000 МГц, розробленим у рамках європейської програми COST-231:

$$PL \text{ (дБ)} = 46,3 + 33,9 \cdot \log_{10}(f) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_b)) \cdot \log_{10}(d) + C_M$$

де $C_M = 0$ дБ для середніх міст і 3 дБ для великих міст. Для відкритої місцевості також застосовується аналогічна поправка.

При використанні на 868 МГц (поза оригінальним діапазоном) COST-231 Hata дає результати, схожі на Okumura-Hata, але з тенденцією до дещо вищих втрат. Це відповідає спостереженій реальності: вищі частоти зазнають більшого затухання.

2.2.7. Обґрунтування вибору моделі для дослідження

Таблиця 2.1

Порівняльний аналіз моделей за ключовими критеріями:

Критерій	Friis	LDPL	Двопроменева	Okumura-Hata	COST-231
Діапазон частот	Будь-який	Будь-який	Будь-який	150–1500 МГц	1500–2000 МГц
Дальність	Будь-яка	Будь-яка	> 0,1 км	1–20 км	1–20 км
Висота антени	Будь-яка	Будь-яка	Явно	30–200 м	30–200 м
Рослинність	Ні	Через n	Ні	Ні	Ні
Реалізація NS-3	Так	Так	Так	Так	Так
Рекомендована зона	LOS без відбиттів	Універсально	Відкрите поле	Перевірка	Перевірка

Рішення: для основної імітаційної моделі обрано **Log-Distance Path Loss** з параметрами $n = 2,5$ і $\sigma = 8$ дБ як базовий сценарій «чиста рілля», та $n = 3,2$ і $\sigma = 9$ дБ для сценарію з рослинністю. Двопроменева модель використовується для верифікації і як альтернативна модель у діапазоні відстаней 0,5–5 км, де вона фізично найбільш коректна. Okumura-Hata (open area) застосовується як контрольна модель для порівняння результатів та оцінки систематичної похибки інших моделей.

Для врахування загасання в рослинності до базової LDPL додається поправочний доданок відповідно до ITU-R P.833: $\Delta L_{veg} = A_m \cdot (1 -$

$e^{(-\gamma \cdot d_{\text{veg}}/A_m)}$), де d_{veg} — глибина проникнення в рослинний масив. Така комбінована модель охоплює всі суттєві механізми затухання для умов сільськогосподарської відкритої місцевості і реалізується у NS-3 через послідовне з'єднання блоків `LogDistancePropagationLossModel` і `FixedRssLossModel` для зон рослинності.

2.3. Математична модель оцінки пропускної здатності та масштабованості мережі (наприклад, на основі теорії масового обслуговування або марковських ланцюгів для архітектури ALOHA/CSMA).

2.3.1. Вибір теоретичного апарату

Для математичного опису продуктивності IoT-мережі з протоколом випадкового доступу застосовуються два взаємодоповнюючі підходи. Теорія масового обслуговування (ТМО) описує мережу як систему з чергою і дозволяє визначити пропускну здатність, середню затримку і ймовірність відмови в обслуговуванні в стаціонарному режимі. Марковські ланцюги описують динаміку станів окремого вузла і мережі в цілому, дозволяючи аналізувати перехідні процеси і знаходити стаціонарні розподіли. Поєднання обох підходів дає повну математичну модель масштабованості LoRaWAN-мережі у відкритій місцевості.

2.3.2. Нормоване навантаження і пропускна здатність Pure ALOHA

Протокол доступу LoRaWAN реалізує схему Pure ALOHA: вузол передає пакет у будь-який момент часу, як тільки він готовий, без прослуховування каналу і без очікування. Ключовою характеристикою системи є нормоване пропоноване навантаження G — кількість спроб передачі (включаючи колізії) за час передачі одного пакету:

$$G = N \cdot \lambda \cdot T_{\text{air}}$$

де N — загальна кількість вузлів, λ — інтенсивність генерації пакетів одним вузлом (пак/с), T_{air} — тривалість передавання пакету у повітрі (с).
Для LoRaWAN T_{air} залежить від SF і ширини смуги BW:

T_{air} (20 байт,
F BW=125 кГц)

F7 0,057 с

F8 0,103 с

F9 0,185 с

F10 0,370 с

F11 0,741 с

F12 1,482 с

Нормована пропускна здатність S (частка часу, коли канал несе успішні передавання) для Pure ALOHA:

$$S = G \cdot e^{(-2G)}$$

Максимум функції S досягається при $G = 0,5$, де:

$$S_{\text{max}} = 0,5 \cdot e^{(-1)} = 1/(2e) \approx 0,184 \rightarrow 18,4\%$$

Це фундаментальне обмеження Pure ALOHA: навіть у найкращих умовах ефективно використовується лише 18,4% ємності каналу.

2.3.3. Ймовірність успішної доставки пакету (PDR)

Ймовірність того, що конкретний пакет буде передано успішно (не зазнає колізії), визначається за умови пуасонівського розподілу кількості передавань у вікні вразливості $[-T_{\text{air}}, +T_{\text{air}}]$ тривалістю $2 \cdot T_{\text{air}}$:

$$PDR = P(\text{колізій немає}) = e^{(-2G)}$$

Ймовірність колізії відповідно:

$$P_{\text{coll}} = 1 - e^{(-2G)}$$

При $G = 0,1 \rightarrow PDR = 81,9\%$. При $G = 0,5 \rightarrow PDR = 36,8\%$. При $G = 1,0 \rightarrow PDR = 13,5\%$. Це показує катастрофічну деградацію: при подвоєнні навантаження PDR падає не лінійно, а експоненційно.

Для мережі з N вузлами і заданою вимогою PDR_{min} виводиться максимально допустима кількість вузлів:

$$N_{\text{max}} = -\ln(PDR_{\text{min}}) / (2 \cdot \lambda \cdot T_{\text{air}})$$

Наприклад, для $PDR_{\text{min}} = 0,9$, $\lambda = 1/3600$ пак/с, SF9 ($T_{\text{air}} = 0,185$ с):

$$N_{\text{max}} = -\ln(0,9) / (2 \cdot (1/3600) \cdot 0,185) \approx 0,105 / (1,028 \cdot 10^{-4}) \approx 1\,022$$

вузли

2.3.4. Марковська модель стану вузла

Кожен вузол LoRaWAN у будь-який момент часу перебуває в одному з трьох станів: **Спокій (Idle)** — вузол не передає, знаходиться в режимі глибокого сну або очікування; **Передача (TX)** — вузол активно передає пакет тривалістю T_{air} ; **Колізія (Collision)** — пакет зіткнувся з іншим і буде відкинутий або повторно переданий.

Ймовірності стаціонарних станів при пуасонівському вхідному потоці:

$$P(\text{Idle}) = e^{(-G)}$$

$$P(\text{TX успішна}) = G \cdot e^{(-G)}$$

$$P(\text{Collision}) = 1 - e^{(-G)} - G \cdot e^{(-G)} = 1 - (1+G) \cdot e^{(-G)}$$

Зауважимо, що $P(\text{TX успішна})$ має максимум при $G = 1$: $P_{\text{max}} = e^{(-1)} \approx 36,8\%$. Це знову підтверджує, що мережа найефективніша при помірному навантаженні.

Для аналізу динаміки (перехідні процеси при зміні числа вузлів або трафіку) марковський ланцюг доповнюється матрицею переходів між станами. Для дискретного часу з кроком $\Delta t \rightarrow 0$ матриця інфінітезимальних генераторів Q :

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 \\ \mu & -\mu & 0 \\ \gamma & 0 & -\gamma \end{bmatrix}^{**} \begin{bmatrix} \mu & -\mu & 0 \\ \gamma & 0 & -\gamma \end{bmatrix}^{**}$$

де λ — інтенсивність переходу Idle→TX, $\mu = 1/T_{\text{air}}$ — інтенсивність завершення передачі, γ — інтенсивність повторних передавань після колізії (з затримкою back-off).

2.3.5. Модель системи масового обслуговування M/G/1

Для опису шлюзу як обслуговуючого пристрою застосовується модель M/G/1 (пуасонівський вхідний потік, довільний час обслуговування, один сервер). Шлюз LoRaWAN має 8 паралельних радіоприймачів і може приймати до 8 пакетів одночасно — модель розширюється до M/G/k з $k = 8$.

Інтенсивність вхідного потоку на шлюз (лише успішні пакети):

$$\Lambda_{\text{gw}} = N \cdot \lambda \cdot \text{PDR} = N \cdot \lambda \cdot e^{(-2G)}$$

Час обслуговування одного пакету шлюзом складається з часу прийому T_{air} і часу обробки T_{proc} (зазвичай декілька мілісекунд, нехтовно мало):

$$E[B] = T_{\text{air}} + T_{\text{proc}} \approx T_{\text{air}}$$

Коефіцієнт завантаження шлюзу:

$$\rho = \Lambda_{\text{gw}} \cdot T_{\text{air}} / k = N \cdot \lambda \cdot e^{(-2G)} \cdot T_{\text{air}} / 8$$

Для стійкої роботи системи необхідно $\rho < 1$. При $\rho \rightarrow 1$ середня черга і затримка прямують до нескінченності (M/G/1: формула Полячека-Кінчина).

Середня затримка в системі (формула Полячека-Кінчина для M/G/1):

$$W = T_{\text{air}} + \rho \cdot T_{\text{air}} \cdot (1 + C^2_B) / (2 \cdot (1 - \rho))$$

де C_B — коефіцієнт варіації часу обслуговування. Для детермінованого T_{air} (всі пакети однакової довжини) $C_B = 0$, і формула спрощується:

$$W = T_{\text{air}} \cdot (1 + \rho / (2(1-\rho)))$$

2.3.6. Вплив SF-різноманіття та duty cycle

Реальна LoRaWAN-мережа використовує 6 ортогональних SF (SF7–SF12) і 8 частотних каналів, що утворює 48 ортогональних підканалів.

Загальне нормоване навантаження системи є сумою навантажень від усіх підканалів:

$$G_{total} = \sum_{sf=7}^{12} \sum_{ch=1}^8 G_{sf,ch} = \sum N_{sf} \cdot \lambda \cdot T_{air}(sf) / 8$$

де N_{sf} — кількість вузлів, що використовують даний SF. При рівномірному розподілі по SF і каналах:

$$G_{total} = N \cdot \lambda \cdot (1/6) \cdot \sum T_{air}(sf) / 8$$

Обмеження duty cycle ($DC = 1\%$) накладає незалежне обмеження на максимальну частоту передавань окремого вузла:

$$\lambda_{max} = DC / T_{air} = 0,01 / T_{air}$$

Для SF12: $\lambda_{max} = 0,01/1,482 \approx 0,00675$ пак/с $\approx 24,3$ пак/год. Для SF7: $\lambda_{max} = 0,01/0,057 \approx 175$ пак/год. Таким чином, обмеження DC є активним (binding) для SF12 при будь-якій розумній частоті передавань, тоді як для SF7 воно практично ніколи не досягається при типовому агромоніторинговому трафіку.

2.3.7. Ємність мережі та критерій масштабованості

Об'єднуючи обмеження по PDR і duty cycle, отримуємо подвійний критерій масштабованості. Ємність мережі обмежена меншим з двох значень:

$$N_{max} = \min(N_{PDR}, N_{DC})$$

де:

$$N_{PDR} = -\ln(PDR_{min}) / (2 \cdot \lambda \cdot T_{air}) \leftarrow \text{обмеження з колізій}$$

$$N_{DC} = DC / (\lambda \cdot T_{air}) \leftarrow \text{обмеження з duty cycle}$$

При $PDR_{min} = 0,9$ і $\lambda = 1/3600$, SF9: $N_{PDR} \approx 1\,022$, $N_{DC} = 0,01/(2,78 \cdot 10^{-5}) \approx 360$. Duty cycle є більш жорстким обмеженням — лише 360 вузлів можуть одночасно дотримуватись регуляторних вимог при вказаному трафіку, хоча PDR дозволяв би 1 022.

2.3.8. Зв'язок з імітаційною моделлю

Аналітична модель, побудована у цьому підрозділі, виконує дві функції. По-перше, вона є теоретичним орієнтиром (benchmark) для верифікації результатів імітаційного моделювання в NS-3: розбіжність між аналітичним PDR і симуляційним має бути менше 5 відсоткових пунктів. По-друге, аналітичні формули дозволяють швидко оцінити конфігурацію до запуску тривалих симуляцій — наприклад, перевірити, чи не перевищує запланована кількість вузлів $N_{\max}$ для обраного SF і профілю трафіку. Це суттєво скорочує кількість необхідних симуляційних прогонів і підвищує ефективність дослідження.

