

УДК 621.396.7

д-р філософії Бараннік Д. В. ORCID: 0000-0002-7074-9864 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
д-р філософії Сінько В. В. ORCID: 0000-0003-1380-3390 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
д-р філософії Бараннік В. В. ORCID: 0000-0003-3516-5553 (ХНУ ім. В. Н. Каразіна)
канд. техн. наук Ушань В. М. ORCID: 0000-0001-9076-9574 (ВІТВ НТУ «ХП»)

МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

У роботі розглядається задача проєктування розподіленої електронної комунікаційної мережі моніторингу протяжних територій на базі технології LoRa. Актуальність задачі зумовлена необхідністю забезпечення надійного контролю великих ділянок місцевості за умов відсутності розвиненої інфраструктури зв'язку, обмежених енергетичних ресурсів сенсорних вузлів і складних умов поширення сигналів.

Проаналізовано існуючі підходи до побудови LoRa-мереж, зокрема архітектури LoRaWAN та багатоходові рішення для безпроводних сенсорних мереж. Встановлено, що більшість відомих підходів не враховує взаємозв'язок між параметрами сенсорного покриття та обмеженнями пропускної здатності мережі.

Запропоновано методику проєктування розподіленої LoRa-мережі, що поєднує ймовірнісну модель сенсорного виявлення з моделлю багатоходової передачі даних та оцінкою навантаження каналу. Сенсорна підсистема описується узагальненою ймовірнісною моделлю (Elfes-подібною), що дозволяє перейти від заданої ймовірності виявлення до еквівалентного радіуса сенсорного вузла. Комунікаційна підсистема враховує обмеження фізичного рівня LoRa, зокрема коефіцієнт розширення спектра (spreading factor), час передачі пакета (time-on-air) та надійність передачі на одному хопі.

У результаті отримано залежності для визначення мінімальної кількості сенсорних вузлів, максимальної довжини багатоходового ланцюга та граничної кількості вузлів у мережі за умов обмеженої пропускної здатності. Показано, що використання багатоходової структури сенсорного покриття дозволяє підвищити сумарну ймовірність виявлення завдяки комбінуванню результатів декількох незалежних спостережень. При цьому досягнення заданого рівня ймовірності виявлення може бути забезпечене різними комбінаціями кількості ешелонів та щільності розміщення вузлів, що дозволяє оптимізувати структуру мережі з урахуванням обмежень системи.

Наукова новизна полягає в удосконаленні методики проєктування розподіленої сенсорної мережі, що поєднує ймовірнісну модель сенсорного виявлення з моделлю багатоходової передачі даних, а також у встановленні впливу багатоходової структури сенсорного покриття на сумарну ймовірність виявлення.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні систем моніторингу протяжних об'єктів, зокрема в умовах обмеженої інфраструктури та підвищених вимог до енергоефективності.

Ключові слова: LoRa, безпроводні сенсорні мережі, багатоходові мережі, сенсорне покриття, ймовірнісна модель виявлення, проєктування мереж, IoT.

D. Barannik, V. Sinko, V. Barannik, V. Ushan. Design methodology of a distributed multi-hop LoRa-based sensor network for monitoring extended areas

The paper addresses the problem of designing a distributed electronic communication network for monitoring extended territories based on LoRa technology. The relevance of the problem is determined by the need to ensure reliable monitoring of large areas under conditions of limited communication infrastructure, constrained energy resources of sensor nodes, and complex signal propagation environments.

Existing approaches to the design of LoRa-based networks are analyzed, including the LoRaWAN architecture and multi-hop solutions for wireless sensor networks. It is shown that most known approaches do not consider the interdependence between sensing coverage parameters and network capacity constraints.

A methodology for designing a distributed LoRa-based network is proposed, combining a probabilistic sensing model with a multi-hop data transmission model and channel load estimation. The sensing subsystem is described using a generalized probabilistic (Elfes-type) detection model, which allows transformation of a given detection probability into an equivalent sensing radius of a sensor node. The communication subsystem takes into account physical layer constraints, including the spreading factor, time-on-air, and transmission reliability over a single hop.

As a result, analytical dependencies are obtained for determining the minimum number of sensor nodes, the maximum length of a multi-hop chain, and the maximum number of nodes in the network under limited channel capacity. It is shown that the use of a multi-echelon sensing structure increases the overall detection probability by combining results from multiple independent observations. At the same time, the required detection probability can be achieved

through different combinations of the number of echelons and node density, enabling optimization of the network structure under system constraints.

The scientific novelty lies in the improvement of the methodology for designing distributed sensor networks by integrating a probabilistic sensing model with a multi-hop data transmission model, as well as in establishing the influence of a multi-echelon sensing structure on the overall detection probability.

The obtained results can be applied to the design of monitoring systems for extended objects, particularly in environments with limited infrastructure and increased energy efficiency requirements.

Keywords: *LoRa, wireless sensor networks, multi-hop networks, sensing coverage, probabilistic detection model, network design, IoT.*

Вступ

Сучасні задачі моніторингу протяжних територій, зокрема об'єктів критичної інфраструктури, транспортних коридорів і зон підвищеного ризику, потребують створення ефективних систем збору та передавання інформації в умовах обмеженої або відсутньої телекомунікаційної інфраструктури. Особливої актуальності ці задачі набувають у випадках, коли необхідно забезпечити автономне функціонування сенсорних вузлів, низьке енергоспоживання та високу надійність передачі даних.

Однією з перспективних технологій для побудови таких систем є LoRa [1; 2], яка забезпечує велику дальність зв'язку при низькому енергоспоживанні. Однак класична архітектура LoRaWAN [3–5], що базується на топології типу “зірка-зірок”, передбачає прямий зв'язок сенсорних вузлів із базовими станціями (gateway) та є малоприматною для умов протяжних або складних за рельєфом територій, де прямий радіозв'язок є нестабільним або неможливим.

Альтернативою є використання багатохопових (multi-hop) мереж, у яких передача даних здійснюється через послідовність ретрансляторів. У науковій літературі розглянуто різні підходи до побудови таких мереж [5–10], зокрема рішення для лінійних топологій, енергоефективні протоколи передачі та методи динамічної реконфігурації мережі. Разом з тим, більшість існуючих робіт зосереджується або на питаннях маршрутизації, або на оптимізації енергоспоживання, і не враховує особливості задачі моніторингу, де ключовим параметром є ймовірність виявлення об'єктів.

Крім того, у відомих підходах, як правило, відсутня інтеграція сенсорної моделі покриття з моделлю функціонування мережі передачі даних. Це призводить до ситуації, коли параметри розміщення сенсорних вузлів визначаються незалежно від обмежень пропускної здатності мережі, що може спричинити перевантаження каналу або, навпаки, неефективне використання ресурсів.

Таким чином, виникає необхідність у розробці методики проєктування розподіленої мережі моніторингу, яка б одночасно враховувала:

- ймовірнісні характеристики сенсорного виявлення;
- геометрію покриття території;
- обмеження багатохолової передачі даних;
- пропускну здатність мережі та параметри фізичного рівня LoRa.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється побудові безпроводних сенсорних мереж та використанню технології LoRa для задач моніторингу протяжних територій. У роботах [1; 2] наведено огляд технологій класу Low-Power Wide-Area Network та показано доцільність їх використання для побудови енергоефективних систем передачі даних.

Питання масштабованості та пропускної здатності LoRa-мереж розглядаються у роботах [3; 7; 8], де показано вплив параметрів фізичного рівня та інтерференції на ефективність функціонування мережі. У [4–6] досліджуються характеристики LoRaWAN та оцінюється її придатність для задач міського моніторингу.

Окремий напрямок досліджень пов'язаний із використанням багатохопових підходів у LoRa-мережах. У роботах [9; 11; 12] запропоновано методи організації багатохопової передачі даних та проведено аналіз їхньої ефективності з точки зору енергоспоживання та пропускної здатності.

Питання забезпечення покриття та ймовірності виявлення в безпроводних сенсорних мережах розглядаються у роботах [13; 14], де застосовуються ймовірнісні моделі сенсорного виявлення та аналізується вплив параметрів розміщення вузлів на характеристики покриття.

Разом з тим, аналіз існуючих досліджень показує, що більшість підходів розглядає окремо або сенсорну підсистему, або мережу передачі даних. Питання узгодженого проектування сенсорного покриття та параметрів багатохопової передачі даних з урахуванням обмежень пропускної здатності залишається недостатньо дослідженим.

