

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 004.75:654.9

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-121-129

СИСТЕМА ДАЛЬНЬОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ ОДНОПЛАТНИХ МІКРОКОМП'ЮТЕРІВ З LoRa

Д. В. Варанкін, І. М. Журавська, К. О. Обухова

*Чорноморський національний університет імені Петра Могили;
вул. 68 Десантників 10, м. Миколаїв, 54000, Україна; e-mail: varankin.d@chmnu.edu.ua,
iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua, katelyna.obukhova@chmnu.edu.ua*

Стаття присвячена обґрунтування можливості використання системи дальнього радіозв'язку, заснованої на технології LoRa та одноплатних мікрокомп'ютерах, для моніторингу та контролю датчиків. У роботі розглянуто архітектуру мереж LoRaWAN, їх переваги, зокрема енергоефективність, великий радіус дії та високу надійність передачі даних. Проаналізовано особливості бездротового зв'язку за технологією LoRa, включаючи роботу в неліцензованих ISM-діапазонах та використання методів модуляції, таких як CSS (Chirp Spread Spectrum), що забезпечує стабільний зв'язок на великих відстанях із низьким енергоспоживанням. У межах дослідження проведено серію експериментів з метою оцінки працездатності системи в реальних умовах, зокрема у важкодоступних місцях та на великих відстанях. Результати тестування показали ефективність системи на відстанях до 7 км із мінімальними втратами даних, однак при збільшенні відстані до 14 км спостерігалися затримки та втрати пакетів. Запропоновано вдосконалення методу передачі даних для покращення продуктивності на великих відстанях при підвищеній потужності передавача та використанні ємніших акумуляторів. Також розглянуто варіанти підвищення продуктивності системи, зокрема збільшення потужності передавачів, використання антен із кращими характеристиками та впровадження енергоефективних технологій. Результати дослідження демонструють придатність системи для використання в реальних умовах з дальністю бездротового сигналу 3–14 км із можливістю оптимізації розроблюваного апаратно-програмного рішення для великих відстаней без втрати якості сигналу. Розроблена система придатна для застосування в галузях, що потребують віддаленого моніторингу, таких як сільське господарство, промислові об'єкти та інтелектуальні міські системи.

Ключові слова: LoRa, LPWAN, бездротовий зв'язок, комп'ютерна мережа, Інтернет речей (IoT), одноплатний мікрокомп'ютер, дальній радіозв'язок, маршрутизація, енергоефективність.

The article is dedicated to the justification of the possibility of the use of a long-range radio communication system based on LoRa technology and single-board microcomputers for monitoring and controlling sensors. The paper considers the architecture of LoRaWAN networks, their advantages, in particular, energy efficiency, a large range and high reliability of data transmission. The features of LoRa wireless communication are analyzed, including operation in unlicensed ISM bands and the use of modulation methods such as CSS (Chirp Spread Spectrum), which provides stable communication over long distances with low power consumption. The study includes a series of experiments to evaluate the system's performance in real-world conditions, in particular in hard-to-reach locations and over long distances. The test results demonstrated system effectiveness at distance up to 7 km with minimal data loss, although delays and packet losses occurred when the distance increased to 14 km. An improvement of the data transmission method is proposed to improve performance over long distances with increased transmitter power and the use of larger-capacity batteries. Options for increasing system performance are also considered, in particular, increasing transmitter power, using antennas with better characteristics, and implementing energy-efficient technologies. The research results demonstrate the system's suitability for use in real-world conditions with a wireless signal range of 3–14 km, with the possibility of optimizing the developed hardware and software solution for long distances without loss of signal quality. The developed system is suitable for use in industries requiring remote monitoring, such as agriculture, industrial facilities, and intelligent city systems.

Keywords: LoRa, LPWAN, wireless communication, computer network, Internet of Things (IoT), single-board microcomputer, long-range radio communication, routing, energy efficiency.

Вступ

У сучасному світі, з розвитком технологій Інтернету Речей (IoT), зростає потреба в ефективних та надійних системах радіозв'язку для моніторингу та контролю різноманітних датчиків. Системи дальнього радіозв'язку, зокрема на основі технології LoRa (Long Range), забезпечують широкий діапазон покриття, низьке енергоспоживання та високу надійність передачі даних, що робить їх ідеальними для застосувань у віддалених та важкодоступних місцях.