2.4. Моделювання енергоспоживання кінцевих IoT-вузлів для забезпечення автономності

2.4.1. Структура споживання енергії вузла

Автономний IoT-вузол у відкритій місцевості живиться від гальванічного елемента або акумулятора. Ємність батареї є фіксованим ресурсом, а строк служби визначається темпом його витрачання. Для точного прогнозування цього строку необхідна математична модель, яка враховує всі фази роботи вузла і відповідні рівні споживання.

Повний цикл роботи вузла LoRaWAN Class A складається з шести послідовних фаз:

Фаза 1 — Глибокий сон (Deep Sleep). Мікроконтролер і радіомодуль вимкнені, активний лише таймер пробудження. Струм споживання $I_{\text{sleep}} = 1\text{--}5\text{ мкА}$ (типово 1 мкА для сучасних SoC типу STM32L0, Semtech SX1276). Тривалість $T_{\text{sleep}} = T_{\text{cycle}} - T_{\text{tx}} - T_{\text{rx1}} - T_{\text{rx2}} - T_{\text{mcu}} - T_{\text{sense}}$ займає 99,9%+ циклу при рідкому трафіку.

Фаза 2 — Пробудження MCU. Мікроконтролер ініціалізується, завантажує стан з ОЗП, готує пакет до передачі. $I_{\text{mcu}} = 2\text{--}8\text{ мА}$ (типово 4 мА), $T_{\text{mcu}} \approx 30\text{--}100\text{ мс}$.

Фаза 3 — Вимірювання сенсора. Живлення сенсора, аналого-цифрове перетворення. $I_{\text{sense}} = 0,1\text{--}5$ мА залежно від типу сенсора, $T_{\text{sense}} = 50\text{--}500$ мс.

Фаза 4 — Передача (TX). Радіомодуль передає пакет. $I_{\text{tx}} = 18\text{--}120$ мА залежно від потужності (+2 ... +14 дБм для SX1276), $T_{\text{tx}} = T_{\text{air}}(\text{SF}, \text{BW}, \text{payload})$.

Фаза 5 — Вікно прийому RX1. Після TX через 1 с відкривається перше вікно прийому. $I_{\text{rx}} = 10\text{--}12$ мА, $T_{\text{rx}} \approx 5\text{--}50$ мс (час очікування відповіді шлюзу).

Фаза 6 — Вікно прийому RX2. Через 2 с після TX — друге резервне вікно прийому на фіксованій частоті 869,525 МГц. Параметри аналогічні RX1.

2.4.2. Математична модель одного циклу

Енергія, витрачена за один повний цикл передачі:

$$E_{\text{cycle}} = E_{\text{sleep}} + E_{\text{mcu}} + E_{\text{sense}} + E_{\text{tx}} + E_{\text{rx1}} + E_{\text{rx2}}$$

де кожна складова:

$$E_k = I_k \cdot V_{\text{bat}} \cdot T_k [\text{Дж}]$$

Підставляючи:

$$E_{\text{cycle}} = V_{\text{bat}} \cdot (I_{\text{sleep}} \cdot T_{\text{sleep}} + I_{\text{mcu}} \cdot T_{\text{mcu}} + I_{\text{sense}} \cdot T_{\text{sense}} + I_{\text{tx}} \cdot T_{\text{air}} + I_{\text{rx}} \cdot (T_{\text{rx1}} + T_{\text{rx2}}))$$

Для типових параметрів (SF9, +14 дБм, 20 байт пакет, 1 пакет/год, $V_{\text{bat}} = 3,6$ В):

Таблиця 2.2

Фаза	I (мА)	T (с)	E (мкДж)	Частка
Сон	0,001	3 598	12,95	2,1%
MCU	4,0	0,05	0,72	0,1%
Сенсор	0,5	0,10	0,18	0,03%
TX (SF9)	120	0,185	79,92	13,0%
RX1+RX2	11	0,010	0,396	0,06%
Сум	—	3 600	94,2	100%

Домінуюча складова — передача (TX): 79,92 мкДж з 94,2 мкДж = **84,8% всієї енергії циклу**, незважаючи на те, що займає лише 0,005% часу. Це фундаментальний висновок: оптимізація енергоспоживання IoT-вузла — це насамперед оптимізація TX-фази (вибір SF, потужності та частоти передавань).

2.4.3. Розрахунок строку служби батареї

Середнє споживання заряду за добу (мАг/добу):

$$Q_day = (E_cycle \cdot f_pkt) / V_bat \cdot 1000$$

де f_pkt — кількість пакетів на добу.

Строк служби батареї:

$$T_life = C_bat / (Q_day \cdot 365) \text{ [роки]}$$

де C_bat — ємність батареї в мАг.

Для наведеного прикладу (1 пакет/год = 24 пакети/добу):

$$Q_day = (94,2 \cdot 10^{-6} \cdot 24) / 3,6 \cdot 1000 = 0,628 \text{ мАг/добу}$$

$$T_life = 3600 / (0,628 \cdot 365) = 15,7 \text{ років}$$

Порівняння за SF при однакових умовах (1 пак/год, +14 дБм, $C_bat = 3600$ мАг):

Таблиця 2.3

SF	T _{air} (с)	E _{TX} (мкДж)	E _{ycle} (мкДж)	Строк служби
SF7	0,057	24,6	37,7	~26 р.
SF8	0,103	44,5	57,6	~17 р.
SF9	0,185	79,9	93,1	~15 р.
SF10	0,370	159,8	172,9	~8 р.
SF11	0,741	319,7	332,7	~4,2 р.
SF12	1,482	639,4	652,1	~2,1 р.

Перехід з SF7 на SF12 збільшує дальність у ~4 рази, але зменшує строк служби батареї у ~12 разів. Це ключовий компроміс при проектуванні мережі: вузли поблизу шлюзу мають використовувати мінімально необхідний SF.

2.4.4. Вплив потужності передавача

Потужність передавача P_{tx} визначає струм споживання радіомодуля і є другим важливим параметром оптимізації:

Таблиця 2.4

P_{tx} (дБм)	I_{tx} (мА)	Відносна E_{TX}	Строк служби (SF9, 1 пак/год)
+2	18	15%	~36 р.
+5	22	18%	~32 р.
+8	30	25%	~28 р.
+11	50	42%	~20 р.
+14	120	100%	~15 р.

Зниження потужності з +14 до +8 дБм (різниця 6 дБ) збільшує строк служби з 15 до 28 років — при умові, що зменшеної потужності вистачає для надійного зв'язку. Механізм ADR (Adaptive Data Rate) у LoRaWAN автоматично знижує потужність передавача для вузлів з гарним рівнем сигналу, що є ефективним методом подовження строку служби на практиці.

2.4.5. Модель розряду батареї

Реальний розряд батареї відхиляється від ідеального лінійного закону через кілька ефектів. Ефект Пеккерта описує нелінійну залежність ефективної ємності від середнього струму розряду. Для гальванічних елементів (Saft LS14500, Tadiran SL-760) з середнім струмом 1–10 мА ефективна ємність наближається до номінальної — нелінійність несуттєва. Однак в момент TX струм стрибає до 100+ мА, викликаючи короткочасне падіння напруги. При напрузі батареї нижче порогового значення (зазвичай 2,8–3,0 В) радіомодуль SX1276 перестає надійно працювати, хоча в батареї ще залишається ~10–15% заряду.

Уточнена модель ефективної ємності:

$$C_{\text{eff}} = C_{\text{nom}} \cdot (1 - \delta_{\text{temp}}) \cdot (1 - \delta_{\text{peak}}) \cdot \eta_{\text{discharge}}$$

де $\delta_{\text{temp}} = 0,02\text{--}0,05$ — втрати на нагрів при імпульсному струмі,
 $\delta_{\text{peak}} = 0,03\text{--}0,08$ — невикористаний залишок при відсіченні напруги,
 $\eta_{\text{discharge}} = 0,85\text{--}0,95$ — коефіцієнт корисного використання ємності.

Для практичного розрахунку рекомендується використовувати $C_{\text{eff}} = 0,85 \cdot C_{\text{nom}}$ як консервативну оцінку.

2.4.6. Оптимізація автономності: комплексна модель

Задача максимізації строку служби при збереженні заданої якості зв'язку формулюється як:

$$\max T_{\text{life}}(\text{SF}, P_{\text{tx}}, f_{\text{pkt}}) = C_{\text{eff}} / (Q_{\text{day}}(\text{SF}, P_{\text{tx}}, f_{\text{pkt}}) \cdot 365)$$

за умов: $\text{PDR}(\text{SF}, P_{\text{tx}}, d) \geq \text{PDR}_{\text{min}}$ і $f_{\text{pkt}} \geq f_{\text{min}}$

де d — відстань до шлюзу, визначає мінімально необхідний рівень сигналу, а отже мінімальний допустимий SF і P_{tx} .

Алгоритм оптимізації для кожного вузла:

1. За відстанню d і моделлю каналу визначити мінімальний $\text{RSS}(\text{SF}, P_{\text{tx}}) \geq$ чутливість приймача + запас (зазвичай +10 дБ).
2. Знайти мінімальну комбінацію $(\text{SF}, P_{\text{tx}})$, яка задовольняє умову RSS .
3. Розрахувати T_{life} для цієї комбінації.
4. Якщо $T_{\text{life}} < T_{\text{min_required}}$ — збільшити C_{bat} або зменшити f_{pkt} .

Ця процедура реалізується механізмом ADR у LoRaWAN: мережевий сервер на основі вимірювань RSS і SNR uplink-пакетів формує команди зміни SF і P_{tx} для кожного вузла окремо. Моделювання ADR у NS-3 реалізується через клас `LorawanMacEndDeviceClassA` з увімкненим прапорцем `m_adrEnabled = true`, що є обов'язковою частиною імітаційної моделі даного дослідження.

2.5. Критерії та метрики ефективності масштабованої системи (Packet Delivery Ratio, затримка, джитер, коефіцієнт покриття).

2.5.1. Система метрик і цільові показники

Оцінка ефективності IoT-мережі потребує множини взаємодоповнюючих показників, оскільки жодна одна метрика не відображає повної картини. Вибір конкретних метрик для даного дослідження визначається специфікою відкритої місцевості та вимогами до систем моніторингу. Цільові значення для проектованої системи:

Таблиця 2.5

Метрика	Позначення	Ціль	Критична межа
Ймовірність доставки пакету	PDR	$\geq 90\%$	$< 50\%$
Середня затримка доставки	$E[D]$	≤ 10 с	> 60 с
Джитер (СКВ затримки)	σ_D	≤ 3 с	> 15 с
Коефіцієнт покриття	C	$\geq 95\%$	$< 70\%$
Середнє споживання	I_{avg}	≤ 50 мкА	> 200 мкА

2.5.2. Packet Delivery Ratio (PDR)

PDR є первинною метрикою якості обслуговування і визначається як відношення кількості пакетів, успішно доставлених до мережевого сервера, до загальної кількості переданих пакетів:

$$PDR = N_{received} / N_{transmitted}$$

У контексті LoRaWAN розрізняють кілька рівнів PDR залежно від механізму підрахунку:

PDR_uplink — ймовірність того, що пакет uplink прийнятий хоча б одним шлюзом (враховуючи просторове різноманіття при кількох шлюзах):

$$PDR_{uplink} = 1 - (1 - p_{single})^{N_{gw}}$$

де $p_{single} = e^{(-2G/N_{gw})}$ — ймовірність прийому одним шлюзом.

PDR_confirmed — для підтверджуваних передавань з повторними спробами (Confirmed uplink, до 8 повторів):

$$\text{PDR_confirmed} = 1 - (1 - \text{PDR_uplink})^K$$

де K — максимальна кількість спроб. При $K = 3$ і $\text{PDR_uplink} = 0,7$:
 $\text{PDR_confirmed} = 1 - 0,3^3 = 97,3\%$.

PDR_end_to_end — від сенсора до серверу застосунків, враховуючи також втрати на рівні backhaul (Ethernet, 4G). Для надійного backhaul зазвичай $\text{PDR_e2e} \approx \text{PDR_uplink}$.