Метою цієї роботи є розробка такої методики для розподіленої електронної комунікаційної мережі моніторингу на базі технології LoRa. Для досягнення цієї мети в роботі пропонується комплексна математична модель, яка поєднує сенсорну підсистему з комунікаційною та дозволяє визначити граничні параметри мережі, зокрема максимальну довжину багатохопового ланцюга та допустиму кількість вузлів.

Виклад основного матеріалу

Аналіз існуючих підходів до побудови LoRa-мереж.

Розвиток технологій Інтернету речей (IoT) сприяв широкому впровадженню безпроводних сенсорних мереж для задач моніторингу навколишнього середовища, інфраструктурних об'єктів і протяжних територій. Однією з найбільш перспективних технологій для побудови таких мереж є LoRa, яка забезпечує велику дальність зв'язку при низькому енергоспоживанні.

При проектуванні розподілених мереж моніторингу одним із ключових етапів є вибір технології безпроводового зв'язку, яка повинна забезпечувати необхідний баланс між дальністю передачі, енергоспоживанням та пропускною здатністю.

Для задач побудови сенсорних мереж можуть використовуватися різні технології, зокрема Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, NB-IoT, LoRa.

Коротка порівняльна характеристика основних технологій наведена у таблиці 1. Вказані характеристики технологій узгоджуються з результатами оглядових досліджень [1; 2; 6].

Таблиця 1

Порівняння безпроводових технологій

Технологія	Дальність	Енергоспоживання	Швидкість передачі	Особливості
Wi-Fi	50–100 м	високе	висока	потребує інфраструктури
BLE	10–50 м	низьке	низька	коротка дальність
ZigBee	10–100 м	низьке	низька	потребує щільної mesh-мережі
NB-IoT	до км	середнє	низька	залежить від оператора
LoRa	1–10+ км	дуже низьке	дуже низька	велика дальність, автономність

Технології Wi-Fi та BLE характеризуються обмеженою дальністю та значним енергоспоживанням, що робить їх малоприматними для автономних сенсорних вузлів у задачах моніторингу протяжних територій. ZigBee забезпечує можливість побудови mesh-мереж, однак потребує високої щільності вузлів через малу дальність зв'язку, що призводить до зростання вартості та складності розгортання. NB-IoT забезпечує значну дальність передачі, однак залежить від наявності інфраструктури мобільного зв'язку, що обмежує його використання в ізольованих або важкодоступних районах. Технологія LoRa поєднує значну

дальність передачі, низьке енергоспоживання, можливість автономної роботи та незалежність від зовнішньої інфраструктури.

З урахуванням вимог до мережі моніторингу протяжних територій, а саме: великої довжини контрольованої зони; обмеженого енергоспоживання вузлів; відсутності стаціонарної інфраструктури; необхідності автономного розгортання, найбільш доцільним є використання технології LoRa. Разом з тим, класична архітектура LoRaWAN має обмеження, що зумовлює необхідність розгляду альтернативних підходів, зокрема багатохопових мереж, які розглядаються далі.

У більшості практичних реалізацій використовується архітектура LoRaWAN [3–5], яка базується на топології типу “зірка-зірок”. У такій архітектурі сенсорні вузли здійснюють передачу даних безпосередньо до одного або декількох шлюзів (gateway), які виступають у ролі прозорих ретрансляторів між вузлами та мережевим сервером.

Перевагами LoRaWAN є простота реалізації, відсутність необхідності у складній маршрутизації та централізоване управління мережею.

Однак така архітектура має суттєві обмеження, такі як залежність від наявності стаціонарних шлюзів, необхідність прямої радіовидимості між вузлом і шлюзом, складність забезпечення покриття протяжних або екранованих територій, обмежена масштабованість у складних умовах поширення сигналів. У зв'язку з цим використання LoRaWAN є недостатньо ефективним для задач моніторингу протяжних ділянок місцевості, де відсутня інфраструктура та неможливо забезпечити прямий зв'язок із базовими станціями. Альтернативним підходом є використання багатохопових (multi-hop) LoRa-мереж, у яких передача даних здійснюється через послідовність проміжних вузлів-ретрансляторів.

У науковій літературі [9–12] розглядаються різні варіанти таких мереж, зокрема лінійні мережі для моніторингу протяжних інфраструктурних об'єктів, мережі з енергоефективними протоколами передачі, що використовують тривалі режими сну та агрегацію даних, динамічні мережі з можливістю самоконфігурації та адаптації топології.

Показано, що багатохопова передача дозволяє розширити зону покриття та підвищити гнучкість мережі в умовах складного рельєфу або відсутності прямої радіовидимості.

Разом з тим, такі мережі мають низку специфічних проблем:

накопичення затримок та втрат пакетів при збільшенні кількості хопів;

зростання навантаження на вузли, розташовані ближче до пункту збору даних;

складність організації ефективної маршрутизації при обмежених ресурсах вузлів.

Окремий напрям досліджень присвячений підвищенню енергоефективності LoRa-мереж [6; 11]. У цих роботах розглядаються: оптимізація циклів сну та активності вузлів; зменшення кількості переданих повідомлень; агрегація даних на рівні ретрансляторів; адаптивні алгоритми маршрутизації. Такі підходи дозволяють збільшити час автономної роботи мережі, однак часто не враховують вплив топології мережі та параметрів покриття на загальну ефективність системи.

У задачах проектування безпроводних сенсорних мереж важливу роль відіграє модель сенсорного покриття. В статті [13] використовуються різні підходи:

детерміновані моделі (моделі кругового покриття);

ймовірнісні моделі (probabilistic sensing models), зокрема Elfes-подібні моделі;

моделі з урахуванням шумів та перешкод.

Ймовірнісні моделі дозволяють більш адекватно описувати процес виявлення, оскільки враховують невизначеність вимірювань, вплив середовища та варіації характеристик сенсорів. Разом з тим, у більшості робіт сенсорне покриття розглядається окремо від мережі передачі даних, без урахування обмежень пропускну здатності та багатохопової маршрутизації.

Проведений аналіз показує, що існуючі підходи до побудови LoRa-мереж мають такі обмеження:

1. Відсутність інтеграції сенсорної моделі з моделлю передачі даних.

2. Недостатня увага до впливу ймовірності виявлення на топологію мережі.
3. Відсутність оцінки граничних параметрів мережі, таких як максимальна довжина багатохопОВОГО ланцюга та допустима кількість вузлів.
4. Розгляд задачі маршрутизації та енергоефективності без урахування вимог до покриття.

У зв'язку з цим доцільним є розроблення методики проектування розподіленої LoRa-мережі моніторингу, яка б поєднувала ймовірнісну модель сенсорного виявлення, модель багатохопОВОГО передачі даних, оцінку навантаження мережі, визначення граничних параметрів системи. Саме вирішенню цієї задачі присвячено подальші розділи роботи.

Постановка задачі.

Метою цього дослідження є розробка методики проектування розподіленої електронної комунікаційної мережі моніторингу на базі технології LoRa з урахуванням параметрів сенсорного покриття, обмежень багатохопОВОГО передачі даних та пропускної здатності мережі. Розглядається задача моніторингу протяжної ділянки місцевості, яка апроксимується прямокутною областю довжиною L та шириною W . Для задачі периметрового моніторингу основним параметром є довжина зони L , тоді як ширина W визначає кількість ешелонів сенсорного покриття. У межах роботи передбачається, що довжина зони L може змінюватися в широких межах (від кількох до десятків кілометрів), а покриття формується у вигляді одного або кількох ешелонів сенсорних вузлів, розташованих вздовж контрольованої ділянки.

У мережі виділяються такі типи вузлів:

1. Сенсорні вузли – автономні пристрої, що здійснюють вимірювання параметрів середовища (рух, звук, вібрації тощо) та формують повідомлення.
2. Ретранслятори – вузли з розширеними енергетичними можливостями, що забезпечують багатохопОВУ передачу даних.
3. Пункт управління (ПУ) – центральний вузол, який приймає дані та здійснює їх обробку.

Структура розподіленої сенсорної мережі з багатохопОВОЮ передачею даних, що включає сенсорні вузли, ретранслятори та ПУ, наведена на рисунку 1.