Завдяки топології типу «зірка», у якій кінцеві пристрої безпосередньо спілкуються зі шлюзами, технології LoRa можуть зменшити енергетичні витрати на роботу датчиків, що, в свою чергу, продовжує термін їхньої служби. Це особливо важливо для систем, які потребують тривалого автономного функціонування без частого обслуговування.

Впровадження одноплатних мікрокомп'ютерів у дані системи дозволяє створити універсальні рішення для контролю та управління датчиками, забезпечуючи інтеграцію різноманітних функцій, таких як геолокація, обробка даних та управління пристроями.

Використання одноплатних мікрокомп'ютерів, поряд з технологією LoRa, дозволяє створити гнучкі та масштабовані системи, які можуть задовольняти вимогам сучасних користувачів, мінімізуючи енергоспоживання і оптимізуючи витрати.

Формулювання цілей статті

Метою даної статті є вдосконалення систем контролю та автоматизації у різних галузях за допомогою віддаленого моніторингу та бездротових каналів зв'язку. Для досягнення цієї мети передбачається розроблення енергоефективної системи передачі даних на основі технології LoRa. Визначено завдання з аналізу сучасних підходів, вибору оптимальної архітектури системи, реалізації та тестування апаратно-програмного забезпечення задля надійного зв'язку на великих відстанях.

Основний текст статті

Для передавання даних на великі відстані, використовуючи малу потужність, із сучасних технологій бездротового зв'язку найбільш придатною можна вважати технологію LoRa. Це працює завдяки фізичним законам, які стверджують, що для передачі даних на далекі відстані потрібно або збільшити потужність, або зменшити пропускну здатність. LoRaWAN (Long-Range Wide Area Network) – це тип технології бездротового зв'язку для передачі даних на великі відстані. Вона створена для забезпечення низькошвидкісного збирання даних між підключеними сенсорами, що відстежують і передають інформацію [1].

Існує кілька інших типів подібних мереж, таких як LPWAN (мережа з низьким енергоспоживанням для широкої зони покриття), LPWA (мережа з низьким енергоспоживанням для широкої зони) або LPN (мережа з низьким енергоспоживанням).

LoRa працює на радіочастотах у діапазонах, що не вимагають ліцензії, таких як 169 МГц, 433 МГц, 868 МГц (Європа) і 915 МГц (Північна Америка). LoRa забезпечує передачу на дуже великі відстані (більше 10 км у сільських районах) при низькому енергоспоживанні. Технологія складається з двох частин: LoRa – фізичний рівень, і протокол зв'язку, побудований на базі цього фізичного рівня LoRa. Комунікаційний рівень представлений WAN (Wide Area Network) – відкритим протоколом зв'язку, який визначається консорціумом LoRa Alliance.

Отже, LoRaWAN визначає протокол зв'язку та архітектуру системи для мережі, тоді як фізичний рівень LoRa забезпечує довготривалий зв'язок. Протокол зв'язку LoRaWAN гарантує надійну та безпечну передачу даних.

Мережі LoRaWAN можуть бути побудовані за різними топологіями. Найбільше розповсюдження мають коміркова (англ. mesh) та зірка. Згідно з [2], LoRaWAN має три класи кінцевих пристроїв, які відповідають різним вимогам:

– клас А: передача даних ініціюється кінцевим пристроєм й завжди асинхронна. Передача даних на пристрій завжди відбувається після відправки даних з пристрою. Цей клас є найбільш енергоефективним;

– клас В: відповідно з класом А, періодично виконуються запити з метою отримання даних на пристрій;

– клас С: завжди прослуховує лінію зв'язку. Придатний для пристроїв з постійним джерелом енергії, оскільки має високий ступінь енергоживлення.

Безпека передачі даних у LoRaWAN забезпечується використанням шифрування AES-128. Для захисту даних використовуються два типи ключів: сесійний ключ для зв'язку з шлюзом (NwkSKey) і ключ застосунку (AppSKey), що використовується для шифрування на рівні додатків.