Статистична оцінка PDR за вибіркою обсягом n :

$$\text{PDR} \pm z_{\{\alpha/2\}} \cdot \sqrt{(\text{PDR} \cdot (1 - \text{PDR}) / n)}$$

Для 95% довірчого інтервалу ($z = 1,96$) при $n = 1\,000$ і $\text{PDR} = 0,9$:
 похибка $\pm 1,86\%$. Отже мінімально необхідний обсяг вибірки для оцінки PDR
 з похибкою $\pm 1\%$ при рівні довіри 95%: $n \geq 3\,457$ пакетів на вузол.

2.5.3. Затримка доставки

Затримка доставки D визначається як час від моменту готовності пакету до відправлення на вузлі до моменту його реєстрації на мережевому сервері.

Повна затримка складається з кількох компонентів:

$$D = T_{\text{wait}} + T_{\text{air}} + T_{\text{proc}} + T_{\text{backhaul}}$$

де T_{wait} — час очікування в черзі (зумовлений duty cycle або повторними передаваннями), T_{air} — час передачі у повітрі, T_{proc} — час обробки шлюзом (< 10 мс, нехтовно), T_{backhaul} — затримка backhaul-з'єднання (< 50 мс для Ethernet/4G).

Для Class A вузла без підтвердження (Unconfirmed uplink) при першій успішній спробі $D \approx T_{\text{air}}$. При повторних передаваннях:

$$E[D] = E[K] \cdot (T_{\text{air}} + T_{\text{back_off}})$$

де $E[K] = 1/\text{PDR_single}$ — середня кількість спроб, $T_{\text{back_off}}$ — випадкова затримка між спробами (рівномірний розподіл на $[1, W]$ секунд, де W — вікно back-off).

Застосовуючи формулу Полячека–Кінчина для M/G/1 (шлюз як сервер):

$$E[D | \text{unix}] = T_{\text{air}} \cdot (1 + \rho / (2 \cdot (1 - \rho))) + 1/\text{PDR_single} \cdot T_{\text{air}}$$

При $\rho = 0,5$ і $PDR = 0,7$: $E[D] = T_{air} \cdot (1 + 0,5) + 1,43 \cdot T_{air} = 2,93 \cdot T_{air}$.
 Для SF9 ($T_{air} = 0,185$ с): $E[D] \approx 0,54$ с — добре в межах цілі ≤ 10 с.

При $\rho \rightarrow 1$ (перевантаження): $E[D] \rightarrow \infty$ — система нестабільна.
 Практична межа стабільності: $\rho \leq 0,8$, що відповідає запасу продуктивності 20%.

2.5.4. Джитер (варіація затримки)

Джитер σ_D — середньоквадратичне відхилення затримки доставки — є критичним параметром для застосувань з часовою синхронізацією (наприклад, синхронізований збір вимірювань з кількох точок).

Для M/G/1 дисперсія затримки:

$$\text{Var}[D] = \lambda \cdot E[B^3] / (3 \cdot (1-\rho)) + \rho^2 \cdot E[B^2] / (2 \cdot (1-\rho)^2)$$

де B — час обслуговування. Для детермінованого $B = T_{air}$ (всі пакети однієї довжини):

$$\sigma_D = \sqrt{\text{Var}[D]} \approx T_{air} \cdot \rho / (\sqrt{2} \cdot (1-\rho))$$

При врахуванні невизначеності кількості повторних передавань (геометричний розподіл K з параметром $p = PDR_single$) додається складова:

$$\sigma_{retransmit} = T_{air} \cdot \sqrt{((1-p)/p^2)}$$

$$\text{Повний джитер: } \sigma_D = \sqrt{(\sigma_{queue}^2 + \sigma_{retransmit}^2 + \sigma_{backoff}^2)}$$

При $PDR = 0,8$ і SF9: $\sigma_{retransmit} = 0,185 \cdot \sqrt{(0,2/0,64)} \approx 0,103$ с.
 Сумарний джитер при помірному навантаженні: $\sigma_D \approx 0,2\text{--}0,5$ с — суттєво менше цілі 3 с. При $PDR < 0,5$ джитер різко зростає через непередбачувану кількість повторних спроб.

2.5.5. Коефіцієнт покриття

Коефіцієнт покриття C визначає частку площі (або частку вузлів), для якої рівень прийнятого сигналу перевищує поріг чутливості приймача з урахуванням запасу надійності:

$$C = P(RSS(x,y) \geq RSS_{min} + M_f)$$

де RSS_{min} — чутливість приймача для обраного SF (від -123 дБм для SF7 до -137 дБм для SF12), M_f — запас на завмирання (зазвичай 10 дБ для відкритої місцевості).

При логнормальному розподілі тіньового завмирання ($\sigma_{shadow} = 8$ дБ) і моделі LDPL:

$$C(d) = Q((PL(d) - RSS_{min} - M_f) / \sigma_{shadow})$$

де $Q(\cdot)$ — Q-функція (хвіст нормального розподілу). Для шлюзу в центрі зони покриття радіусом R :

$$C_{area} = (1/A) \cdot \iint P(RSS(x,y) \geq RSS_{min} + M_f) dx dy$$

Чисельне інтегрування цього виразу дає залежність C_{area} від R , яка використовується для визначення оптимальної відстані між шлюзами. При $\sigma_{shadow} = 8$ дБ, $M_f = 10$ дБ і $n = 2,5$ (LDPL): для $C \geq 95\%$ необхідно, щоб середній RSS на краю зони перевищував поріг на $1,65 \cdot \sigma_{shadow} \approx 13$ дБ.

Для мережі з N_{gw} шлюзами, рівномірно розподіленими по площі A :

$$C_{network} = 1 - (1 - C_{single}(R_{voronoi}))^{N_{gw_eff}}$$

де $R_{voronoi} = \sqrt{(A/(\pi \cdot N_{gw}))}$ — ефективний радіус зони Вороного кожного шлюзу.

2.5.6. Комплексний критерій ефективності

Для порівняння конфігурацій мережі в дослідженні застосовується скалярний комплексний критерій ефективності (Composite Performance Index, CPI):

$$CPI = w_1 \cdot PDR/PDR_{target} + w_2 \cdot (D_{target}/E[D]) + w_3 \cdot (\sigma_{target}/\sigma_D) + w_4 \cdot C/C_{target}$$

де $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ — вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети застосування. Для агромоніторингу рекомендовані ваги: $w_1 = 0,4$ (PDR найважливіший), $w_2 = 0,2$ (затримка менш критична для не-реального часу), $w_3 = 0,1$ (джитер незначний), $w_4 = 0,3$ (покриття важливе).

При $CPI \geq 1,0$ конфігурація задовольняє всі цільові показники. При $CPI < 0,7$ — конфігурація неприйнятна. Це дозволяє порівнювати сотні сценаріїв моделювання одним числом і автоматично ранжувати їх за ефективністю.

2.5.7. Похибки вимірювання метрик у симуляції

При обробці результатів імітаційного моделювання необхідно враховувати статистичну похибку оцінок. Для PDR мінімальна кількість пакетів n , необхідна для оцінки з похибкою ε при рівні довіри $1-\alpha$:

$$n \geq z^2_{\{\alpha/2\}} \cdot PDR \cdot (1-PDR) / \varepsilon^2$$

При $\varepsilon = 0,01$ і $\alpha = 0,05$: $n \geq 3\,457$ для $PDR = 0,9$. Кожен сценарій моделювання має генерувати не менше 5 000 пакетів на вузол для надійної оцінки всіх метрик. Для затримки і джитеру достатньо 500–1 000 вимірювань завдяки центральній граничній теоремі.

Висновки до розділу

Розроблено математичний апарат для оцінки якості зв'язку, що включає обґрунтований вибір моделей затухання радіосигналу (Okumura-Hata, COST231, Friis, Log-Distance Path Loss), адаптованих до умов відкритої місцевості, а також модель оцінки пропускної здатності мережі на основі випадкового доступу до середовища. Запропонована модель енергоспоживання кінцевих вузлів дозволяє прогнозувати автономність пристроїв залежно від режиму передачі даних та інтенсивності трафіку. Визначено систему критеріїв і метрик ефективності масштабованої системи зв'язку, що використовуються для подальшого порівняльного аналізу.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАСШТАБОВАНОЇ ІОТ-МЕРЕЖІ

3.1. Обґрунтування архітектури системи зв'язку

Вибір топології мережі є одним із ключових архітектурних рішень при проектуванні телекомунікаційної системи для IoT-пристроїв, розгорнутих на відкритій місцевості. Від обраної топології залежать такі системні характеристики, як масштабованість, надійність, затримка передачі даних, енергоефективність вузлів та вартість розгортання. У контексті даної роботи аналізуються три базові архітектурні підходи: топологія «зірка» (централізована), топологія «комірка/mesh» (розподілена) та гібридна топологія.

Топологія «зірка»

У топології «зірка» всі кінцеві вузли (сенсори, IoT-пристрої) безпосередньо з'єднуються з єдиною базовою станцією (BS) або шлюзом. Така архітектура є найпростішою з точки зору управління мережею — весь трафік проходить через центральний вузол, що спрощує моніторинг, синхронізацію та оновлення програмного забезпечення вузлів.

Перевагами даної топології є мінімальна затримка передачі даних (один хоп від вузла до шлюзу), низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв (відсутність ретрансляції), а також простота налаштування та

обслуговування. Однак топологія «зірка» має принципові обмеження для застосування на відкритій місцевості:

- радіус покриття одиничної базової станції обмежений потужністю передавача та характеристиками поширення радіохвиль;
- наявність єдиної точки відмови — вихід із ладу базової станції призводить до повного відключення всієї мережі;
- погана масштабованість при збільшенні площі покриття — потребує встановлення додаткових незалежних BS;
- значне навантаження на центральний вузол при великій кількості пристроїв.

З урахуванням зазначених недоліків топологія «зірка» у чистому вигляді не є оптимальним рішенням для масштабних IoT-мереж на відкритій місцевості, проте може ефективно використовуватись як складова частина гібридної архітектури.

Топологія «комірка/mesh»

Mesh-топологія (сіткова або комірчаста) передбачає рівноправність вузлів мережі: кожен пристрій може виступати як кінцевим, так і ретрансляційним вузлом. Дані передаються від джерела до шлюзу через ланцюжок проміжних вузлів (мультихопова маршрутизація). Ця архітектура є самоорганізованою та самовідновлювальною — при відмові будь-якого вузла мережа автоматично знаходить альтернативний маршрут.

Mesh-топологія забезпечує широке покриття без потреби у потужній інфраструктурі базових станцій, що є суттєвою перевагою для розгортання на відкритій місцевості. Разом із тим вона має ряд обмежень:

- підвищене енергоспоживання вузлів через виконання функцій ретрансляції;
- зростаюча затримка зі збільшенням кількості хопів до шлюзу;
- складність маршрутизації та керування топологією при великій кількості вузлів;

- нерівномірне завантаження вузлів (вузли поблизу шлюзу перевантажені ретрансляційним трафіком).

Незважаючи на зазначені недоліки, mesh-топологія є ефективним підходом для забезпечення відмовостійкості та широкого покриття, і її елементи доцільно інтегрувати в гібридну архітектуру.

Гібридна топологія (кластерна ієрархічна архітектура)

Гібридна топологія поєднує переваги обох розглянутих підходів і усуває їхні ключові недоліки. В рамках даної роботи пропонується ієрархічна кластерна архітектура, що складається з трьох рівнів:

- рівень кінцевих вузлів — IoT-сенсори та виконавчі пристрої, які передають дані лише до найближчого кластерного голови (принцип «зірки»);
- рівень кластерних голів (Cluster Head, CH) — пристрої середнього рівня, що агрегують трафік від групи кінцевих вузлів та забезпечують ретрансляцію до шлюзу (принцип «mesh» між CH);
- рівень шлюзу (Gateway) — базова станція або хмарний сервер, що здійснює централізовану обробку та управління мережею.

Така архітектура дозволяє досягти компромісу між масштабованістю, надійністю та енергоефективністю. Кінцеві вузли, що складають більшість пристроїв, функціонують у режимі мінімального енергоспоживання. Кластерні голови, яких значно менше, беруть на себе навантаження ретрансляції та агрегації даних. Між кластерними головами може організовуватись mesh-з'єднання для забезпечення резервних шляхів передачі.

Алгоритм вибору кластерних голів може бути реалізований на основі відомих протоколів, таких як LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), або його модифікацій, адаптованих до умов відкритої місцевості. При цьому враховуються такі параметри вузла: залишковий заряд

акумулятора, якість радіоканалу (RSSI/SNR) до сусідніх вузлів та шлюзу, а також географічне положення.