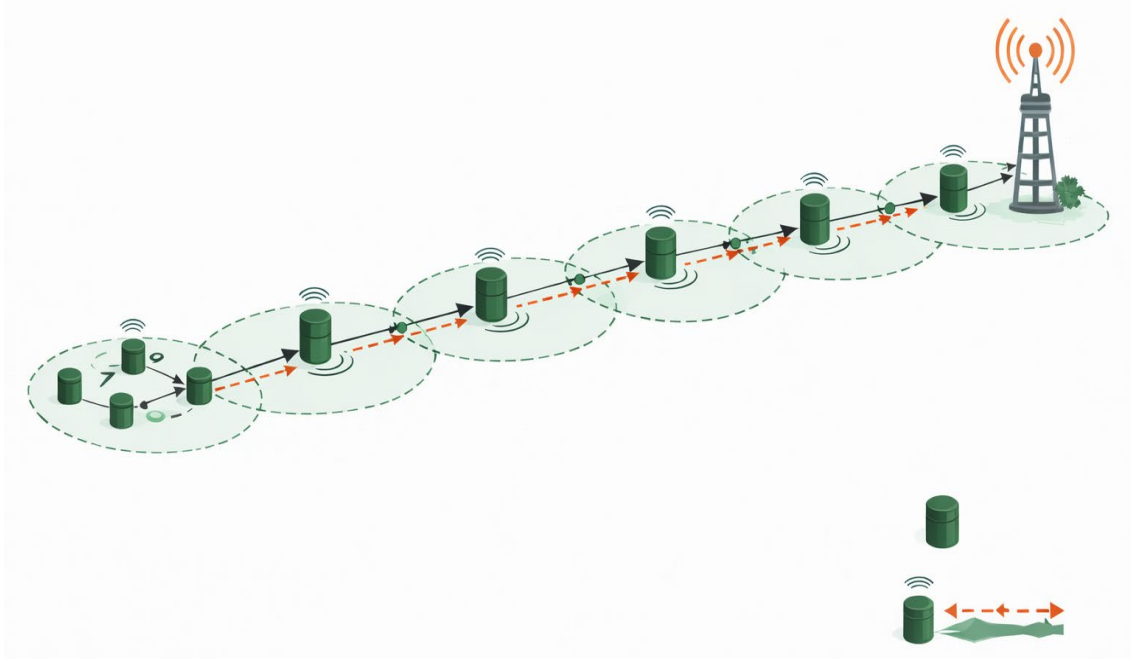


Рис. 1. Структура розподіленої сенсорної мережі з багатохопОВОЮ передачею даних на базі LoRa

Передача даних здійснюється у багатохоповому режимі, при якому кожен вузол може передавати повідомлення через один або декілька ретрансляторів у напрямку до ПУ. Логічна структура мережі відповідає деревоподібній топології, сформованій за принципом мінімальної кількості хопів до ПУ.

У мережі передбачаються два основні режими передачі даних:

режим телеметрії – періодична передача інформації про стан вузла (рівень заряду, службові параметри, базові сенсорні дані);

режим тривоги – передача повідомлень при виявленні подій (рух, звук, вібрації), що потребують оперативної реакції.

Для режиму телеметрії характерна низька інтенсивність трафіку, тоді як режим тривоги може створювати короточасні пікові навантаження на мережу.

При проектуванні мережі враховуються такі обмеження: обмежена енергетична ємність сенсорних вузлів; обмежена пропускна здатність каналу LoRa; зростання затримок та ймовірності втрат при збільшенні кількості хопів; вплив умов місцевості на ймовірність виявлення та якість зв'язку.

У роботі приймаються такі припущення:

– сенсорні вузли рівномірно розподіляються вздовж контрольованої ділянки;

– передача даних здійснюється в одному радіоканалі;

– використовується узагальнена ймовірнісна модель сенсорного виявлення;

– параметри фізичного рівня LoRa (spreading factor, bandwidth, time-on-air) вважаються фіксованими для заданого сценарію.

Ефективність мережі оцінюється за такими показниками: сумарна ймовірність виявлення об'єктів у зоні моніторингу; мінімальна кількість сенсорних вузлів, необхідних для забезпечення заданого рівня покриття; максимальна довжина багатохопового ланцюга передачі даних; максимальна кількість вузлів, що може бути обслуговувана мережею без перевантаження каналу.

Задача проектування полягає у визначенні кількості сенсорних вузлів N_b та їх розміщення, кількості ретрансляторів та кроку їх встановлення, параметрів мережі передачі даних та режимів функціонування вузлів таким чином, щоб забезпечити:

задану сумарну ймовірність виявлення об'єктів;

обмеження на пропускну здатність мережі;

допустиму довжину багатохопового маршруту;

енергоєфективність системи.

Математична модель сенсорної підсистеми.

У задачах проектування безпроводних сенсорних мереж важливим елементом є адекватний опис процесу виявлення об'єктів сенсорними вузлами. На відміну від детермінованої моделі кругового покриття, у якій зона виявлення задається фіксованим радіусом, реальні сенсори характеризуються ймовірнісною природою процесу виявлення, що залежить від відстані до об'єкта, типу сенсора та умов середовища.

У роботі використано узагальнену ймовірнісну модель типу Elfes, яка широко застосовується в задачах аналізу покриття безпроводних сенсорних мереж [13; 14]. Відповідно до цієї моделі ймовірність виявлення об'єкта на відстані r визначається виразом (1):

$$P_d(r) = \begin{cases} 1 & 0 \leq r \leq R_1 \\ e^{-\lambda(r-R_1)} & R_1 < r < R_{max} \\ 0 & r \geq R_{max} \end{cases} \quad (1)$$

де R_1 – радіус майже гарантованого виявлення;

R_{max} – максимальна відстань, на якій можливе виявлення;

λ – коефіцієнт зниження ймовірності виявлення.

Використання цієї моделі дозволяє врахувати невизначеність процесу виявлення та вплив зовнішніх факторів, таких як рельєф місцевості, рослинність та завади. Параметри R_1 , R_{max} та λ визначаються на основі узагальнених характеристик сенсорних вузлів, які можуть включати комбінацію датчиків руху (PIR), акустичних та вібраційних сенсорів.

У практичних IoT-системах моніторингу використовуються недорогі сенсорні модулі з обмеженою дальністю дії. Зокрема, пасивні інфрачервоні датчики (PIR) забезпечують виявлення руху людини на відстанях 8–15 м залежно від оптики та умов середовища. Акустичні та вібраційні сенсори можуть виявляти події на більших відстанях (до 30–70 м), однак із меншою достовірністю та значною залежністю від фонових шумів і характеристик ґрунту. З урахуванням зазначеного, у роботі приймаються такі узагальнені параметри сенсорного вузла $R_1 = 10$ м, що відповідає зоні майже гарантованого виявлення людини для PIR-сенсорів у польових умовах. Максимальна відстань виявлення визначається як $R_{max} = 50$ м, що є компромісною оцінкою для комбінованого сенсорного вузла (рух + акустика + вібрація) з урахуванням деградації сигналів у природному середовищі (рослинність, нерівності рельєфу, шум) [10].

Коефіцієнт зниження ймовірності виявлення λ визначається на основі калібрувальної умови для характерної точки у зоні невизначеності виявлення згідно з виразом (2) [10]:

$$P_d(R_{ref}) = P_{ref}, \quad (2)$$

де R_{ref} – відстань, на якій ймовірність виявлення істотно знижується.

У роботі приймається, як $R_{ref} = 30$ м, $P_{ref} = 0,55$, що відповідає середній зоні впевненого, але не гарантованого виявлення для комбінованих сенсорів. Звідси $\lambda = -\frac{\ln \ln(P_{ref})}{R_{ref} - R_1} \approx 0,03 \text{ м}^{-1}$.

Отримане значення λ відповідає експоненційному характеру зниження ймовірності виявлення, який спостерігається у реальних сенсорних системах [13].

Залежність ймовірності виявлення від відстані, отримана на основі моделі (1), наведена на рисунку 2.