Архітектура LoRaWAN базується на топології «зірка», що дозволяє шлюзам отримувати дані від усіх пристроїв у зоні покриття. Передача сигналів відбувається за допомогою LoRa-транспондерів, які можуть бути оснащені мікроконтролерами. Термін служби батарей сенсорів складає від 2 до 5 років, залежно від класу пристрою та інтенсивності використання.

LoRaWAN є однією з провідних LPWAN-технологій, що ідеально застосована у сільському господарстві, автоматизації будинків, промислових системах та IoT-проектах, які вимагають низького енергоспоживання та стабільної роботи на великих відстанях.

Вузли можуть належати до трьох класів (А, В, С), залежно від потреб у енергоспоживанні та режиму передачі даних [3]. Клас А є найбільш енергоефективним, тоді як клас С забезпечує постійне прослуховування мережі. Термін служби батарей у вузлах зазвичай становить від 2 до 5 років, а дальність передачі варіюється від 1 до 10 кілометрів [2].

Витрати на енергію для датчиків, які використовують 4G-картки, будуть значними, що вимагатиме їхньої

підзарядки не рідше одного разу на місяць. При цьому, порівняння вартості послуг різних 4G-провайдерів для таких датчиків становитиме від 75 грн на місяць (провайдер № 1) до 400 грн (провайдер № 2). У той же час, використання мережі SigFox (LPWAN-провайдера) обійдеться від 7 до 50 грн на місяць, навіть за умови міжнародного використання датчика.

Самостійно можна побудувати лише мережу формату LoRaWAN, оскільки це єдиний формат мовлення в діапазонах, що не ліцензуються. Одна зона покриття складатиметься з LoRaWAN – шлюза та маршрутизатора.

LoRaWAN має кілька ключових переваг, які роблять його кращим вибором у порівнянні з SigFox та NB-IoT. По-перше, LoRaWAN працює в безкоштовних ISM-діапазонах (868 МГц – в Європі та 915 МГц – у США), що усуває витрати на ліцензування, які є характерними для NB-IoT. Це також надає більшу гнучкість в налаштуванні, оскільки не потрібно отримувати ліцензію для пристроїв [4].

Термін автономної роботи LoRaWAN перевищує 10 років, що є важливим фактором для IoT-датчиків, адже довговічність дозволяє зменшити частоту заміни батарей. Вартість підключення до LoRaWAN, як правило, нижча порівняно з 4G та NB-IoT, що робить його економічно вигідним вибором, особливо для LPWAN-рішень.

Мережа LoRa Mesh також спроектована для економії енергії, оскільки пристрої можуть переходити в режим глибокого сну і автоматично прокидатися, коли є дані для передачі. Це допомагає подовжити термін служби батарей і знизити витрати на їх заміну. Мережа LoRa Mesh має безліч застосувань у різних сферах, включаючи моніторинг і управління тваринами, контроль за пристроями розумного дому, управління енергією в енергетичних системах тощо [5].

Чирпована хвиля (англ. «chirp wave») – це форма хвильового сигналу, в якій несуча частота змінюється з часом в межах

Таблиця 1 – Порівняння малопотужних бездротових технологій

Критерій	Chirp (CSS)	UWB	BLE	Wi-Fi
Точність локалізації, м	1,0–2,0	+/- 0,4	< 5,0	< 10,0
Діапазон, м	Оптимальний: 10–500 Макс: 1000	Оптимальний: 0–50 Макс: 200	Оптимальний: 0–25 Макс: 100	Оптимальний: 0–50 Макс: 500
Затримка, с	< 0,001	< 0,001	3–5	3–5
Споживання енергії	Дуже низьке, для портативних пристроїв	Низьке, для портативних пристроїв	Дуже низьке, для портативних пристроїв	Середнє
Вартість	\$	\$\$	\$\$	\$\$\$
Частотний діапазон, ГГц	ISM: 2,4 (2,4–2,4835)	3,1–10,6	2,4	2,4; 5
Швидкість передачі даних, Мбіт/с	До 2	До 27	До 2	До 1000

одного імпульсу. Тобто, переданий сигнал використовує лінійну частотну модуляцію (чирп). У LoRaWAN чирповані хвилі використовуються для передачі даних через бездротові канали на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Чирповані хвилі у LoRaWAN генеруються за допомогою техніки CSS (Chirp spread spectrum). Під час передачі даних чирповані хвилі використовуються для кодування інформації та її передачі через RF-канали.