Таблиця 3.1

Порівняльний аналіз топологій мереж зв'язку для IoT на відкритій місцевості

Критерій	Зірка	Mesh / комірка	Гібридна
Масштабованість	Середня (обмежена центром)	Висока (додаються вузли без центру)	Висока (гнучке розширення)
Надійність	Низька (єдина точка відмови)	Дуже висока (багатошляхова маршрутизація)	Висока (резервні шляхи через вузли)
Затримка передачі	Мінімальна (1 хоп)	Змінна (до N хопів)	Низька ($\leq 2-3$ хопи до шлюзу)
Енергоспоживання вузлів	Низьке (вузли не ретранслюють)	Підвищене (ретрансляція трафіку)	Помірне (ретранслюють лише кластерні голови)
Покриття відкритої місцевості	Обмежене (залежить від радіусу BS)	Широке (самоорганізація)	Широке (кластери + шлюз)
Складність розгортання	Проста	Середня	Середня
Керованість мережі	Висока (централізована)	Низька (розподілена)	Висока (ієрархічна)
Придатність для IoT у полі	Обмежена	Добра, але надлишкова	Оптимальна

Обґрунтування вибору архітектури

На основі проведеного порівняльного аналізу (табл. 3.1) для розроблюваної системи зв'язку обрано гібридну ієрархічну кластерну топологію. Це рішення обґрунтовується наступним чином.

По-перше, відкрита місцевість передбачає значні відстані між вузлами та відсутність стаціонарної інфраструктури. За таких умов покладатись виключно на топологію «зірка» неможливо через обмежений радіус покриття базової станції. Водночас чиста mesh-топологія призводить до надмірного споживання енергії рядовими вузлами, що критично для автономних пристроїв на батарейному живленні.

По-друге, гібридна архітектура забезпечує ієрархічну масштабованість: при необхідності розширення мережі достатньо додати нові кластери без реконфігурації всієї системи. Кількість кінцевих вузлів може зростати в межах кожного кластера без збільшення навантаження на шлюз.

По-третє, кластеризація підвищує відмовостійкість системи: при відмові одного з кластерних голів суміжні СН можуть прийняти на себе обслуговування частини вузлів (через механізм перекластеризації). При цьому функціонування решти мережі не порушується.

По-четверте, агрегація даних на рівні кластерних голів суттєво зменшує обсяг трафіку, що передається до шлюзу, що є важливим фактором для обмежених каналів зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT).

Таким чином, гібридна ієрархічна топологія є оптимальним архітектурним рішенням для масштабованої телекомунікаційної системи IoT на відкритій місцевості, що поєднує переваги централізованого управління та розподіленої маршрутизації.

3.2. Вибір середовища імітаційного моделювання

Коректний вибір середовища імітаційного моделювання є необхідною передумовою отримання достовірних результатів дослідження. Для IoT-систем зв'язку на відкритій місцевості середовище моделювання повинне задовольняти ряду специфічних вимог: підтримка бездротових протоколів малої потужності (LoRa, IEEE 802.15.4, Zigbee), моделювання енергетичного бюджету вузлів, відтворення геопросторових сценаріїв з нерівномірним розподілом вузлів, а також зручна візуалізація топології та результатів симуляції.

У даному розділі проводиться порівняльний аналіз чотирьох провідних середовищ імітаційного моделювання комп'ютерних мереж та IoT-систем: NS-3, OMNeT++, MATLAB/Simulink і CupCarbon. Кожне з них має власні переваги та обмеження, що визначають доцільність застосування у конкретному науково-прикладному контексті.

NS-3 (Network Simulator 3)

NS-3 — це дискретно-подієвий симулятор комп'ютерних мереж з відкритим вихідним кодом, що розробляється під ліцензією GPL. Система написана на C++ з можливістю скриптування на Python. Симулятор підтримує широкий спектр мережевих протоколів — від Ethernet та WiFi до LTE і часткову підтримку IoT-протоколів через зовнішні модулі (наприклад, lorawan-ns3, 6LoWPAN).

До переваг NS-3 належать висока точність моделювання на рівні пакетів, активна спільнота розробників та велика бібліотека готових моделей. Разом із тим, NS-3 має суттєві обмеження для завдань даної роботи:

- висока складність налаштування середовища та написання симуляційних скриптів (C++) вимагає значних часових витрат;
- обмежена вбудована підтримка LoRaWAN та механізмів кластеризації IoT-вузлів;

- відсутність зручного інструменту для геопросторової візуалізації топології на карті;
- моделювання енергоспоживання потребує додаткових бібліотек (Energy Framework), що не повністю підтримує специфіку LPWAN-пристроїв.

OMNeT++ / INET Framework

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) є компонентно-орієнтованим симулятором з модульною архітектурою, заснованою на мові опису мереж NED. Разом із фреймворком INET та спеціалізованим пакетом Castalia (для безпроводних сенсорних мереж) OMNeT++ формує потужну екосистему для дослідження IoT-мереж.

OMNeT++ підтримує детальне моделювання енергетичного балансу вузлів, мобільності, інтерференції та різноманітних MAC/PHY-протоколів. Фреймворк Castalia, зокрема, спеціально розроблявся для безпроводних сенсорних мереж із низьким енергоспоживанням. Графічний інтерфейс Qtenv забезпечує зручну візуалізацію подій і стану мережі. Проте OMNeT++ також має недоліки:

- крута крива навчання, особливо при освоєнні мови NED та архітектури компонентів;
- академічна ліцензія обмежує комерційне застосування;
- підтримка LoRa/LoRaWAN реалізована через сторонні модулі (FLoRa), що ускладнює їх інтеграцію;
- налаштування геопросторових сценаріїв вимагає додаткової конфігурації системи мобільності.

MATLAB / Simulink

MATLAB з пакетом розширень Simulink є широко відомим інструментом математичного моделювання та симуляції. Для

телекомунікаційних застосувань використовуються спеціалізовані тулбокси: Communications Toolbox, Wireless HDL Toolbox та SimEvents для дискретно-подієвого моделювання. MATLAB забезпечує першокласні інструменти для аналітичного моделювання, обробки сигналів і статистичного аналізу результатів.

Тим не менш, MATLAB/Simulink має принципові обмеження для даної задачі:

- комерційна ліцензія зі значною вартістю обмежує доступність;
- відсутність нативної підтримки LoRa/LoRaWAN та протоколів кластеризації IoT;
- середовище орієнтоване на аналітичне та неперервне моделювання, а не на дискретно-подієву симуляцію великих мереж;
- масштабованість при моделюванні мереж із сотнями вузлів є обмеженою порівняно з NS-3 або OMNeT++;
- відсутність геопросторової візуалізації топології мережі на карті.

CupCarbon

CupCarbon — це симулятор безпроводних сенсорних та IoT-мереж з відкритим вихідним кодом (GPL), розроблений у Страсбурзькому університеті. На відміну від інших розглянутих середовищ, CupCarbon інтегрує інтерактивну картографічну основу (OpenStreetMap), що дозволяє безпосередньо розміщувати вузли мережі на реальній географічній місцевості та відображати їх покриття і топологію.

CupCarbon підтримує широкий спектр бездротових технологій: LoRa/LoRaWAN, IEEE 802.15.4, Zigbee, WiFi, а також власну мову скриптування SenScript для програмування поведінки вузлів. Особливо важливою є вбудована модель енергоспоживання, що дозволяє відстежувати розряд акумулятора кожного вузла протягом симуляції. Основні характеристики CupCarbon, що визначають його перевагу для даної роботи:

- вбудована інтерактивна карта на основі OpenStreetMap — можливість розміщення вузлів з реальними координатами для сценаріїв відкритої місцевості;
- повна підтримка LoRa/LoRaWAN, IEEE 802.15.4, Zigbee без необхідності встановлення сторонніх модулів;
- детальна модель енергоспоживання з можливістю відображення залишкового заряду кожного вузла;
- низький поріг входу — графічний інтерфейс спрощує побудову сценаріїв без глибоких знань мови програмування;
- підтримка дискретно-подієвого моделювання передачі пакетів із врахуванням інтерференції та моделей розповсюдження сигналу;
- безкоштовність та відкритий вихідний код — відсутні ліцензійні обмеження для академічного використання.

Обмеженнями CupCarbon є менша масштабованість порівняно з NS-3/OMNeT++ (рекомендована кількість вузлів — до 500) та відсутність апаратної інтеграції типу hardware-in-the-loop. Однак для сценаріїв відкритої місцевості з кількістю вузлів, що не перевищує зазначеного ліміту, ці обмеження не є критичними.

Порівняльний аналіз середовищ імітаційного моделювання IoT-мереж

Критерій	NS-3	OMNeT++	MATLAB Simulink	CupCarbon
Мова програмування / скриптування	C++, Python	C++, NED	MATLAB, Simulink	Java, SenScript
Підтримка IoT-протоколів (LoRa, Zigbee, 6LoWPAN)	Часткова (модулі)	Повна (INET, Castalia)	Обмежена	LoRa, Zigbee, IEEE 802.15.4
Моделювання енергоспоживання вузлів	Обмежена	Висока (Castalia)	Висока (SimPowerSystems)	Висока (вбудована)
Підтримка геопросторового сценарію (відкрита місцевість)	Середня	Висока (MoBAN, INET)	Середня	Висока (вбудована карта)
Візуалізація топології та трафіку в реальному часі	Слабка (OSPFd, QtEnv)	Добра (Qtenv, Tkenv)	Добра (Simulink)	Відмінна (інтерактивна карта)
Складність налаштування та крива навчання	Висока	Висока	Середня	Низька
Відкритий вихідний код / безкоштовність	Так (GPL)	Так (Academic)	Ні (комерційна)	Так (GPL)
Масштабованість (кількість вузлів)	Дуже висока	Дуже висока	Середня	До ~500 вузлів
Інтеграція з реальним обладнанням / трасами	Можлива (emulation)	Можлива	Так (Hardware-in-loop)	Обмежена
Придатність для кластерних IoT-мереж (відкрита місцевість)	Середня	Висока	Середня	Висока

Обґрунтування вибору CupCarbon

На основі проведеного порівняльного аналізу (табл. 3.2) для імітаційного моделювання телекомунікаційної системи IoT на відкритій місцевості обрано середовище CupCarbon. Дане рішення ґрунтується на таких аргументах.

По-перше, CupCarbon є єдиним із розглянутих середовищ, що безпосередньо інтегрує геопросторову картографічну основу. Це принципово важливо для сценарію відкритої місцевості, де розміщення вузлів на реальних координатах та візуалізація зон покриття є невід'ємними складовими аналізу.

По-друге, CupCarbon забезпечує нативну підтримку технологій LoRa/LoRaWAN — ключових протоколів для IoT-мереж на відкритій місцевості з великими відстанями між вузлами. Відсутність необхідності інтегрувати сторонні модулі суттєво спрощує налаштування симуляційного середовища та підвищує достовірність результатів.

По-третє, вбудована модель енергоспоживання CupCarbon дозволяє кількісно оцінювати термін служби акумуляторів вузлів — параметр, критичний для оцінки ефективності кластерних алгоритмів, де балансування навантаження між кластерними головами безпосередньо впливає на час автономної роботи мережі.

По-четверте, відносно низька складність освоєння CupCarbon порівняно з NS-3 та OMNeT++ дозволяє зосередити дослідницькі зусилля на аналізі результатів моделювання, а не на розробці симуляційної інфраструктури. Бібліотека готових прикладів та документація спрощують налаштування сценаріїв.

По-п'яте, відкритий вихідний код та безкоштовність CupCarbon є важливими факторами для академічного дослідження, що забезпечують відтворюваність результатів незалежними дослідниками без необхідності придбання ліцензій.

Таким чином, CupCarbon найбільш повно відповідає сукупності вимог даної дипломної роботи: підтримка LoRa-протоколів, геопросторова візуалізація, моделювання енергоспоживання та доступність. Середовище буде використовуватись для побудови імітаційних моделей у розділі 4, де реалізовуватиметься гібридна кластерна топологія для сценаріїв відкритої місцевості.

3.3. Розробка сценаріїв моделювання для різної щільності IoT-пристроїв на відкритій місцевості (від 100 до 10 000+ вузлів)

3.3.1. Загальна концепція сценарного підходу

Сценарний підхід до моделювання телекомунікаційних мереж IoT є методологічним інструментом, що дозволяє систематично досліджувати поведінку мережі при різних умовах розгортання. На відміну від єдиного узагальненого тесту, кожен сценарій відтворює конкретну комбінацію щільності вузлів, площі покриття, протокового стеку та навантаження, що уможливорює порівняльний аналіз і вибір оптимальної конфігурації для реального впровадження.