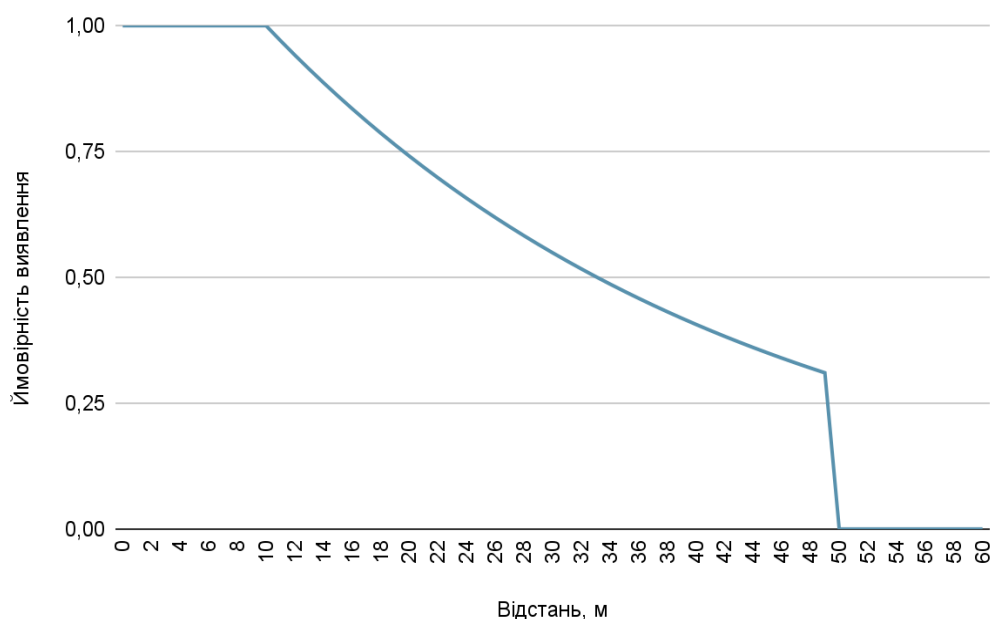


Рис. 2. Залежність ймовірності виявлення від відстані

Слід зазначити, що наведені параметри мають узагальнений характер та можуть змінюватися залежно від типу сенсорів, умов місцевості та задачі моніторингу. Запропонована модель дозволяє легко адаптувати розрахунки при зміні цих параметрів.

Для задачі проектування мережі вводиться поняття еквівалентного ефективного радіуса виявлення R_d , який визначається як максимальна відстань, на якій ймовірність виявлення не нижча за задане значення P_{min} згідно з ймовірнісною моделлю сенсорного виявлення, що відповідає узагальненій моделі Elfes згідно з виразом (3) [13; 14]:

$$P_d(r) \geq P_{min}. \quad (3)$$

Для області $R_1 < r < R_{max}$ маємо $e^{-\lambda(r-R_1)} \geq P_{min}$. Звідси $r \leq R_1 + \frac{-\ln(P_{min})}{\lambda}$
Таким чином маємо вираз (4):

$$R_d = \min\left(R_{max}, R_1 + \frac{-\ln(P_{min})}{\lambda}\right) \quad (4)$$

Залежності (3)–(4) отримано на основі узагальненої ймовірнісної моделі сенсорного виявлення типу Elfes та дозволяють перейти від заданого рівня ймовірності виявлення до еквівалентного ефективного радіуса дії сенсорного вузла. Це забезпечує можливість подальшого визначення параметрів сенсорного покриття при проектуванні мережі.

Цей параметр використовується для визначення кроку розміщення сенсорних вузлів.

Нехай контрольована зона має довжину L , а сенсорні вузли розміщуються у m ешелонах. Тоді мінімальна кількість сенсорних вузлів визначається виразом (5):

$$N_b^{min} = \lceil \frac{L \times m}{k_d \times R_d} \rceil, \quad (5)$$

де k_d – коефіцієнт перекриття зон виявлення.

Залежність (5) відповідає підходам до оцінювання покриття в безпроводних сенсорних мережах, де кількість вузлів визначається з урахуванням ефективного радіуса виявлення та коефіцієнта перекриття зон [13; 14].

У роботі приймається $k_d = 1,5$, що враховує необхідний рівень перекриття для забезпечення безперервності покриття. Таке значення відповідає підходам до моделювання покриття в безпроводних сенсорних мережах, де для зменшення ймовірності появи “сліпих зон” використовується часткове перекриття зон виявлення сусідніх вузлів [13; 14].

При використанні декількох ешелонів сенсорного покриття сумарна ймовірність виявлення визначається виразом (6):

$$P_\Sigma = 1 - (1 - p)^m, \quad (6)$$

де p – ймовірність виявлення одним ешелоном;

m – кількість ешелонів.

Вираз (6) відповідає класичній моделі незалежних спостережень, яка широко використовується для оцінювання сумарної ймовірності виявлення в сенсорних мережах [13].

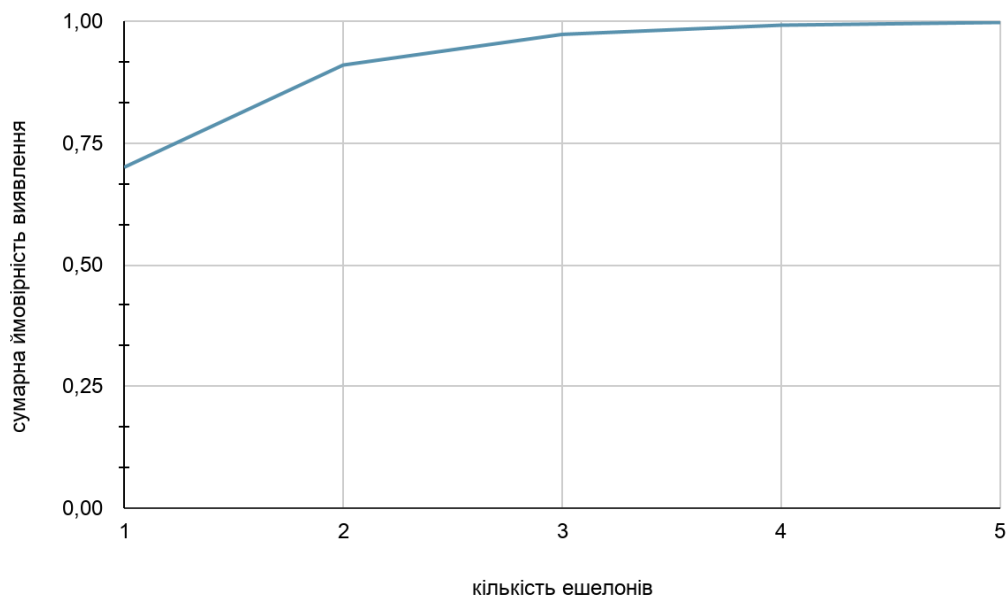


Рис. 3. Залежність сумарної ймовірності виявлення від кількості ешелонів для $p = 0,7$

Залежність сумарної ймовірності виявлення від кількості ешелонів наведена на рисунку 3. Вказана залежність показує, що збільшення кількості ешелонів дозволяє суттєво підвищити загальну ймовірність виявлення навіть при помірних значеннях p . Запропонована сенсорна модель дозволяє врахувати ймовірнісний характер процесу виявлення, перейти від вимог до ймовірності виявлення до еквівалентного радіуса R_d , визначити необхідну кількість сенсорних вузлів для заданої довжини зони та оцінити вплив кількості ешелонів на сумарну ймовірність виявлення. Отримані залежності є основою для подальшого узгодження параметрів сенсорної та комунікаційної підсистем у процесі проектування мережі.

Модель мережі передачі даних.

Передача даних у розподіленій мережі моніторингу здійснюється з використанням технології LoRa у багатохоповому режимі [1; 6]. На відміну від класичної архітектури LoRaWAN, у якій сенсорні вузли передають дані безпосередньо до шлюзів, у запропонованій системі використовується послідовна передача повідомлень через проміжні вузли-ретранслятори. Такий підхід дозволяє розширити зону покриття мережі, водночас забезпечити передачу даних у складних умовах поширення сигналів та зменшити залежність від стаціонарної інфраструктури. Разом з тим, багатохопова передача накладає обмеження, пов'язані зі зростанням затримок, накопиченням втрат пакетів та збільшенням навантаження на вузли, розташовані ближче до ПУ.

Передача даних у мережі здійснюється з використанням технології LoRa, яка характеризується можливістю адаптивного вибору параметрів фізичного рівня [6; 8], зокрема Spreading Factor (SF), ширини смуги (BW) та коефіцієнта кодування (CR). Вибір параметрів визначається компромісом між дальністю зв'язку, швидкістю передачі та енергоспоживанням.