Чирпована хвиля в LoRaWAN адаптується до вимог різних застосунків, забезпечуючи налаштування частоти передачі, довжини та відстані. Хоча сигнал зазнає впливу зовнішніх факторів, таких як затування чи спотворення, його можна відновити завдяки ефективним алгоритмам обробки. Ця технологія забезпечує стійкість до перешкод і зменшує втрати сигналу, що підвищує надійність передачі.

Чирповані хвилі широко застосовуються в комунікаціях, радіолокації та медичній візуалізації. Їхні ключові переваги включають здатність працювати у складних умовах, покращувати зв'язок у середовищах з багатьма відбиваючими об'єктами та

ефективно виявляти слабкі сигнали. Ці властивості роблять чирповані хвилі цінним інструментом для сучасних бездротових технологій [6].

Чирпована хвиля зазвичай описується за допомогою математичної формули, яка відображає зміну частоти в часі. Загальна форма для чирпованої хвилі може бути представлена як:

$$s(t) = A \times \sin(2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2)), \quad (1)$$

де $s(t)$ – амплітуда чирпованої хвилі в момент часу t ; A – амплітуда хвилі (максимальне значення); f_0 – початкова частота; k – коефіцієнт, що визначає швидкість зміни частоти (зазвичай обчислюється як $k = \frac{f_1 - f_0}{T^2}$, де f_1 – кінцева частота, а T – час тривалості чирпованої хвилі).

Ця формула описує, як частота хвилі змінюється в часі, створюючи характерний чирпований сигнал [7].

Однак розповсюдження хвиль у мережі LoRa також може залежати від інших факторів, таких як висота антен, топографічні особливості та різна щільність об'єктів.

У CSS дані кодуються за допомогою чирпованої хвилі, що збільшує ширину сигналу в порівнянні з початковою чирпованою хвилею, після чого він ділиться на кілька блоків і розподіляється на кількох частотах. Кількість частот, на які буде розподілено сигнал, залежить від смуги пропускання чирпованої хвилі та роздільної здатності сигналу. Кожна частота несе частину даних, а всі ці частоти об'єднуються для формування CSS сигналу [8].

Для передачі CSS сигналу частота сигналу змінюється безперервно у певному порядку, відомому як послідовність стрибків частоти. Ця послідовність генерується за допомогою заздалегідь визначеного алгоритму і ділиться на кілька сегментів. Під час передачі сигналу частота змінюється безперервно відповідно до порядку, в якому сегменти послідовності змінюють частоту.

Крім того, розподіл частот та безперервна зміна частоти підвищують безпеку сигналу, оскільки без знання послідовності зміни частот іншим важко розшифрувати сигнал. Технологія CSS застосовується в багатьох комунікаційних додатках, включаючи GPS-навігаційні системи, мережі LoRa та IoT-застосунки [1].

Протокол AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) розроблений для бездротових ad-hoc мереж і мобільних пристроїв. Він забезпечує маршрутизацію за запитом, підтримує unicast і multicast, і ефективно працює у великих мережах із нерівномірним розподілом вузлів. На відміну від протоколу DSDV, AODV мінімізує використання широкомовних повідомлень, знижуючи обсяг маршрутизаційного трафіку.

Процес пошуку маршруту розпочинається, коли вихідний вузол відправляє пакет RREQ (Route Request) до своїх сусідів. Пакети передаються мережею, доки вузол призначення або проміжний вузол із необхідною маршрутною інформацією не відповість. Унікальні ідентифікатори трансляції та

порядкові номери забезпечують актуальність і запобігання циклам у маршрутах.

Проміжні вузли зберігають зворотний шлях до вихідного вузла при отриманні першого пакета RREQ, ігноруючи наступні дублікати. Коли пакет RREQ досягає вузла призначення, останній відправляє пакет RREP (Route Reply) назад, формуючи прямий маршрут. Завдяки цьому встановлюється повноцінний шлях для двосторонньої передачі даних.