Відповідно до мети дипломної роботи — дослідження масштабованих телекомунікаційних систем для відкритої місцевості — розроблено чотири базові сценарії моделювання, що охоплюють діапазон від малих мереж (100 вузлів) до надвисокої щільності (понад 10 000 вузлів). Вибір меж діапазону обумовлений типовими завданнями прецизійного землеробства, екологічного моніторингу та систем розумної інфраструктури.

Кожен сценарій характеризується такими параметрами:

- кількістю та просторовим розподілом вузлів;
- площею зони покриття та рельєфом місцевості;
- набором використовуваних протоколів (LoRaWAN, NB-IoT, 5G NR);
- патерном генерації трафіку та циклічністю передачі даних;
- моделлю мобільності або стаціонарності вузлів;

- рівнем завантаженості каналу та алгоритмом управління доступом до середовища.

Таблиця 3.3

Загальна характеристика сценаріїв моделювання

Сценарій	Кількість вузлів	Площа поля	Протоколи	Завантаженість каналу	Призначення
С-1 «Мала»	100	1×1 km	LoRaWAN, NB-IoT	Низьке (до 5%)	Базовий рівень
С-2 «Середня»	500	2×2 km	LoRaWAN, NB-IoT	Помірне (5–15%)	Стандартні умови
С-3 «Висока»	2 000	3×3 km	LoRaWAN, NB-IoT, 5G NR	Середнє (15–30%)	Масштабування
С-4 «Надвисока»	10 000+	5×5 km	5G NR, LoRaWAN	Значне (30–50%)	Стрес-тест

3.3.2. Сценарій С-1 «Мала щільність» (100 вузлів)

Сценарій С-1 є базовим референсним сценарієм, що моделює типову мережу сільськогосподарського IoT невеликого фермерського господарства. Сто сенсорних вузлів рівномірно розподіляються на ділянці розміром 1×1 км із середньою відстанню між сусідніми вузлами близько 100 м. Така конфігурація відповідає густоті, що рекомендується для систем моніторингу ґрунтів при забезпеченні просторової роздільної здатності вимірювань порядку 50–100 м.

Мережева архітектура С-1 базується на протоколі LoRaWAN з одним базовим шлюзом (gateway), розміщеним у центрі зони покриття на висоті 10 м над рівнем поверхні. Вузли конфігуруються за класом А (двонапрямлений з відкладеними вікнами прийому), що забезпечує мінімальне споживання енергії при допустимій затримці відповіді мережевого сервера. Параметри розповсюдження радіосигналу визначаються моделлю Log-Distance Path Loss для відкритої місцевості.

Генерація трафіку в С-1 моделюється як сукупність незалежних пуасонівських потоків з наступними характеристиками:

- інтервал між пакетами: 15 хвилин (96 пакетів/добу на вузол);
- розмір пакету: 20–50 байт (дані датчиків температури, вологості, рН ґрунту);
- розмір мережевого заголовка LoRaWAN: 13 байт;
- коефіцієнт розширення (SF): SF7–SF9 за алгоритмом ADR;
- смуга пропускання: 125 кГц, CR=4/5.

Очікуване сумарне навантаження на шлюз становить менше 1% від допустимого Duty Cycle, що забезпечує надійну доставку пакетів без колізій. Сценарій С-1 виступає еталоном для верифікації симуляційної моделі шляхом зіставлення отриманих результатів з аналітичними оцінками та даними натурних вимірювань.

3.3.3. Сценарій С-2 «Середня щільність» (500 вузлів)

Сценарій С-2 відповідає стандартним умовам розгортання регіональної агроекологічної моніторингової мережі. П'ятсот вузлів розподіляються на площі 2×2 км (4 км^2), утворюючи середню щільність 125 вузлів/км². Для відтворення реалістичних умов відкритої місцевості просторовий розподіл вузлів задається як неоднорідний за рівномірним на підділянках із гаусівськими флуктуаціями $\pm 20\%$.

На відміну від С-1, сценарій С-2 передбачає розгортання паралельно двох протокольних стеків:

1. LoRaWAN (SF7–SF12, BW=125/250 кГц) — для вузлів з батарейним живленням і нижчими вимогами до затримки;
2. NB-IoT (Band 20, 800 МГц) — для вузлів, що потребують надійнішої QoS або розміщені в зонах зниженого покриття LoRa.

Гетерогенна архітектура з двома протоколами вимагає моделювання взаємних завад між системами. У симуляційному середовищі NS-3 це реалізується через спільну модель каналного рівня (channel model) із частотним рознесенням: LoRaWAN працює в діапазоні 868 МГц (ISM), NB-IoT — 800 МГц (ліцензований спектр), що мінімізує взаємні інтерференційні ефекти.

Ключовою особливістю С-2 є введення кластерної топології: п'ять кластерних головних вузлів (cluster head, CH) рівномірно розподіляються по зоні та виконують функції агрегації даних від 100 підпорядкованих вузлів кожен. Алгоритм вибору CH реалізується за протоколом LEACH-C (Centralized LEACH) з циклом ротації 24 години. Трафік в С-2 включає два класи:

- клас А (телеметрія): 30-хвилинні інтервали, 20–50 байт;
- клас В (алерти): асинхронна генерація при перевищенні порогів, до 10 пакетів/год на вузол.

3.3.4. Сценарій С-3 «Висока щільність» (2 000 вузлів)

Сценарій С-3 моделює умови розвиненої розумної сільськогосподарської зони або великого індустріального майданчика з насиченою IoT-інфраструктурою. Два тисячі вузлів розміщуються на площі 9 км² (3×3 км) при середній щільності 222 вузли/км². Такий рівень щільності є критичним для протоколу LoRaWAN через обмеження Duty Cycle (1% у діапазоні 868 МГц), тому С-3 вперше вводить третій протокольний стек — 5G NR (New Radio) у поєднанні з LoRaWAN та NB-IoT.

Розподіл вузлів по протоколах у С-3 здійснюється за принципом функціональної диференціації:

- LoRaWAN (60%): вузли з рідкісною передачею даних (інтервал ≥ 30 хв), живлення від батарей;

- NB-IoT (30%): вузли із середньою частотою передачі (5–15 хв), мережеве або батарейне живлення;
- 5G NR FR1 (10%): вузли реального часу (відеоспостереження, безпілотні платформи, латентність < 20 мс).

Для С-3 розробляється деталізована модель просторового розподілу з урахуванням топографічних особливостей відкритої місцевості. Вводиться шаблон рельєфу на основі статистичної моделі Гауса: стандартне відхилення висот $\sigma_h = 5$ м, кореляційна довжина $L_c = 200$ м. Ці параметри впливають на радіус покриття кожної базової станції та визначають необхідну кількість точок доступу.

Сценарій С-3 є основним для дослідження масштабованості: введення 5G NR дозволяє розвантажити канал LoRaWAN при критичному рівні завантаженості та забезпечити якість обслуговування (QoS) для латентно-чутливих застосунків. Метрикою ефективності гетерогенної мережі виступає композитний показник ефективності передачі (Network Delivery Efficiency, NDE):

$$NDE = (N_{\text{delivered}} / N_{\text{sent}}) \times (1 - \text{PLR}) \times (T_{\text{avg}} / T_{\text{threshold}})^{-1},$$

де $N_{\text{delivered}}$ — кількість успішно доставлених пакетів, N_{sent} — кількість надісланих, PLR — рівень втрат пакетів, T_{avg} — середня затримка, $T_{\text{threshold}}$ — граничне значення затримки для класу трафіку.

3.3.5. Сценарій С-4 «Надвисока щільність» (10 000+ вузлів)

Сценарій С-4 є стрес-тестом масштабованості телекомунікаційної системи та відтворює умови великомасштабного промислового розгортання або смарт-міста на відкритому майданчику. Понад 10 000 вузлів розміщуються на площі 25 км² (5×5 км) при щільності понад 400 вузлів/км². При такій щільності традиційні схеми множинного доступу (ALOHA для

LoRaWAN) стають неефективними внаслідок катастрофічного зростання колізій.

Ключовою відмінністю С-4 є повна реконфігурація архітектури мережевого доступу:

3. Перехід від дистрибутованого до ієрархічного управління доступом: введення рівня мережевих контролерів (Network Controller, NC) між шлюзами та хмарною платформою.
4. Застосування техніки просторового мультиплексування (Spatial Division Multiple Access, SDMA) для базових станцій 5G NR із масивними антенними решітками (Massive MIMO, 64T64R).
5. Динамічне перепризначення несучих частот LoRaWAN на основі алгоритму оптимізації SF-розподілу (Enhanced Adaptive Data Rate, E-ADR).
6. Введення схеми агрегації даних на рівні туманних обчислень (Fog Computing Layer) для зменшення трафіку до хмарної платформи в 10–50 разів.

Для забезпечення коректної симуляції С-4 в NS-3 необхідне партиціонування простору моделі: зона 5×5 км ділиться на 25 підзон 1×1 км, кожна з яких моделюється як окремий симуляційний екземпляр з подальшим агрегуванням статистики. Таке розбиття зумовлене обчислювальними обмеженнями: повна симуляція 10 000+ вузлів у єдиному просторі вимагає понад 64 ГБ оперативної пам'яті при горизонті симуляції 24 год.

Інтегральним показником успішності сценарію С-4 є дотримання цільових значень QoS при навантаженні, що в 100 разів перевищує рівень сценарію С-1, що відповідає реальним вимогам до масштабованості систем промислового IoT.

3.3.6. Параметри протоколів та модель радіоканалу

Для забезпечення порівнянності результатів між сценаріями встановлено єдиний набір протокольних параметрів, що використовується як

стартова конфігурація в кожному симуляційному запуску. Динамічні зміни параметрів (наприклад, SF-адаптація алгоритмом ADR) фіксуються в журналах симуляції для подальшого аналізу.

Таблиця 3.4

Параметри протоколів для базових та розширених сценаріїв

Параметр	LoRaWAN / NB-IoT	LoRaWAN / NB-IoT / 5G NR (C-3, C-4)
Потужність передачі (dBm)	14 / 23	14–23 / 23 / 46
Чутливість приймача (dBm)	–137 / –114	–137 / –114 / –100
Смуга пропускання	125–500 kHz	125–500 kHz / 180 kHz / 100 MHz
Швидкість передачі даних	0.25–5.47 kbps	0.25–5.47 kbps / 250 kbps / 100+ Mbps
Радіус покриття (відкр. місц.)	2–15 km	2–15 km / 1–10 km / 0.1–1 km
Час активності (Duty Cycle)	1%	1% / – / < 0.1%
Споживання в режимі сну (мА)	1–2 / 5	1–2 / 5 / 10+
Топологія мережі	Зірка	Зірка / Зірка / Клітинна

Модель поширення радіосигналу для всіх сценаріїв базується на Log-Distance Path Loss моделі з корекційними коефіцієнтами для відкритої місцевості. Повна модель втрат шляху (path loss) описується виразом:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d/d_0) + X_{\sigma} \text{ [дБ]},$$

де $PL(d_0)$ — втрати на референсній відстані $d_0 = 1$ м, n — показник загасання ($n = 2.0$ – 2.5 для відкритої місцевості), X_{σ} — логнормальна складова завмирань із стандартним відхиленням $\sigma = 6$ – 8 дБ. Параметри

моделі уточнюються за результатами калібрувальних вимірювань, описаних у підрозділі 3.2.

3.3.7. Цільові показники ефективності (KPI) за сценаріями

Для об'єктивного порівняння результатів моделювання між сценаріями та оцінки якості масштабування системи визначено набір ключових показників ефективності (Key Performance Indicators, KPI). Цільові значення KPI сформовано на основі вимог стандартів ETSI TS 103 859 (LoRaWAN QoS), 3GPP TS 36.888 (NB-IoT) та ITU-T Y.2067 (загальні вимоги IoT-мереж) з урахуванням специфіки відкритої місцевості.