У роботі прийнято два режими передачі:

режим телеметрії: $SF = 7$, $BW = 125$ кГц, $CR = 4/5$;

режим тривоги: $SF = 9$, $BW = 125$ кГц, $CR = 4/5$.

Вибір параметра $SF = 7$ для телеметрії обумовлений необхідністю мінімізації часу передачі повідомлення та зниження навантаження на канал. Такий режим забезпечує достатню дальність зв'язку (порядку декількох кілометрів у відкритій місцевості) при високій енергоефективності. Для тривожних повідомлень використовується $SF = 9$, що дозволяє

підвищити надійність передачі за рахунок збільшення енергетичного запасу сигналу, хоча і призводить до зростання часу передачі.

Відповідно до стандартних формул розрахунку time-on-air для LoRa, для пакетів довжиною 24–64 байти отримано: $t_{tele} \approx 60 - 70$ мс; $t_{alarm} \approx 200 - 300$ мс. Ці значення узгоджуються з експериментальними оцінками для LoRa-мереж та використовуються у подальших розрахунках [6; 7].

Мережа має ієрархічну структуру з ПУ як кореневим вузлом. Передача даних здійснюється у напрямку до ПУ за принципом мінімальної кількості хопів. Фізично мережа може мати лінійну або розгалужену структуру, однак логічно вона відповідає деревоподібній топології. Кожен вузол характеризується параметром H , який визначає кількість хопів до ПУ. Маршрутизація здійснюється шляхом передачі даних до вузлів із меншим значенням H . Максимальна дальність зв'язку LoRa залежить від значення SF, умов поширення сигналу та рівня завад. У відкритій місцевості дальність може досягати 5–10 км [8], однак у реальних умовах (наявність рослинності, рельєф, перешкоди) ефективна дальність суттєво зменшується. Для врахування цих факторів вводиться поняття проєктної дальності зв'язку R_{link}^{proj} , яка є консервативною оцінкою стабільної дальності передачі.

У роботі приймається $R_{link}^{proj} = 3$ км, що відповідає типовим умовам використання LoRa у польових умовах при помірному рівні завад. Для забезпечення надійності зв'язку вводиться коефіцієнт запасу β , який враховує варіації умов поширення сигналу $\beta = 0,6$. Звідси крок розміщення ретрансляторів $d_{rr} = \beta \cdot R_{link}^{proj} = 1,8$ км. Такий вибір дозволяє забезпечити стабільний зв'язок між вузлами навіть при зміні умов середовища.

Ймовірність успішної передачі на одному хопі приймається як $p_h = 0,95$, що відповідає практичним оцінкам для LoRa-мереж при наявності запасу по рівню сигналу та помірному навантаженні каналу.

Нехай ймовірність успішної передачі на одному хопі дорівнює p_h . Тоді ймовірність успішної доставки повідомлення через n хопів визначається як $P_{e2e} = p_h^n$. Для забезпечення заданого рівня надійності необхідно виконання умови $P_{e2e} \geq P_{e2e}^{min}$. Звідси максимальна кількість хопів згідно з (7):

$$n_{max} = \left\lfloor \frac{\ln(P_{e2e}^{min})}{\ln(p_h)} \right\rfloor \quad (7)$$

Залежність (7) узгоджується з моделями оцінювання надійності багатохопкової передачі даних, що враховують накопичення втрат при передачі через послідовність вузлів [6].

У базовому сценарії приймається $p_h = 0,95$, $P_{e2e}^{min} = 0,7$. Тоді $n_{max} = 6$. Максимальна довжина одного багатохопкового ланцюга $L_{chain}^{max} = n_{max} \cdot d_{rr} = 10,8$ км. Таким чином, довжина мережі обмежується не лише дальністю одного з'єднання, але й накопиченням втрат при багатохопковій передачі. У багатохопковій мережі навантаження розподіляється нерівномірно. Вузли, розташовані ближче до ПУ, обробляють більшу кількість трафіку, оскільки здійснюють як прийом, так і передачу повідомлень від інших вузлів. Таким чином, найбільш навантаженим є вузол, розташований безпосередньо перед ПУ, який обслуговує весь трафік мережі. Ця особливість визначає необхідність врахування пропускну здатності каналу при визначенні максимальної кількості вузлів у мережі. Запропонована модель мережі передачі даних дозволяє описати багатохопову структуру LoRa-мережі, врахувати вплив параметрів фізичного рівня на пропуску здатність, визначити максимальну довжину багатохопкового ланцюга, оцінити нерівномірність розподілу навантаження у мережі. Отримані результати є основою для подальшого аналізу навантаження мережі та визначення граничної кількості вузлів.

Модель навантаження мережі.

У багатохопових LoRa-мережах одним із ключових обмежень є пропускна здатність радіоканалу, яка визначається тривалістю передачі повідомлень та інтенсивністю трафіку. На відміну від класичних мереж із високою швидкістю передачі даних, технологія LoRa характеризується значним часом передачі одного пакета (time-on-air), що обмежує кількість повідомлень, які можуть бути передані в одиницю часу. У зв'язку з цим при проектуванні мережі необхідно враховувати навантаження на канал, особливо у вузлах, розташованих ближче до ПУ.

Для оцінювання навантаження на мережу використовується узагальнена модель трафіку, що враховує як періодичні, так і подієво-орієнтовані повідомлення. Нехай кожен сенсорний вузол генерує повідомлення з інтенсивністю λ_b , яка складається з двох компонент згідно з виразом (8):

$$\lambda_b = \lambda_{tele} + \lambda_{alarm}, \quad (8)$$

де λ_{tele} – інтенсивність телеметричних повідомлень;

λ_{alarm} – інтенсивність тривожних повідомлень.

Залежність (8) відображає декомпозицію сумарного трафіку, що генерується сенсорним вузлом, на складові телеметричного та тривожного режимів. Такий підхід відповідає загальним принципам моделювання трафіку в безпроводних сенсорних мережах, де сумарний потік повідомлень розглядається як суперпозиція незалежних потоків різної природи [11; 12].

Для телеметричного режиму вираз (9):

$$\lambda_{tele} = \frac{1}{T}, \quad (9)$$

де T – період передачі телеметрії.

Залежність (9) описує інтенсивність періодичного потоку повідомлень та відповідає класичній моделі детермінованого трафіку, в якій інтенсивність обернено пропорційна періоду генерації повідомлень.

Для тривожного режиму вираз (10):

$$\lambda_{alarm} = m_a \cdot q, \quad (10)$$

де m_a – кількість повідомлень при одній події;

q – середня частота подій.

Залежність (10) описує інтенсивність тривожного трафіку як функцію середньої частоти виникнення подій та кількості повідомлень, що генеруються при одній події. Такий підхід відповідає моделям подієво-орієнтованого трафіку, що широко застосовуються у задачах моніторингу в безпроводних сенсорних мережах [11; 12].

У штатному режимі (за відсутності тривоги) виконується $\lambda_b \approx \lambda_{tele}$. Навантаження каналу визначається як частка часу, протягом якого канал зайнятий передачею повідомлень. Для вузла, розташованого найближче до ПУ, навантаження можна оцінити виразом (11):

$$U \approx 2 \cdot N \cdot \lambda_b \cdot t_{tele} \cdot k_{ov}, \quad (11)$$

де N – кількість сенсорних вузлів у мережі;

t_{tele} – час передачі телеметричного повідомлення;

k_{ov} – коефіцієнт накладних витрат.

Залежність (11) описує оцінку середнього навантаження радіоканалу як частки часу, протягом якого канал зайнятий передачею повідомлень. Вона отримана шляхом узагальнення моделі випадкового доступу до середовища, в якій сумарна інтенсивність трафіку визначається як добуток кількості вузлів, інтенсивності генерації повідомлень та тривалості передачі одного пакета. Множник 2 враховує необхідність прийому та подальшої ретрансляції повідомлень у багатохоповій мережі, що призводить до подвоєння навантаження на вузли, розташовані ближче до ПУ. Такий підхід відповідає спрощеним моделям оцінювання навантаження в мережах з випадковим доступом (ALOHA-подібні протоколи), що широко використовуються для аналізу LoRa-мереж [6; 7].

Таким чином, вузол, розташований безпосередньо перед ПУ, визначає максимальне навантаження у мережі.