Пакет RREP проходить через вузли зворотним шляхом, оновлюючи таблиці маршрутизації та створюючи симетричний канал між вузлами-джерелом і призначенням. Це дозволяє вузлам підтримувати актуальні маршрути без зайвого обміну таблицями.

Для обробки маршрутних і даних пакетів використовується окремий алгоритм. Вузли аналізують вхідні повідомлення, оновлюють таблиці маршрутизації та визначають подальші дії залежно від типу пакета. Завдяки цьому AODV забезпечує ефективну маршрутизацію, навіть у динамічних і масштабованих мережах.

Для збору даних на великих територіях без використання Wi-Fi та Ethernet застосовуються радіомодулі, що використовують технологію LoRa. Дальність передачі залежить від потужності передавача, типу антени, робочої частоти, умов видимості та зовнішніх перешкод і може варіюватися від сотень метрів до десятків кілометрів. Модуль E32-868T30D є оптимальним вибором для побудови мережі завдяки його технічним характеристикам, що забезпечують надійність і широкий радіус дії.

На рис. 1 показано схему підключення модуля E32-915T30D (LoRa-модуль), плати Arduino Nano та акумулятора типу LiPo (3,7 В; 2000 мА·год) через модуль живлення.

Акумулятор підключений до модуля живлення. Живлення з акумулятора надходить на вхідний роз'єм модуля

(позначений як IN+ і IN-). Вихідний роз'єм модуля живлення (OUT 5V і GND) забезпечує стабільне 5 В для живлення інших компонентів.

Вихідна напруга 5 В із модуля живлення підключена до виводу VIN плати Arduino Nano, забезпечуючи її роботу, також до LoRa-модуля на контакт VCC (живлення). Загальний провід (GND) також з'єднаний між акумулятором, LoRa-модулем та Arduino Nano.

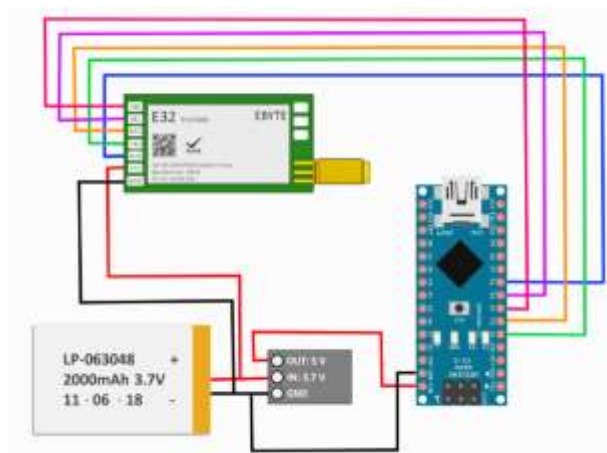


Рисунок 1 – Схема підключення модуля, плати та акумулятора

LoRa-модуль E32-915T30D підключений до Arduino Nano. Контакти M0 та M1 LoRa-модуля під'єднані до відповідних цифрових пінів Arduino Nano D2 і D3. Контакт AUX модуля підключений до іншого цифрового піна на Arduino Nano. Контакти TX та RX LoRa-модуля підключені відповідно до пінів RX та TX на Arduino Nano для UART-комунікації. LoRa-модуль отримує 5 В живлення через контакт VCC, а контакт GND з'єднаний із загальною землею (GND).

Схема забезпечує зв'язок LoRa-модуля з Arduino Nano для передачі даних, а також стабільне живлення від акумулятора через модуль перетворення напруги.

Для передавача буде використано стандартну штирьову антену для частоти передачі даних 868 МГц. Оптимальна довжина антени розраховується за формулою:

$$L = \frac{c}{f \times \sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

де L – довжина антени, м; c – швидкість світла у вакуумі, $c = 300\,000$ км/с; f – частота роботи антени, $f = 868$ МГц для модуля E32-868T30D; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища навколо антени (безрозмірна величина).