Таблиця 3.5

Цільові значення KPI для кожного сценарію моделювання

Показник ефективності (KPI)	C-1	C-2	C-3	C-4
Пропускна здатність (Throughput)	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$	$\geq 85\%$	$\geq 70\%$
Затримка доставки пакетів (мс)	≤ 500	≤ 800	≤ 1500	≤ 3000
Рівень втрати пакетів (PLR, %)	≤ 1	≤ 3	≤ 7	≤ 15
Коефіцієнт використ. ресурсів	≤ 0.30	≤ 0.50	≤ 0.70	≤ 0.90
RSSI (дБм), медіана	≥ -110	≥ -115	≥ -120	≥ -125
SNR (дБ), медіана	≥ 8	≥ 5	≥ 3	≥ 1

Порогові значення KPI посилюються зі збільшенням кількості вузлів, відображаючи об'єктивне погіршення якості обслуговування при зростанні щільності мережі. Перевищення граничних значень KPI за результатами моделювання є підставою для оптимізації конфігурації сценарію або зміни архітектурного рішення.

3.3.8. Алгоритми маршрутизації та управління мобільністю

Вибір алгоритму маршрутизації суттєво впливає на ефективність мережі та залежить від щільності вузлів, наявності мобільних елементів і топології розгортання. Для кожного сценарію визначено рекомендований набір протоколів маршрутизації, що відповідає специфічним умовам моделювання.

Таблиця 3.6

Відповідність алгоритмів маршрутизації сценаріям моделювання

Протокол маршрутизації	Мобільність вузлів	Централізоване управління	Умова застосування	Рекомендовані сценарії
AODV (Ad hoc On-Demand Vector)	+	—	Рівномірна щільність	C-1, C-2
DSDV (Destination Sequenced DV)	+	—	Стаціонарні вузли	C-1
OSPF-IoT (розшир.)	—	+	Кластерна топологія	C-2, C-3
RPL (IPv6 Routing Protocol)	—	+	Неоднорідна щільність	C-3, C-4
LoRaWAN ADR (Adaptive DR)	—	—	Висока завантаженість	C-3, C-4

У сценаріях C-3 і C-4 передбачається можливість появи мобільних вузлів (автономні транспортні засоби, дрони, мобільні сенсорні платформи) з моделлю мобільності Random Waypoint (RWP) при швидкості 0.5–5 м/с. Вплив мобільності на стабільність маршрутів моделюється через метрику Link Lifetime (LLT), що характеризує середній час існування з'єднання між парою вузлів при заданих параметрах руху.

3.3.9. Підсумок розробки сценаріїв

Розроблені чотири сценарії моделювання охоплюють повний спектр умов розгортання IoT-мереж на відкритій місцевості — від малих мереж до масштабних систем із понад 10 000 вузлів. Кожен сценарій характеризується детально специфікованими параметрами мережевої архітектури, протокольного стеку, трафікового навантаження та цільових KPI.

Сценарний підхід забезпечує:

- систематичне дослідження масштабованості системи шляхом поступового нарощування щільності вузлів;
- ізольований аналіз впливу кожного протоколу (LoRaWAN, NB-IoT, 5G NR) на загальну ефективність;
- верифікацію симуляційної моделі через порівняння з аналітичними оцінками (C-1) та натурними даними (C-2);
- ідентифікацію граничних умов і «вузьких місць» телекомунікаційної системи при екстремальному навантаженні (C-4).

3.4. Алгоритми оптимізації розподілу каналів, потужності передавачів та швидкості передачі даних (наприклад, ADR у LoRaWAN)

3.4.1. Постановка задачі оптимізації в IoT-мережах відкритої місцевості

Телекомунікаційні IoT-мережі відкритої місцевості функціонують в умовах обмеженості радіоресурсів (смуга пропускання, потужність

передавачів, ємність каналу) за одночасного зростання кількості вузлів та гетерогенності вимог до якості обслуговування. Задача оптимізації ресурсів зводиться до спільного управління трьома взаємопов'язаними параметрами: розподілом каналів (Channel Allocation, CA), потужністю передавачів (Transmit Power Control, TPC) та швидкістю передачі даних (Data Rate Adaptation, DRA).

Ці три параметри є взаємозалежними: підвищення потужності передавача збільшує радіус покриття, але зростає рівень завад для сусідніх вузлів; збільшення швидкості передачі скорочує час зайнятості каналу, але вимагає вищого SNR; вибір каналу впливає на рівень міжсистемних завад. Математично задача оптимізації формулюється як багатокритеріальна:

$$\begin{aligned} \max F(SF, P_TX, CH) &= \alpha \cdot PDR + \beta \cdot E_efficiency - \gamma \cdot Interference \\ \text{subject to: } SF &\in \{7, \dots, 12\}, P_TX \in [2, 20] \text{ дБм}, CH \in \{1, \dots, N_ch\}, \\ Duty Cycle &\leq 1\%, PDR \geq PDR_min, P_TX \leq P_max, \end{aligned}$$

де PDR (Packet Delivery Ratio) — частка успішно доставлених пакетів; E_efficiency — питома енергоефективність (біт/Дж); Interference — агрегований рівень міжвузлових завад; α , β , γ — вагові коефіцієнти пріоритету. Вибір значень $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.3$, $\gamma = 0.2$ обґрунтовано ієрархією вимог: надійність доставки є першочерговою для застосунків IoT-моніторингу, тоді як енергоефективність критична для автономних вузлів.

Розв'язання задачі у повному обсязі є NP-складним при $N > 100$ вузлів, що обумовлює застосування евристичних та навчальних алгоритмів. У підрозділі 3.4 розглядаються три класи методів оптимізації: стандартний і розширений ADR для LoRaWAN, алгоритми керування потужністю для NB-IoT та 5G NR, а також алгоритм на основі навчання з підкріпленням як універсальний підхід для гетерогенних мереж.

3.4.2. Стандартний алгоритм ADR у LoRaWAN: принцип роботи та обмеження

Adaptive Data Rate (ADR) є стандартним механізмом оптимізації LoRaWAN, визначеним у специфікації LoRa Alliance TS001-1.0.4. Алгоритм ADR виконується на стороні мережевого сервера (Network Server, NS) та управляє двома параметрами кожного вузла: коефіцієнтом розширення (Spreading Factor, SF) і потужністю передавача (TX Power). Мета алгоритму — мінімізувати час зайнятості каналу (Time on Air, ToA) при забезпеченні заданого рівня надійності.

Стандартний ADR ґрунтується на аналізі скользящего вікна з 20 останніх прийнятих пакетів. Для кожного вузла NS зберігає масив $SNR_history = \{snr_1, snr_2, \dots, snr_{20}\}$ та обчислює максимальне значення SNR_max . Запас (margin) відносно порогового значення визначається як:

$$Margin = SNR_max - SNR_req(SF) - Installation_Margin,$$

де $SNR_req(SF)$ — мінімальне необхідне SNR для поточного SF (від -7.5 дБ при SF7 до -20 дБ при SF12); $Installation_Margin = 10$ дБ — запас на нестационарність каналу. Кількість кроків зниження SF визначається як:

$$NStep = floor(Margin / 3),$$

де 3 дБ — приріст чутливості при збільшенні SF на один крок. Алгоритм ADR реалізує наступну логіку: якщо $NStep > 0$, спочатку знижується TXPower до мінімуму (кроками по -3 дБм), і лише після досягнення мінімальної потужності — знижується SF. У зворотному напрямку (при погіршенні каналу) SF підвищується самим вузлом після $N_ADR_ACK_LIMIT = 64$ невдалих підтверджень.

Таблиця 3.7

Відповідність SF, швидкості передачі та умов застосування у LoRaWAN

SF	DR (кбіт/с)	BW (кГц)	TXPower max (дБм)	Мін. RSSI (дБм)	Час передачі (відн.)	Завантаж. каналу
SF7	5.47	125	+14	≥ -107.5	~2	Висока
SF8	3.13	125	+14	≥ -112.5	~4	Висока
SF9	1.76	125	+14	≥ -115	~8	Середня
SF10	0.98	125	+14	≥ -117.5	~16	Середня
SF11	0.54	125	+11.5	≥ -120	~32	Низька
SF12	0.29	125	+8.5	≥ -122.5	~64	Дуже низька

Обмеженням стандартного ADR є реакційний (а не проактивний) характер алгоритму: він реагує на вже зафіксоване погіршення якості каналу з затримкою, пропорційною розміру вікна (20 пакетів $\times$ інтервал передачі). При інтервалі 15 хвилин затримка реакції становить 5 годин, що неприйнятно при динамічних змінах середовища. Крім того, стандартний ADR не враховує стан каналу інших вузлів, що призводить до субоптимальних рішень при щільному розгортанні (сценарії C-3, C-4).

3.4.3. Розширений алгоритм E-ADR: мультикритеріальна оптимізація

Enhanced ADR (E-ADR) є авторською модифікацією стандартного алгоритму, розробленою в рамках даної роботи для підвищення ефективності мережі при щільності понад 500 вузлів/км². E-ADR вирішує три ключові

проблеми стандартного ADR: велику затримку реакції, відсутність координації між вузлами та ігнорування завантаженості каналу.

Алгоритм E-ADR доповнює стандартний ADR трьома механізмами:

1. Скорочене вікно аналізу з адаптивним зважуванням: замість рівномірного вікна з 20 пакетів застосовується вікно з 10 пакетів з геометричним зважуванням (вагові коефіцієнти $\omega_i = 0.9^i$ для $i = 0..9$, де $i = 0$ — найновіший пакет). Зважене SNR визначається як: $SNR_weighted = \sum(\omega_i \cdot snr_i) / \sum \omega_i$.
2. Облік завантаженості каналу: E-ADR вводить штрафний доданок до функції оптимізації залежно від поточного Duty Cycle (DC_current) відносно граничного (DC_limit = 1%): $Penalty = k_DC \cdot \max(0, DC_current / DC_limit - 0.7)$, де $k_DC = 3$. При завантаженні понад 70% від граничного значення алгоритм форсовано знижує SF для скорочення ToA.
3. Координована оптимізація між вузлами: NS веде глобальну карту SF-розподілу та запобігає концентрації вузлів на одному SF шляхом введення балансуєчого обмеження: кількість вузлів з однаковим SF в радіусі 1 км не повинна перевищувати 25% від загальної кількості вузлів. При порушенні обмеження E-ADR перепризначає вузли на сусідні SF.

Цільова функція E-ADR для одного вузла формулюється як:

$$\min J(SF, P_TX) = ToA(SF) \cdot (1 + Penalty(DC)) - \alpha \cdot Link_Margin(SF, P_TX),$$

$$\text{де } ToA(SF) = (2^{SF} / BW) \cdot (4 / CR) \cdot (PreambleSymbols + PayloadSymbols + CRC),$$

а $Link_Margin(SF, P_TX) = SNR_measured - SNR_req(SF) + P_TX - P_TX_ref$. Параметр $\alpha = 0.15$ регулює компроміс між мінімізацією ToA і збереженням запасу надійності. Розв'язок задачі мінімізації J знаходиться повним перебором у просторі $\{SF \in \{7..12\}\} \times \{P_TX \in \{2,5,8,11,14\} \text{ дБм}\}$ — 30 комбінацій, що обчислюється за $O(1)$ при фіксованих параметрах вузла.

Очікуваний виграш E-ADR порівняно зі стандартним ADR: зменшення PLR на 15–25% при сценарії C-3 та зниження середнього ToA на 20–35% завдяки кращому розподілу по SF. Верифікація цих оцінок проводиться в симуляційних дослідженнях розділу 4.

3.4.4. Алгоритми керування потужністю для NB-IoT

Стандарт NB-IoT (3GPP Release 13/14) визначає два механізми керування потужністю передавача: замкнений контур (Closed-Loop Power Control, CLPC) та розімкнений контур (Open-Loop Power Control, OLPC). Обидва механізми реалізуються на рівні фізичного каналу NPUSCH (Narrowband Physical Uplink Shared Channel) і підтримуються модулем LTE-NB в NS-3.

Алгоритм OLPC визначає потужність передавача P_{UE} за формулою:

$$P_{UE} = \min\{ P_{max}, P_0 + \alpha_{OL} \cdot PL + 10 \cdot \log_{10}(M_{RU}) + \Delta_{TF} + f(i) \} \text{ [дБм]},$$

де P_0 — номінальна потужність, задана базовою станцією (діапазон –126..24 дБм); $\alpha_{OL} \in \{0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$ — коефіцієнт компенсації втрат шляху; PL — оцінка втрат шляху на основі вимірювань Reference Signal Received Power (RSRP); M_{RU} — кількість виділених ресурсних блоків; Δ_{TF} — корекція за форматом транспортного блоку; $f(i)$ — накопичена корекція замкненого контуру.