Пропускна здатність LoRa-каналу суттєво обмежена через великий час передачі одного пакета та використання механізмів випадкового доступу до середовища (ALOHA-подібний доступ) [7].

У таких системах ефективна пропускна здатність значно знижується при зростанні навантаження через колізії та повторні передачі. Для забезпечення стабільної роботи мережі вводиться обмеження на середнє завантаження каналу $U \leq U_{max}$. У роботі приймається $U_{max} = 0,1$, що відповідає консервативній оцінці для систем із випадковим доступом та забезпечує низьку ймовірність колізій. Коефіцієнт накладних витрат $k_{ov} = 1,2$ враховує службові заголовки пакетів, повторні передачі та можливі дублювання повідомлень у мережі. Зазначені значення широко використовуються як інженерні оцінки при аналізі LoRa-мереж і дозволяють отримати реалістичні оцінки максимальної кількості вузлів [6].

З урахуванням обмеження на навантаження, максимальна кількість сенсорних вузлів визначається виразом (12):

$$N_{max} = \frac{U_{max}}{2 \cdot \lambda_b \cdot t_{tele} \cdot k_{ov}}. \quad (12)$$

Залежність (12) отримана шляхом перетворення виразу (11) відносно кількості вузлів та дозволяє визначити максимальну кількість сенсорних вузлів у мережі за заданого допустимого рівня навантаження каналу. Вона відображає обмеження пропускної здатності LoRa-мережі та використовується як критерій масштабованості системи.

Залежності (11)–(12) відповідають підходам до оцінювання навантаження в LoRa-мережах із випадковим доступом до каналу, що враховують інтенсивність генерації трафіку та обмеження пропускної здатності [6; 7].

Для штатного режиму – вираз (13):

$$\lambda_b = \frac{1}{T}. \quad (13)$$

Залежність (13) відповідає штатному режиму роботи мережі, у якому трафік визначається лише періодичними телеметричними повідомленнями, а внесок тривожного трафіку є незначним. Тоді маємо вираз (14):

$$N_{max} = \frac{U_{max}}{2 \cdot \frac{1}{T} \cdot t_{tele} \cdot k_{ov}}. \quad (14)$$

Залежність (14) отримана шляхом підстановки (13) у вираз (12) та дозволяє оцінити максимальну кількість вузлів у мережі для штатного режиму функціонування як функцію періоду передачі телеметричних повідомлень.

У базовому сценарії при $T = 3600$ с, $t_{tele} = 61,7$ мс, $k_{ov} = 1,2$ отримуємо $N_{max} \approx 2430$. Це значення є теоретичною верхньою межею для штатного режиму без урахування тривожного трафіку. З урахуванням додаткових факторів (службові повідомлення, повторні передачі, пікові навантаження) реальна допустима кількість вузлів оцінюється як $N_{max}^{real} \approx 1000 - 1500$.

У режимі тривоги навантаження на мережу може суттєво зростати за рахунок збільшення кількості повідомлень, збільшення тривалості передачі (за рахунок використання більших значень spreading factor) та необхідності підтвердження доставки (АСК). У цьому випадку навантаження визначається виразом (15):

$$U \approx 2N \left(\frac{1}{N} \cdot t_{tele} + m_a \cdot q \cdot t_{alarm} \right) k_{ov}. \quad (15)$$

Залежність (15) отримана шляхом узагальнення виразу (11) з урахуванням двох складових трафіку – телеметричного та тривожного. Вона враховує сумарний внесок періодичних повідомлень та подієво-орієнтованого трафіку у навантаження каналу. Перший доданок у дужках відповідає телеметричному режиму та враховує періодичну передачу повідомлень, тоді як другий доданок описує внесок тривожного трафіку, що залежить від частоти подій та кількості повідомлень при кожній події. Залежність (15) узгоджується з відомими моделями пропускної здатності LoRa-мереж, які враховують тривалість передачі пакета та ефективність використання каналу [6].

Таким чином, тривожний трафік може стати визначальним фактором при проектуванні мережі, особливо у випадках масових подій.

Запропонована модель навантаження дозволяє:

- оцінити вплив інтенсивності трафіку на роботу мережі;
- визначити максимальну кількість вузлів, що може бути обслуговувана мережею;
- врахувати нерівномірний розподіл навантаження;
- оцінити вплив тривожного режиму на стабільність системи.

Отримані залежності є ключовими для узгодження параметрів сенсорної підсистеми з можливостями мережі передачі даних.

Протокол функціонування мережі.

Для забезпечення роботи розподіленої багатохопової мережі на базі LoRa пропонується протокол, який враховує обмеження енергоспоживання, пропускної здатності та необхідність автономного функціонування вузлів.

Основними вимогами до протоколу є:

- мінімізація службового трафіку;
- можливість самоконфігурації мережі;
- підтримка багатохопової передачі;
- забезпечення надійної доставки тривожних повідомлень;
- адаптація до змін топології мережі.

Протокол розглядається на концептуальному рівні та не включається до формальної моделі навантаження. Після активації вузол переходить у режим ініціалізації та визначає своє положення в мережі за допомогою параметра H , що відповідає кількості хопів до ПУ.

Процедура виконується наступним чином:

1. Вузол передає службове повідомлення типу «HELLO».
2. Вузол приймає відповіді від доступних ретрансляторів або ПУ.
3. Визначається мінімальне значення H серед отриманих відповідей.
4. Встановлюється власне значення $H = H_{min} + 1$.

У випадку відсутності відповіді вузол повторює процедуру через певний інтервал часу. Таким чином, мережа формується у вигляді ієрархічної структури з мінімальною кількістю хопів до ПУ [12].

Передача повідомлень здійснюється за градієнтним принципом у напрямку зменшення значення H . Кожен вузол приймає повідомлення від вузлів із більшим значенням H та передає їх вузлам з меншим значенням H . Для уникнення циклів використовується правило $H_{next} < H_{current}$. Це забезпечує односпрямовану передачу даних до ПУ та запобігає нескінченному розповсюдженню пакетів у мережі. Оскільки передача здійснюється широкомовним способом, одне повідомлення може бути прийняте кількома ретрансляторами.

Для запобігання дублюванню використовується механізм ідентифікації повідомлень:

- кожне повідомлення має унікальний ідентифікатор;
- вузол зберігає список оброблених повідомлень;
- повторно отримані повідомлення ігноруються.

Це дозволяє зменшити надлишкове навантаження на мережу. Для зменшення навантаження на канал передачі використовується агрегація повідомлень. Ретранслятор накопичує повідомлення протягом інтервалу часу T_{agg} ; формує один пакет, що містить декілька повідомлень; передає агрегований пакет у мережу. Це дозволяє зменшити кількість передач та підвищити ефективність використання каналу. Тривожні повідомлення мають пріоритет над телеметричними. Для них застосовуються такі особливості:

- передача без затримки;
- використання більш надійних параметрів LoRa (вищий SF);
- можливість багаторазової передачі одного повідомлення.

Для підвищення надійності тривожних повідомлень використовується механізм підтвердження доставки (АСК). Після отримання повідомлення ПУ формує підтвердження, яке передається у зворотному напрямку. У разі відсутності підтвердження вузол виконує повторну передачу повідомлення. У випадку виходу з ладу ретранслятора або зміни топології мережі вузли можуть автоматично перебудовувати маршрути [12]. Для цього:

- вузол періодично оновлює інформацію про доступних сусідів;
- при втраті зв'язку з поточним ретранслятором виконується повторна процедура самоконфігурації;
- частина сенсорних вузлів може переходити у режим ретранслятора.

Це дозволяє підвищити стійкість мережі до відмов.

Для формалізації процесу багатохопової передачі даних у мережі алгоритм функціонування вузлів подано у вигляді граф-схеми (рис. 4), яка відображає основні етапи обробки, передачі та ретрансляції пакетів даних.

Запропонований протокол спрямований на забезпечення автономного формування топології мережі, ефективної багатохопової передачі даних, зменшення навантаження за рахунок агрегації, підвищення надійності тривожних повідомлень; та стійкості до змін структури мережі. Таким чином, протокол відповідає вимогам до розподілених сенсорних мереж моніторингу з обмеженими ресурсами.

Результати моделювання та розрахунків.

На основі запропонованих моделей сенсорної підсистеми, багатохопової передачі даних та навантаження мережі проведено узгоджений розрахунок параметрів системи для типового сценарію моніторингу протяжної ділянки місцевості.