Отже, розрахуємо довжину хвилі (λ):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{868 \times 10^6} = 0,345 \text{ м.}$$

Це повна довжина хвилі. Для штирьової антени зазвичай використовується 1/4 довжини хвилі:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,345}{4} = 0,086 \text{ м} = 8,6 \text{ см.}$$

Отже, оптимальна довжина антени для частоти 868 МГц становить приблизно 8,6 см у повітрі.

На рис. 2 представлено графік, який ілюструє зміну напруги батареї LiPo (літій-полімерної батареї) в процесі роботи двох різних систем. Це дозволяє наочно побачити, як змінюється енергоспоживання кожної з систем протягом часу.

Графік демонструє, як напруга батареї поступово знижується від початкового значення, яке становить близько 4,16 В для системи «Demo» і 4,13 В для системи «Blinky», до кінцевих значень – 3,3 В для «Demo» та 3,2 В для «Blinky». Таке зниження рівня напруги є нормальним явищем для батарей LiPo, оскільки вони витрачають енергію під час роботи, і заряд залишкової батареї поступово зменшується.

Графік на рис. 2 також показує часову залежність зміни напруги, що дозволяє оцінити тривалість роботи системи, перш ніж рівень напруги досягне критичної позначки. Ці дані є важливими для розуміння того, як довго кожен з пристроїв може працювати без підзарядки. З графіка видно, що в обох випадках час роботи системи майже однаковий, не зважаючи на те, що один модуль (передатчик)

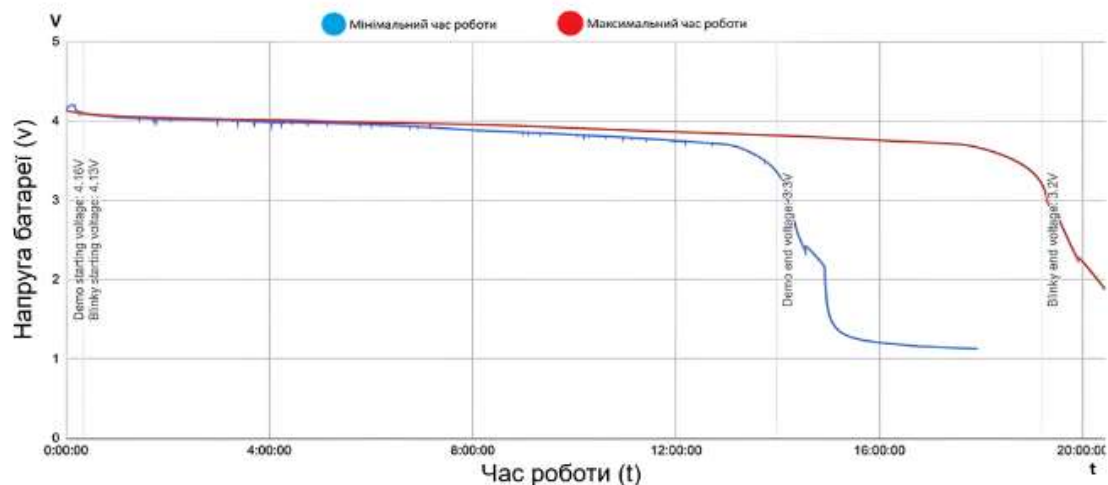


Рисунок 2 – Графік зміни напруг батареї

відправляє пакет завжди, а інший (приймач) приймає пакети без зупину.

Тестування системи проводилося у надзвичайно складних умовах, які значно впливали на якість передачі інформації. Локацією для цього експерименту було обрано село Володимирівка, розташоване на значній відстані від точки передачі сигналу (рис. 3). Основною перешкодою була відсутність прямої видимості – точка передачі знаходилася за лінією горизонту, що створювало додаткові труднощі із забезпеченням стабільного зв'язку.