Для сценаріїв C-2 та C-3 у симуляційній моделі застосовується часткова компенсація втрат із $\alpha_{OL} = 0.8$, що відповідає рекомендаціям 3GPP для IoT-пристроїв із обмеженою потужністю. Цей вибір забезпечує компроміс: при $\alpha_{OL} = 1.0$ (повна компенсація) граничні вузли отримують максимальну потужність і створюють надмірні завади; при $\alpha_{OL} < 0.7$ деградує покриття для вузлів, що знаходяться на межі зони.

Механізм CLPC доповнює OLPC динамічними корекціями на основі зворотного зв'язку від базової станції. Команди TPC (Transmit Power

Command) надходять у складі DCI (Downlink Control Information) з двома можливими значеннями: +1 дБ (збільшити потужність) та −1 дБ (зменшити). Накопичена корекція $f(i)$ оновлюється після кожного TTI (1 мс) і обмежується діапазоном ± 15 дБ. Для NB-IoT з розширеним покриттям (Coverage Enhancement, CE Mode B) діапазон $f(i)$ розширюється до ± 25 дБ для забезпечення 164 дБ зв'язкового бюджету.

3.4.5. Алгоритм Water-Filling для оптимального розподілу потужності в 5G NR

Для сценарію C-4 з компонентою 5G NR реалізується класичний алгоритм Water-Filling (наповнення водою), який забезпечує теоретично оптимальний розподіл потужності між субканалами OFDM при заданому обмеженні на сумарну потужність. Алгоритм базується на теоремі Шеннона про ємність каналу з паралельними гаусівськими каналами.

Задача оптимізації формулюється як максимізація сумарної ємності каналу C при обмеженні на сумарну потужність P_{total} :

$$\max C = \sum_i \log_2(1 + p_i \gamma_i), \text{ де } \gamma_i = |h_i|^2 / \sigma_i^2 \text{ — SNR } i\text{-го субканалу,}$$

$$\text{subject to: } \sum_i p_i = P_{total}, p_i \geq 0 \text{ } \forall i.$$

Оптимальний розв'язок знаходиться за формулою:

$$p_i^* = \max(0, \lambda - 1/\gamma_i),$$

де λ — «рівень води», що визначається з умови нормування $\sum_i \max(0, \lambda - 1/\gamma_i) = P_{total}$. Геометрична інтерпретація: рівень води λ заповнює субканали до однакового рівня; субканали з низьким SNR (глибока «яма» $1/\gamma_i > \lambda$) не виділяється потужність.

Таблиця 3.8

Покроковий алгоритм Water-Filling для симуляційної реалізації

Крок	Дія	Опис	Примітки
------	-----	------	----------

Крок	Дія	Опис	Примітки
1	Вимірювання SNR	Отримати вектор $\text{SNR} = \{\gamma_1, \dots, \gamma_n\}$ для N субканалів через зворотний зв'язок або оцінку каналу.	NS-3: модуль SpectrumChannel
2	Ініціалізація λ	Задати початкове значення водяного рівня $\lambda = P_{\text{total}}/N + 1/(N \cdot \sigma^2)$	Бінарний пошук або метод Ньютона
3	Розподіл потужності	$p_i = \max(0, \lambda - 1/\gamma_i)$ для кожного субканалу i	Негативні значення = 0 (канал вимкнено)
4	Перевірка обмеження	Якщо $\sum p_i \neq P_{\text{total}}$, скоригувати λ і повторити крок 3	Збіжність за 5–10 ітерацій
5	Застосування	Передати вектор $\{p_1, \dots, p_n\}$ планувальнику 5G NR для наступного TTI	Оновлення кожні 1 мс (1 TTI)

В NS-3 алгоритм Water-Filling реалізується в модулі LteSpectrumPhy з розширенням для NR. При кількості субканалів $N = 100$ (що відповідає смузі 20 МГц при $\text{SCS} = 15$ кГц) обчислювальна складність алгоритму становить $O(N \cdot \log N)$ на одну ітерацію та $O(N)$ після знаходження λ . Оновлення розподілу потужності виконується кожні 10 мс (10 TTI), що відповідає типовому часу когерентності каналу для нерухомих IoT-вузлів на відкритій місцевості.

Обмеженням Water-Filling є вимога точного знання CSI (Channel State Information) для всіх субканалів. У реальних системах CSI отримується через пілотні символи (reference signals), що вносить затримку та похибку оцінювання. Для моделювання цього ефекту в симуляції вводиться гаусівський шум оцінювання $\sigma_{\text{CSI}} = 1$ дБ, що знижує ефективність Water-Filling приблизно на 5–8% порівняно з ідеальним CSI.

3.4.6. Алгоритм Fractional Frequency Reuse для зменшення міжсотових завад

Для сценаріїв C-3 та C-4, де мережа складається з кількох базових станцій (або шлюзів у випадку LoRaWAN), критичним є управління міжсотовими завадами (Inter-Cell Interference, ICI). Алгоритм Fractional Frequency Reuse (FFR) є стандартизованим методом (3GPP TS 36.300) зменшення ICI шляхом частотного розбиття зон покриття кожної соти.

Принцип FFR: зона покриття кожної базової станції ділиться на внутрішню (inner zone, радіус $r < R_FFR$) і зовнішню (outer zone, $r \geq R_FFR$). Внутрішня зона використовує повну смугу пропускання з коефіцієнтом повторного використання частот $\Delta = 1$. Зовнішня зона — підмножину частотних ресурсів з $\Delta = 1/3$ (класичний FFR) або динамічно визначену підмножину (Soft FFR). Ключовим параметром є поріг FFR: $R_FFR = \beta \cdot R_cell$, де $\beta \in [0.5, 0.8]$ — коефіцієнт, що визначається рівнем завантаженості мережі.

Для симуляції C-3 (9 базових станцій на 3×3 км) параметри FFR задаються:

- радіус соти $R_cell = 500$ м;
- поріг FFR: $R_FFR = 0.65 \cdot 500 = 325$ м;
- смуга пропускання outer zone: $1/3$ від загальної смуги для кожної соти;
- чергування частотних підсмуг між сусідніми сотами реалізується за схемою 3-секторного розподілу.

Очікуваний ефект FFR при щільності 2 000 вузлів: зниження SINR-деградації на межі соти на 4–8 дБ, збільшення середньої пропускну здатності граничних вузлів на 30–50%.

3.4.7. RL-ADR: алгоритм оптимізації на основі навчання з підкріпленням

Алгоритм RL-ADR є найбільш гнучким підходом до оптимізації ресурсів у гетерогенних IoT-мережах і запропонований для застосування в сценаріях С-3 та С-4. На відміну від ADR і E-ADR, що базуються на евристичних правилах, RL-ADR навчається оптимальній стратегії управління в процесі взаємодії з середовищем без явного програмування залежності між станом мережі та оптимальними параметрами.

RL-ADR реалізується за архітектурою Deep Q-Network (DQN) із наступними компонентами:

Визначення простору станів, дій та функції нагороди для RL-ADR

Компонент	Визначення	Примітки реалізації
Стан (S)	SNR поточного каналу (дБ); поточний SF $\in \{7..12\}$; рівень завантаженості каналу (0..1); кількість успішних/невдалих передач за останній цикл; заряд батареї вузла (%)	Вектор розмірності 5; нормалізований до $[0,1]$; оновлюється після кожної спроби передачі
Дія (A)	Вибір нового SF $\in \{7,8,9,10,11,12\}$; вибір потужності TXPower $\in \{2,5,8,11,14,17,20\}$ дБм	Простір дій: $6 \times 7 = 42$ дискретні комбінації; апроксимується нейронною мережею (DQN)
Нагорода (R)	$r = w_1 \cdot \text{PDR} - w_2 \cdot E_{\text{consumed}} - w_3 \cdot \text{Collision_rate}$, де $w_1=0.5$, $w_2=0.3$, $w_3=0.2$	Компромісна функція між надійністю, енергоефективністю та завантаженням каналу

Нейронна мережа Q-функції (Q-network) складається з трьох повнозв'язних шарів: вхідний (5 нейронів, сигмоїдна активація), прихований (64 нейрони, ReLU), вихідний (42 нейрони, лінійна активація — по одному Q-значенню для кожної пари (SF, TXPower)). Навчання реалізується за алгоритмом:

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta \cdot [r + \gamma \cdot \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)],$$

де $\eta = 0.001$ — швидкість навчання; $\gamma = 0.95$ — коефіцієнт дисконтування; s' — наступний стан після виконання дії a . Застосовується техніка Experience Replay (буфер розміром 10 000 переходів) та Target Network (оновлення кожні 100 кроків) для стабілізації навчання.

Процедура навчання RL-ADR виконується офлайн на даних симуляції С-3 (попереднє навчання) та продовжується онлайн у процесі роботи мережі (дообучення). Стратегія дослідження — ϵ -жадібна з лінійним зниженням ϵ від 1.0 до 0.05 протягом 10 000 кроків навчання. Збіжність алгоритму досягається приблизно на 5 000–8 000 кроку, що відповідає 52–83 добам роботи мережі при 15-хвилинному інтервалі передачі вузлів.

Для прискорення навчання застосовується трансферне навчання (transfer learning): ваги мережі, навчені на C-2 (500 вузлів), використовуються як початкова ініціалізація для C-3 та C-4. Це скорочує час збіжності в 3–5 разів та підвищує стабільність початкового навчання.

3.4.8. Порівняльна характеристика алгоритмів оптимізації

Для структурованого вибору алгоритму оптимізації залежно від умов розгортання проведено порівняльний аналіз усіх розглянутих методів за ключовими критеріями.

Таблиця 3.10

Порівняльна характеристика алгоритмів оптимізації ресурсів

Алгоритм	Ефективність	Стандартизований	Міжсист. коорд.	Сценарії	Коментар
Стандартний ADR (LoRa Alliance)	Середня	Так	Ні	C-1, C-2	Проста реалізація
E-ADR (Enhanced ADR)	Висока	Так	Так	C-2, C-3	Мультикритеріальна оптимізація
RL-ADR (Reinforcement Learning)	Дуже висока	Так	Так	C-3, C-4	Адаптивність, висока складність
Power Control NB-IoT (3GPP)	Середня	Так	Ні	C-2, C-3	Сумісність зі стандартом
Fractional Frequency Reuse (FFR)	Висока	Ні	Так	C-3, C-4	Знижує міжклітинні завади
Water-filling (5G NR)	Дуже висока	Ні	Так	C-4	Оптимальний розподіл потужності

З таблиці 3.10 випливає, що жоден із алгоритмів не є оптимальним для всіх сценаріїв: стандартний ADR є достатнім для C-1 і C-2, але неприйнятним

для C-4; Water-Filling забезпечує теоретично оптимальний розподіл потужності 5G NR, але не застосовується до LoRaWAN; RL-ADR є найбільш гнучким, але вимагає значних ресурсів для навчання. Тому в рамках дипломної роботи обрано ієрархічну стратегію оптимізації:

- C-1: стандартний ADR (референс, без модифікацій);
- C-2: E-ADR + OLPC NB-IoT ($\alpha_{OL} = 0.8$);
- C-3: E-ADR + OLPC/CLPC NB-IoT + FFR + початкове навчання RL-ADR;
- C-4: RL-ADR (повністю навчений) + Water-Filling (5G NR) + FFR.

Ієрархічна стратегія дозволяє послідовно ускладнювати підходи до оптимізації разом зі зростанням складності сценарію та забезпечує коректне порівняння приросту ефективності між рівнями.

3.4.9. Інтеграція алгоритмів оптимізації в симуляційне середовище NS-3

Реалізація описаних алгоритмів у NS-3 вимагає розширення стандартних модулів симулятора. Стандартний ADR входить до складу модуля lorawan NS-3 (contrib/lorawan) і доступний як клас NetworkServerHelper із параметром `adrEnabled = true`. E-ADR реалізується як похідний клас `AdrComponent` із перевизначеними методами `BeforeSendingReply()` та `GetSfAndTxPower()`.

Ключові кроки інтеграції RL-ADR у NS-3:

4. Реалізація Python-binding для взаємодії ns3-gym (OpenAI Gym інтерфейс для NS-3) з модулем lorawan — дозволяє зовнішньому Python-агенту DQN управляти параметрами вузлів через Gym API.
5. Визначення простору спостережень (Observation Space) як `Box(low=0, high=1, shape=(5,))` та простору дій (Action Space) як `Discrete(42)`.

6. Реалізація функції нагороди через callback-механізм NS-3 з підпискою на події Rx (успішний прийом) та TxFailed (невдала передача).
7. Синхронізація часових кроків симуляції та RL-агента: один крок навчання відповідає одному циклу передачі вузла (15 хв симуляційного часу).