Для проведення розрахунків використано узагальнену модель, що поєднує сенсорну підсистему та мережу передачі даних. Основні параметри наведено в таблиці 2.

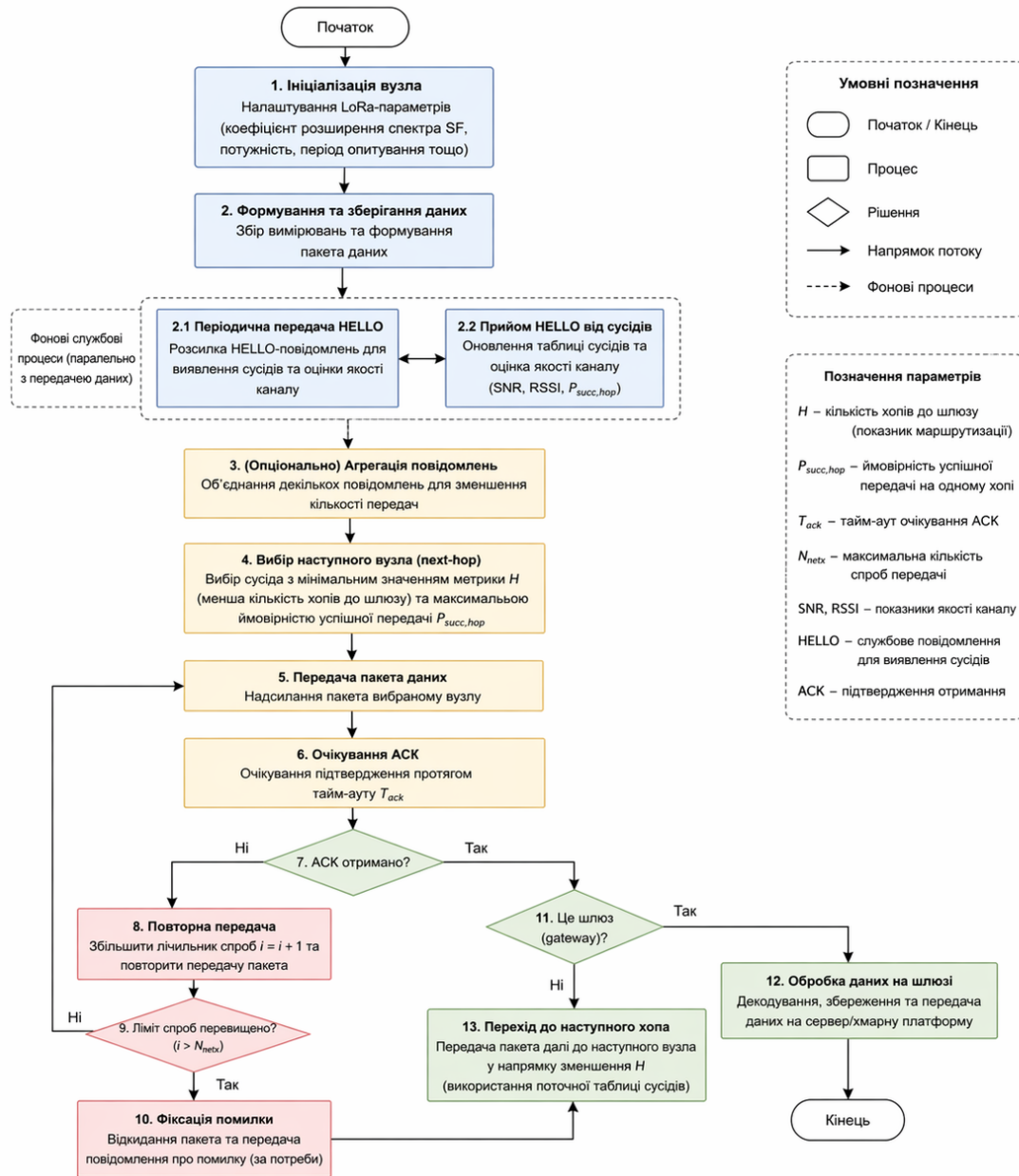


Рис. 4. Граф-схема алгоритму функціонування вузлів у багатохопівій LoRa-мережі моніторингу

Таблиця 2

Базові параметри моделі

Параметр	Позначення	Значення
Радіус гарантованого виявлення	R_1	10 м
Максимальний радіус виявлення	R_{max}	50 м
Коефіцієнт зниження ймовірності виявлення	λ	$0,03 \text{ м}^{-1}$
Коефіцієнт перекриття	k_d	1,5
Проектна дальність зв'язку	R_{link}^{proj}	3 км
Коефіцієнт запасу	β	0,6

Параметр	Позначення	Значення
Крок ретрансляторів	d_{rr}	1,8 км
Ймовірність передачі (1 хоп)	P_h	0,95
Мінімальна end-to-end ймовірність	P_{e2e}^{min}	0,7
Період телеметрії	T	3600 с
Time-on-air (телеметрія)	t_{tele}	61,7 мс
Максимальне навантаження	U_{max}	0,1
Коефіцієнт накладних витрат	k_{ov}	1,2

Як видно з таблиці 2, вибрані параметри моделі охоплюють як характеристики сенсорної підсистеми (радіуси виявлення, параметри моделі ймовірності), так і параметри мережі передачі даних (дальність зв'язку, ймовірність передачі, навантаження каналу). Це забезпечує узгоджений розрахунок параметрів системи в рамках єдиної моделі.

На основі параметрів, наведених у таблиці 2, визначено характеристики багатохопової передачі даних, результати яких наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Параметри багатохопової мережі

Параметр	Значення
Крок ретрансляторів	1,8 км
Максимальна кількість хопів	6
Максимальна довжина ланцюга	10,8 км

Як видно з таблиці 3, максимальна довжина багатохопового ланцюга становить 10,8 км, що визначає верхню межу довжини сегмента мережі. При цьому кількість хопів обмежується значенням $n_{max} = 6$, що враховує накопичення втрат при передачі.

Залежність ефективного радіуса виявлення від допустимої ймовірності виявлення наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Ефективний радіус виявлення

$P_{min}, \%$	$R_d, \text{м}$
0,9	13,51
0,8	17,44
0,7	21,89

Як видно з таблиці 4, зі зменшенням допустимої ймовірності виявлення ефективний радіус сенсорного вузла зростає, що дозволяє зменшити щільність розміщення вузлів, але призводить до зниження точності виявлення.

Для демонстрації роботи запропонованої методики далі розглянуто розрахунковий сценарій для ділянки довжиною $L = 6000$ м. Обране значення узгоджується з оціненими параметрами багатохопової передачі. Зокрема, максимальна довжина одного ланцюга становить: $> L_{chain}^{max} \approx 10,8 \text{ км} >$. Однак у практичних умовах доцільно використовувати меншу довжину сегмента (порядку 50–60 % від максимальної) для забезпечення запасу за надійністю передачі та зменшення впливу деградації каналу. Таким чином, значення $L = 6$ км

розглядається як робочий сегмент мережі, що забезпечує компроміс між довжиною покриття та надійністю багатохопової передачі.

На основі отриманих значень ефективного радіуса визначено мінімальну кількість сенсорних вузлів для різних сценаріїв, результати наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Кількість сенсорних вузлів

Сценарій	P_{\min}	m	R_d , м	N_b^{\min}
A	0,9	1	13,51	297
B	0,8	2	17,44	459
C	0,7	3	21,89	549

Як видно з таблиці 5, зі збільшенням кількості ешелонів (параметр m) необхідна кількість вузлів зростає, що пов'язано з формуванням багатошарового сенсорного покриття.

Сумарна ймовірність виявлення для відповідних сценаріїв наведена в таблиці 6.

Таблиця 6

Сумарна ймовірність виявлення

Сценарій	p	m	P_{Σ}
A	0,9	1	0,900
B	0,8	2	0,960
C	0,7	3	0,973

Як видно з таблиці 6, використання кількох ешелонів дозволяє суттєво підвищити сумарну ймовірність виявлення навіть при зменшенні ймовірності одного вузла.

Для штатного режиму отримано $N_{\max} \approx 2430$. З урахуванням реальних факторів $N_{\max}^{\text{real}} \approx 1000 - 1500$.

Оцінка ємності мережі наведена в таблиці 7.