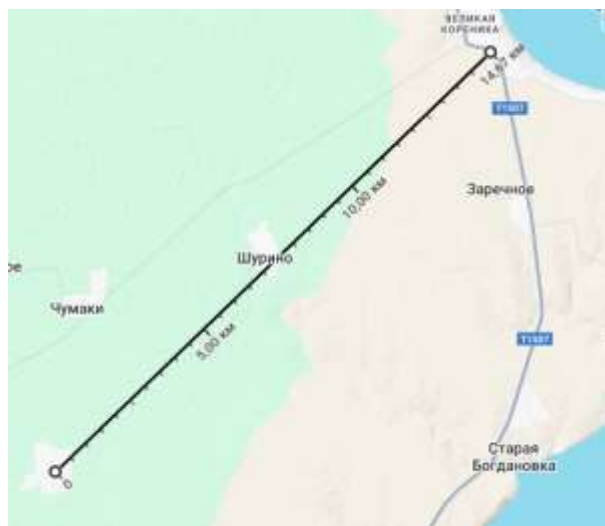


Рисунок 3 – Дистанція тесту

Крім цього, на шляху сигналу були густі насадження, які поглинали та розсіювали радіохвилі, знижуючи ефективність передачі. Сигнал проходив

через інше село Шуріне, у якому розташовані дві телекомунікаційні вежі, що також створювали потенційні перешкоди через інтерференцію сигналів. Незважаючи на всі ці фактори, система мала продемонструвати свою здатність підтримувати зв'язок, навіть у таких несприятливих умовах, що є важливим критерієм для оцінки її надійності та ефективності.

За результатами тестування було виявлено, що із збільшенням дистанції затримка передачі даних зростає майже в кілька разів. Це свідчить про те, що на великих відстанях система стикається з додатковими викликами, пов'язаними з поширенням сигналу та перешкодами на його шляху. Попри це, система продемонструвала стабільну роботу, хоча й працювала на межі своїх можливостей, використовуючи максимальну потужність передавача для підтримання зв'язку.

Аналізуючи результати усіх проведених тестів, де відстань становила лише 2,84 км та 7,14 км, а затримки – 121 мс та 423 мс відповідно, можна зробити висновок, що система працює значно стабільніше на менших дистанціях. У цьому випадку збільшення відстані майже в 5 разів призвело до зростання затримки майже в 70 разів, що вказує на лінійну залежність між відстанню та якістю показників зв'язку.



Рисунок 4 – Відсоток отриманих і пропущених пакетів

На коротких відстанях, близько 1 км, затримка майже відсутня, що свідчить про стабільний і швидкий зв'язок. При відстані 2,83 км та 5 км затримка вже помітна, але все ще знаходиться на прийнятному рівні для більшості сценаріїв використання. Ці значення вказують на те, що мережа працює ефективно на середніх відстанях без значних втрат у швидкості передачі даних.

Однак із досягненням відстані 7,14 км затримка стає більш відчутною. Вона свідчить про те, що якість зв'язку починає погіршуватися. На відстані 11 км ситуація суттєво змінюється – затримка значно збільшується, досягаючи декількох тисяч мілісекунд. Нарешті, при максимальній відстані в 14,76 км затримка сягає свого піку, що робить передачу даних дуже повільною.

Це показує, що, хоча LoRaWAN добре справляється з передачею даних на невеликих та середніх відстанях, на великих відстанях виникають значні труднощі через затримки. Це може бути важливим фактором при плануванні мережі, де необхідно забезпечити баланс між дальністю зв'язку та якістю передачі даних.

На діаграмі показано співвідношення між отриманими та втраченими пакетами даних залежно від відстані між вузлами передавача (рис. 4). Аналізуючи графік, можна побачити, що на коротких і

середніх відстанях передача даних відбувається без втрат – усі пакети успішно досягають приймача. Це свідчить про стабільність і надійність зв'язку на відстанях до 7 км, де мережа працює ефективно та без збоїв.

Однак, коли відстань збільшується до 11 км, починають з'являтися незначні втрати пакетів – близько 10 %. Це можна пояснити погіршенням сигналу на більш віддалених ділянках мережі, де вплив зовнішніх факторів стає суттєвим. При подальшому збільшенні відстані до 14 км втрата пакетів зростає до 17 %. Такий рівень втрат свідчить про поступове зниження якості зв'язку, хоча він залишається прийнятним для ряду сценаріїв використання LoRaWAN. Втрату пакетів можна зменшити за рахунок збільшення ємності акумулятора та потужності модуля.