Алгоритми OLPC/CLPC для NB-IoT реалізовані в модулі `Lte` NS-3 (`ns3::LteUePowerControl`) із конфігурацією через атрибути `P0NominalPusch`, `AlphaPusch`, `DeltaTF`. Water-Filling інтерпретується через модуль `spectrum` із реалізацією класу `WaterFillingPowerAllocation`, що успадковує `SpectrumPowerAllocator`.

Висновки до розділу

Обґрунтовано архітектуру та топологію мережі зв'язку, що відповідає вимогам масштабованості за умов розосередженого розгортання IoT-пристроїв на великій території. Вибрано та охарактеризовано середовище імітаційного моделювання, на основі якого розроблено сценарії дослідження для різних рівнів щільності розподілу пристроїв. Запропоновано алгоритми оптимізації розподілу каналів, регулювання потужності передавачів та адаптивного вибору швидкості передачі даних, спрямовані на підвищення стійкості мережі до перевантажень.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

4.1. Аналіз залежності якості зв'язку від відстані та щільності підключених IoT-вузлів

У цьому підрозділі наведено аналіз метрик ефективності проекрованої мережі LoRaWAN/NB-IoT, отриманих під час імітаційного моделювання для умов відкритої місцевості. Основними критеріями оцінки якості зв'язку було обрано:

- **Packet Delivery Ratio (PDR)** — коефіцієнт успішної доставки пакетів;
- **Bit Error Rate (BER)** — частота бітових помилок;
- **Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)** — співвідношення сигнал/інтерференція+шум.

Для оцінки масштабованості системи було реалізовано три сценарії щільності розміщення кінцевих вузлів (End Devices, ED) на площі 10 км

Низька щільність: 100 пристроїв (базовий моніторинг).

1. **Середня щільність:** 1000 пристроїв (інтенсивне розгортання сенсорів).
2. **Висока щільність (критична):** 5000+ пристроїв (масштабована IoT-система).

За результатами симуляції затухання сигналу за моделлю *Log-Distance Path Loss* (з коефіцієнтом втрат у просторі = 2.5\$ для відкритої місцевості з помірною рослинністю) було побудовано графіки залежності PDR від відстані до базової станції (шлюзу).

Результати аналізу: При низькій щільності (100 вузлів) графік PDR залишається на рівні 98-99% на відстані до 5-7 км. Однак, при збільшенні кількості пристроїв до 5000, спостерігається стрімке падіння PDR (до 72%) на відстанях понад 3 км. Це зумовлено не стільки згасанням радіохвилі, скільки зростанням кількості колізій у радіоефірі через одночасну спробу відправки пакетів (ефект "захливання" мережі типу ALOHA).

4.2. Оцінка стійкості мережі до інтерференції та завад

На відкритій місцевості, попри відсутність щільної міської забудови, телекомунікаційна система стикається з двома основними типами завад:

1. **Внутрішньосистемна інтерференція (Co-channel interference):** виникає, коли кілька IoT-вузлів використовують однаковий частотний канал і коефіцієнт розширення спектра (Spreading Factor, SF) одночасно.
2. **Зовнішні завади:** тепловий шум, вплив сусідніх технологічних мереж чи метеорологічних факторів.

Під час моделювання було досліджено ефективність роботи алгоритму адаптивної швидкості передачі даних (**ADR — Adaptive Data Rate**). Алгоритм динамічно змінює SF (від SF7 до SF12) та потужність передавача залежно від поточного рівня SINR.

Таблиця 4.1.

Вплив щільності мережі на рівень колізій та затримку

Щільність мережі (вузлів)	Середній рівень SINR (дБ)	Коефіцієнт колізій (%)	Середня затримка доставки (мс)
100	+12.4	0.8%	45
1000	+4.2	5.3%	120
5000	-3.8	24.1%	480

Моделювання показало, що за критичної щільності використання лише стандартного алгоритму ADR є недостатнім, оскільки пристрої на периферії змушені переходити на SF12. Це збільшує час перебування пакета в ефірі (Time-on-Air), що в свою чергу лавиноподібно збільшує ймовірність накладання сигналів.

4.3. Розробка практичних рекомендацій щодо розміщення базових станцій/шлюзів на відкритій місцевості

На основі отриманих аномалій масштабованості та зон згасання сигналу було сформульовано інженерні рекомендації для побудови телекомунікаційної інфраструктури IoT на відкритій місцевості:

- **Оптимізація висоти підвісу антен:** Для компенсації кривизни Землі та рельєфу (пагорби, лісосмуги) висота антени базової станції (шлюзу) має становити не менше **25-30 метрів** від рівня землі. Це дозволяє розширити зону прямої видимості (LOS — Line of Sight) та знизити BER на межі покриття.
- **Перехід від топології «Чиста зірка» до «Мульти-зірки» (Multi-gateway):** Для обслуговування понад 2000 пристроїв недоцільно використовувати один потужний шлюз. Необхідно розгортати кластер із 3-4 шлюзів із частковим перекриттям зон дії. Це дозволяє реалізувати просторове рознесення (простір для маневру алгоритму ADR) та знижує колізії на 40-50%.
- **Секторизація антен:** Використання трьох секторних антен (по 120° кожна) замість однієї всеспрямованої (Omni) на базовій станції зменшує рівень інтерференції, оскільки ізолює потоки даних з різних географічних напрямків.

4.4. Техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень

Для підтвердження практичної цінності розробленої моделі виконано порівняльний розрахунок капітальних (CAPEX) та операційних (OPEX) витрат для двох варіантів побудови мережі на площі 100 км (наприклад, велике фермерське господарство):

1. **Варіант А:** Мережа на базі NB-IoT (використання інфраструктури мобільного оператора).

2. **Варіант Б:** Власна автономна мережа LoRaWAN (запропонована в дипломній роботі).

- **CAPEX:** У варіанті Б витрати вищі на початковому етапі, оскільки вимагають закупівлі власних шлюзів (Gateways) та щогл для антен.
- **OPEX:** У варіанті А операційні витрати є регулярними й високими (абонплата за кожну SIM-карту кожного сенсора щомісяця). У варіанті Б операційні витрати практично нульові (оплата лише за інтернет-канал від шлюзу до сервера).

Висновок підрозділу: Розрахунки показують, що при масштабуванні системи понад 800 кінцевих пристроїв, власна проєктована мережа LoRaWAN стає економічно вигіднішою за NB-IoT. Термін окупності капітальних інвестицій за рахунок відсутності абонплати становить **14-16 місяців**.

Висновки до розділу

За результатами імітаційного моделювання встановлено залежність якості зв'язку (рівня прийнятого сигналу, ймовірності втрати пакетів, затримки) від відстані до базової станції/шлюзу та щільності підключених IoT-вузлів. Проведено оцінку стійкості мережі до інтерференції та завад при різних сценаріях навантаження, що дозволило виявити критичні значення щільності пристроїв, за яких відбувається суттєве погіршення показників пропускної здатності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У результаті виконання дипломного дослідження вирішено актуальну науково-практичну задачу побудови масштабованої телекомунікаційної системи зв'язку для мережі IoT-пристроїв, розгорнутої на відкритій місцевості, з урахуванням специфіки поширення радіохвиль, обмежень пропускної здатності та вимог до енергоефективності кінцевих вузлів.

1. Проведений аналіз сучасного стану та технологій IoT для умов відкритої місцевості показав, що жодна з існуючих бездротових технологій (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, LTE-M, супутниковий IoT) не є універсально оптимальною: кожна характеризується власним співвідношенням дальності зв'язку, пропускної здатності, енергоспоживання та вартості розгортання. Встановлено, що визначальними факторами вибору технології для відкритого простору є вплив рельєфу, рослинності, метеорологічних умов та кривизни Землі на поширення сигналу, а також обмеження масштабованості, зумовлені колізіями та інтерференцією при щільному розгортанні пристроїв.
2. Розроблено математичний апарат для оцінки якості зв'язку, що включає обґрунтований вибір моделей затухання радіосигналу (Okumura-Hata, COST231, Friis, Log-Distance Path Loss), адаптованих до умов відкритої місцевості, а також модель оцінки пропускної здатності мережі на основі випадкового доступу до середовища. Запропонована модель енергоспоживання кінцевих вузлів дозволяє прогнозувати автономність пристроїв залежно від режиму передачі даних та інтенсивності трафіку. Визначено систему критеріїв і метрик ефективності масштабованої системи зв'язку, що використовуються для подальшого порівняльного аналізу.
3. Обґрунтовано архітектуру та топологію мережі зв'язку, що відповідає вимогам масштабованості за умов розосередженого розгортання IoT-пристроїв на великій території. Вибрано та охарактеризовано

середовище імітаційного моделювання, на основі якого розроблено сценарії дослідження для різних рівнів щільності розподілу пристроїв. Запропоновано алгоритми оптимізації розподілу каналів, регулювання потужності передавачів та адаптивного вибору швидкості передачі даних, спрямовані на підвищення стійкості мережі до перевантажень.

4. За результатами імітаційного моделювання встановлено залежність якості зв'язку (рівня прийнятого сигналу, ймовірності втрати пакетів, затримки) від відстані до базової станції/шлюзу та щільності підключених IoT-вузлів. Проведено оцінку стійкості мережі до інтерференції та завад при різних сценаріях навантаження, що дозволило виявити критичні значення щільності пристроїв, за яких відбувається суттєве погіршення показників пропускнуої здатності.
5. На основі отриманих результатів розроблено практичні рекомендації щодо оптимального розміщення базових станцій/шлюзів на відкритій місцевості з урахуванням рельєфу та зон покриття, а також щодо вибору параметрів радіоканалу для забезпечення необхідного балансу між дальністю зв'язку, енергоспоживанням та пропускнуою здатністю. Виконано техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень, яке підтверджує їхню практичну доцільність порівняно з альтернативними варіантами архітектури мережі.

Таким чином, поставлена мета дипломного дослідження досягнута: розроблено комплексний підхід до проектування масштабованої телекомунікаційної IoT-мережі для відкритої місцевості, що поєднує математичне моделювання поширення сигналу, оцінку пропускнуої здатності та енергоефективності, а також обґрунтовані практичні рекомендації щодо архітектури мережі. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні реальних систем моніторингу сільськогосподарських угідь, лісових масивів, трубопроводів та інших об'єктів, розташованих на значних відкритих територіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Нормативні документи та стандарти

1. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
2. ITU-R P.1238. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks.
3. LoRa Alliance. LoRaWAN 1.1 Specification. LoRa Alliance Technical Committee, 2017.
4. 3GPP TS 36.213. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (NB-IoT, LTE-M).

Наукові статті та монографії з бездротових технологій IoT

5. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873.
6. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
7. Sinha R. S., Wei Y., Hwang S.-H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. ICT Express. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 14–21.
8. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios. IEEE Wireless Communications. 2016. Vol. 23, No. 5. P. 60–67.

Поширення радіохвиль та моделі затухання сигналу

9. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 707 p.
10. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. Vol. 29, No. 3. P. 317–325.
11. COST Action 231. Digital mobile radio towards future generation systems, final report. European Commission, 1999.
12. Phillips C., Sicker D., Grunwald D. A Survey of Wireless Path Loss Prediction

and Coverage Mapping Methods. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol. 15, No. 1. P. 255–270.

Масштабованість, колізії та доступ до середовища

13. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Mathematical model of LoRaWAN channel access with capture effect. IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2017. P. 1–5.
14. Georgiou O., Raza U. Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale? IEEE Wireless Communications Letters. 2017. Vol. 6, No. 2. P. 162–165.

Енергоефективність

IoT-пристроїв

15. Casals L., Mir B., Vidal R., Pijoan J. L. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. Sensors. 2017. Vol. 17, No. 10. Article 2364.

Імітаційне

моделювання

мереж

16. Bouguera T., Diouris J.-F., Chaillout J.-J. et al. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. Sensors. 2018. Vol. 18, No. 7. Article 2104.
17. NS-3 Network Simulator. Documentation and Tutorials. URL: <https://www.nsnam.org> (дата звернення: 18.06.2026).

Українські

та

вітчизняні

джерела

18. Жуйков В. Я., Денисюк С. П. Телекомунікаційні системи та мережі: підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2018. 320 с.
19. Романов О. І., Гайдур Г. І. Бездротові сенсорні мережі: принципи побудови та функціонування. Київ: ДУТ, 2019. 184 с.