Таблиця 7

Ємність мережі

Параметр	Значення
Теоретична кількість вузлів	2430
Реалістична оцінка	1000–1500

Як видно з таблиці 7, отримане значення кількості вузлів не перевищує допустимі межі пропускної здатності мережі, що підтверджує узгодженість параметрів сенсорної та комунікаційної підсистем.

Отримані результати (табл. 5–7) показують, що для розглянутого сценарію з довжиною ділянки $L = 6$ км та використанням трьох ешелонів сенсорного покриття необхідна кількість вузлів становить $N_b = 549$. При цьому сумарна ймовірність виявлення досягає $P_{\Sigma} \approx 0,973$.

З урахуванням оціненої пропускної здатності мережі (табл. 7) отримане значення кількості вузлів не перевищує допустимі межі ($N_{\max}^{\text{real}} \approx 1000-1500$), що свідчить про узгодженість параметрів сенсорної та комунікаційної підсистем.

Структура запропонованої розподіленої сенсорної мережі з багатохоповою передачею даних, що включає сенсорні вузли, ретранслятори та пункт збору інформації, наведена на рисунку 5.

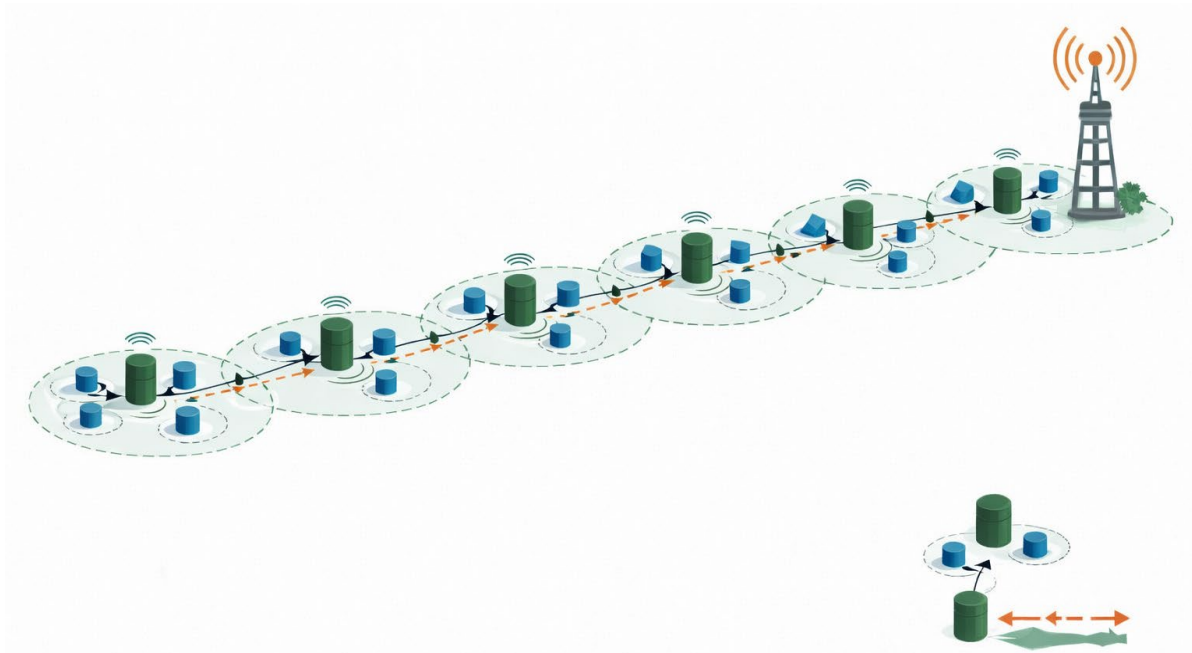


Рис. 5. Структура тришарової розподіленої сенсорної мережі з багатохопковою передачею даних на базі LoRa

Таким чином, у цьому сценарії обмеження мережі передачі даних не є визначальним фактором, і вимоги до системи визначаються переважно параметрами сенсорного покриття.

Результати моделювання дозволяють встановити наступні ключові закономірності: ефективний радіус сенсорного вузла визначається заданою ймовірністю виявлення; кількість сенсорних вузлів зростає при підвищенні вимог до ймовірності виявлення; використання багатохопкової передачі обмежується накопиченням втрат; пропускна здатність мережі визначає верхню межу кількості вузлів; сенсорна та комунікаційна підсистеми повинні проектуватися спільно.

Наукова новизна.

Наукова новизна роботи полягає у наступному:

- удосконалено методику проектування розподіленої сенсорної мережі, яка поєднує ймовірнісну модель сенсорного виявлення з моделлю багатохопкової передачі даних;
- показано вплив багатошарової структури сенсорного покриття на сумарну ймовірність виявлення за рахунок об'єднання результатів незалежних спостережень.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Розроблена методика проектування розподіленої сенсорної мережі моніторингу на базі технології LoRa забезпечує узгоджене врахування параметрів сенсорної підсистеми, багатохопкової передачі даних та обмежень пропускної здатності мережі.

Встановлено, що використання багатошарової структури сенсорного покриття дозволяє підвищити сумарну ймовірність виявлення за рахунок об'єднання результатів незалежних спостережень та забезпечує гнучкість при виборі параметрів мережі.

Отримані результати можуть бути використані як основа для інженерного проектування систем моніторингу протяжних територій в умовах обмежених ресурсів і складних умов поширення сигналів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з уточненням параметрів сенсорної моделі на основі експериментальних даних та дослідженням впливу реальних умов середовища на ефективність функціонування мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
2. Lavric A., Popa V. Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A Survey. 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISSCS.2017.8034915.
3. 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. DOI: 10.1109/LWC.2016.2647247.
4. Marini R., Mikhaylov K., Pasolini G., Buratti C. LoRaWANSim: A Flexible Simulator for LoRaWAN Networks // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 3. Article 695. DOI: 10.3390/s21030695.
5. Basford P. J., Bulot F. M. J., Apetroaie-Cristea M., Cox S. J., Ossont S. J. LoRaWAN for Smart City IoT Deployments: A Long Term Evaluation // Sensors. 2020. Vol. 20, No. 3. Article 648. DOI: 10.3390/s20030648.
6. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. M. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things // Sensors. 2016. Vol. 16, No. 9. Article 1466. DOI: 10.3390/s16091466.
7. Haxhibeqiri J., Van den Abeele F., Moerman I., Hoebeke J. LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements // Sensors. 2017. Vol. 17, No. 6. Article 1193. DOI: 10.3390/s17061193.
8. Reynders B., Meert W., Pollin S. Range and Coexistence Analysis of Long Range Unlicensed Communication. 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICT.2016.7500415.
9. Tran H. P., Jung W.-S., Yoo D.-S., Oh H. Design and Implementation of a Multi-Hop Real-Time LoRa Protocol for Dynamic LoRa Networks // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 9. Article 3518. DOI: 10.3390/s22093518.
10. Tomic I., McCann J. A. A Survey of Potential Security Issues in Existing Wireless Sensor Network Protocols // IEEE Internet of Things Journal. 2017. Vol. 4, No. 6. P. 1910–1923. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2749883.
11. Leenders G., Plets D., Hoebeke J., Martens L., Joseph W. An Energy-Efficient LoRa Multi-Hop Protocol through Preamble Sampling for Remote Sensing // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 11. Article 4994. DOI: 10.3390/s23114994.
12. Alhomyani H., Fadel M., Dimitriou N., Bakhsh H., Aldabbagh G. Modeling the Performance of a Multi-Hop LoRaWAN Linear Sensor Network for Energy-Efficient Pipeline Monitoring Systems // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 20. Article 9391. DOI: 10.3390/app14209391.
13. Shan A., Xu X., Cheng Z. Target Coverage in Wireless Sensor Networks with Probabilistic Sensors // Sensors. 2016. Vol. 16, No. 9. Article 1372. DOI: 10.3390/s16091372.
14. Pyrih Ya., Pyrih Yu. Investigation of Sensor Node Placement on a Plane Using a Genetic Algorithm // Infocommunications Technologies and Electronic Engineering. 2025. Vol. 5, No. 1. DOI: 10.23939/ict2025.01.082.

Надійшла до редколегії 28.04.2026.

Схвалена до друку 22.05.2026.

Дата публікації 29.05.2026.