Висновки

Перші випробування показали стабільний зв'язок на відстанях до 2,84 км із мінімальною затримкою, що свідчить про надійність і ефективність системи в оптимальних умовах. Під час тестування системи на відстані 7,14 км у змішаній місцевості, де сигнал зустрічав природні перешкоди, затримка зросла до 423 мс. Це очікувано, враховуючи вплив дерев, пагорбів та інших факторів. Останнє випробування проведено у найскладніших умовах – зв'язок здійснювався на відстані

14 км без прямої видимості. Попри значне збільшення затримки до кількох секунд, система змогла підтримувати передачу даних. Цей результат підтверджує залежність якості зв'язку від відстані та наявності фізичних перешкод.

Тести показали, що система працює стабільно й відповідає технічним вимогам, але для покращення її роботи на великих відстанях доцільно збільшити потужність передавача та використовувати більш ємні акумулятори. Загалом, система підтвердила свою ефективність і готовність до використання в реальних умовах для моніторингу та контролю датчиків у різних галузях за допомогою віддаленого бездротових каналів зв'язку.

Виконана оцінка максимальної довжини каналу зв'язку показала, що для обраних вхідних параметрів протоколу LoRaWAN мережа працює ефективно та без втрати сигналу на відстані від 3 км до 14 км.

В результаті виконаних досліджень було вдосконалено метод передачі даних, що використовує для бездротової передачі даних за технологією LoRa чірплет-декомпозицію сигналу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на збільшення дистанції віддаленого моніторингу систем датчиків на об'єктах без втрати якості сигналу та подальшим впровадженням енергозберігаючих технологій.

Список використаних джерел / References

1. Montagny S. LoRa – LoRaWAN and IoT. Savoie Mont Blanc University, 2022. 131 p.
2. Technology LoRaWAN. URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/66634.html> (дата звернення: 15.12.2024).
3. Yadav Dh., Varkey T., Aadil M. Open Lora Design and Implementation for IoT. *Internat. Conf. on Power Energy, Environment & Intell. Control (PEEIC)*. Greater Noida, India, 2023. P. 822–826. DOI: [10.1109/PEEIC59336.2023.10451093](https://doi.org/10.1109/PEEIC59336.2023.10451093)

4. Babayiğit B., Doğan F. Y. Longest Distance Detection for Data Transmission with LoRa in Urban and Extra-Urban Area. *2023 8th Internat. Conf. on Computer Sci. and Engin. (UBMK)*, Burdur, Türkiye, 2023. P. 336–340. DOI: [10.1109/UBMK59864.2023.10286581](https://doi.org/10.1109/UBMK59864.2023.10286581)

5. Shpatar P., Nichiy B., Nichiy S. Study on the Energy Efficiency of LoRa Technologies in Wireless Monitoring Networks. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. Vol. 3. P. 166–174. DOI: [10.31891/2219-9365-2024-79-21](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-21) [in Ukrainian].

6. Kumar R., Sarvagya Mr., Prasad S. N., Kavya B. S. Design and Implementation of Collaborative Energy Efficient IoT- based LoRa WAN. *Power System Technology*, 2024. Vol. 48. No. 2. P. 1398–1411. DOI: [10.52783/pst.637](https://doi.org/10.52783/pst.637)

7. Kufakunesu R., Hancke G., Abu-Mahfouz A. Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2020. Vol. 20. No. 18. DOI: [10.3390/s20185044](https://doi.org/10.3390/s20185044)

8. Maleki A., Nguyen H. H., Bedeer E., Barton R. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances. *IEEE Open Jnl of the Commun. Society*. 2024. Vol. 5. P. 4578–4612. DOI: [10.1109/OJCOMS.2024.3433502](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3433502)

LONG-RANGE RADIO COMMUNICATION SYSTEM FOR SENSOR CONTROL BASED ON SINGLE-BOARD MICROCOMPUTERS WITH LoRa

D. V. Varankin, I. M. Zhuravska,
K. O. Obukhova

¹Petro Mohyla Black Sea National University;
68 Desantniki St. 10, Mykolaiv, 54000, Ukraine;
e-mail: varankin.d@chmnu.edu.ua,
iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua,
kateryna.obukhova@chmnu.edu.ua