

Порівняльний аналіз технологій класу LPWAN

Дячук О. В.

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна

Анотація—У даній роботі вирішується задача аналізу особливостей технологій класу LPWAN за критеріями: відкритість, діапазон покриття, швидкість передачі даних і вартість розгортання, для подальшого використання при побудові інженерних систем збору та передачі інформації з різноманітних датчиків. Для подальшої її обробки і можливого керування технологічними системами. Визначено, що обраним критерієм найбільше відповідає протокол LoRaWAN. Розглянуто особливості модуляції LoRa, яка використовується на фізичному рівні протоколу LoRaWAN та проаналізовано архітектуру мережі з точки зору можливості створення власних апаратних компонентів.

Ключові слова — Інтернет Речей; LPWAN; LoRa; LoRaWAN; низьке енергоспоживання

I. ВСТУП

Області застосування технологій Інтернету речей (IoT) стрімко розширюються з кожним роком. Однією з таких областей є інженерні системи збору та передачі інформації з різноманітних датчиків для подальшої обробки і можливого керування технологічними системами. Прикладами таких систем є системи «розумне місто» [1], системи контролю за забрудненням довкілля, системи прогнозування стихійних лих, системи зволоження ґрунтів і т.д. Технології та протоколи для побудови таких систем, перш за все, повинні характеризуватися низьким енергоспоживанням та забезпечувати покриття великих територіальних площ. Технології такого класу отримали загальну назву LPWAN (Low-power Wide-area Network - «енергоефективна мережа далекого радіусу дії»). На сьогодні вже існує велика кількість конкуруючих технологій: починаючи від традиційних стільникових (2G, 3G і 4G LTE) [2] до перспективних 5G рішень [2]. Безпосередньо під вимоги IoT-рішень створюються модифікації протоколу LTE (LTE-MTC, NB-LTE-M, і NB-IoT) [3], окремі виробники пропонують власні пропріетарні технології (Sigfox [4], Ingenu [5]), альянси виробників та розробників створюють «відкриті» технології та протоколи (стандарт Weightless [6], технологія LoRa [7]). В результаті стає питання вибору найбільш оптимальної та ефективної технології для побудови інженерних систем збору та передачі даних конкретного призначення. Метою даної роботи є аналіз особливостей технологій класу LPWAN та визначення рішення для подальшого застосування.

II. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ LPWAN РІШЕНЬ

Інтернет речей (IoT) фундаментально зрушив природу пристроїв підключення, створивши масу можливостей для низькозатратних в енергетичному плані та

з великим діапазоном покриття технологій (low-power wide area network (LPWAN) [8].

LPWAN (Low-power Wide-area Network - «енергоефективна мережа далекого радіусу дії») - бездротова мережа передачі невеликих за обсягом даних на великі відстані, розроблена для розподілених мереж телеметрії, міжмашинної взаємодії та «Інтернету речей». LPWAN є однією з бездротових мереж, що забезпечують середовище збору даних з різного устаткування: датчиків, лічильників та сенсорів. LPWAN є ідеальним рішенням для пристроїв які повинні відправити малу вибірку даних надвеликих розмірів, з конкретними обмеженнями щодо енергоспоживання та потужності.

A. Застосування технологій стільникових мереж

Багато LPWAN рішень добре зарекомендували себе в середовищах з великою кількістю перешкод – міста, місцевість зі змінним рельєфом. Розробки в області технологій стільникових мереж удосконалюють їхню придатність для IoT пристроїв. Вони включають масив малопотужних, з низькою пропускну здатністю LTE розробок - LTE-MTC, NB-LTE-M, і NB-IoT (знана як CAT-M1 and CAT-M2) [6]. Однак ці рішення в більшості недоступні зараз, традиційні стільникові (2G, 3G і 4G LTE) і досі краще підходять для пристроїв із вищою пропускну здатністю, але не так рентабельні, як LPWAN для багатьох випадків використання IoT. З розвитком та впровадженням найсучаснішої технології 5G очікують вибухове зростання інтернету речей (IoT) і, зокрема, систем розумного міста. Проте, слід відзначити, що 5G не найенергоефективніша технологія, яка також не надає можливостей для побудови приватної локальної інфраструктури (доступна тільки через мобільних операторів), що в контексті пристроїв для розумного міста і індустріальної автоматизації відіграє важливу роль. Враховуючи нагальну потребу



в LPWAN при розгортанні IoT виникло декілька рішень які пропонують найбільш оптимальний баланс у пропускній здатності, енергоспоживанні і діапазоні відстаней.

В. Найпоширеніші LPWAN рішення

Основні технічні параметри діючих сьогодні мереж LPWAN наведені в Таблиця 1 [8].

ТАБЛИЦЯ 1 ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ РОЗПОВСЮДЖЕНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.

| Рішення | Модель | Частота, МГц | Дальність, км | Швидкість передачі даних | Розмір пакету |
|--------------|--------------|---------------------|-----------------------------------|--|---------------------|
| Sigfox | Пропріетарна | 868/902 | за містом: 30-50 в місті: 3-10 | завантаження: < 300 Кбіт/с скачування: 8 біт в день | 12 біт |
| LoRaWAN | Альянс | 433/780/868/ 915 | за містом: 15 в місті: 2-5 | 300 біт/с – 50 Кбіт/с | визначає користувач |
| Ingenu | Пропріетарна | 2400 | за містом: 5-10 в місті: 1-3 | завантаження: 624 Кбіт/с скачування: 156 Кбіт/с | 8 біт – 10 Кбіт |
| Weightless-W | Альянс | 400-800 | 5 | 1 Кбіт/с – 10 Мбіт/с | > 10 біт |
| Weightless-N | Альянс | < 1 000 | 3 | 100 Кбіт/с | < 20 біт |
| Weightless-P | Альянс | < 1 000 | 2 | 200 біт/с – 100 Кбіт/с | > 10 біт |
| Dash7 | Альянс | 433/868/915 | < 5 | 10, 56 або 167 Кбіт/с | < 256 біт |

Серед основних критеріїв при виборі рішення LPWAN для впровадження можна виділити наступні: відкритість, діапазон покриття, швидкість передачі даних і вартість розгортання та подальшого використання мережі. Три великих розробники пропонують широкий спектр «відкритих» рішень: з трьох Sigfox [4] є найбільш «закритим», оскільки весь трафік після розгортання повинен направлятися через хмарну платформу Sigfox, що вимагає від користувачів підписувати договір з Sigfox з подальшою оплатою послуг щодо передачі даних та розгортання нових мереж. Однак відкритим елементом є те, що користувачі можуть купувати обладнання Sigfox у різних постачальників. Технологія LoRa [7] є набагато більш «відкритою», оскільки користувачі можуть отримувати модулі і шлюзи LoRa від постачальників обладнання, а потім розгорнути свої власні мережі і керувати ними. Закритий елемент в LoRa полягає в тому, що Semtech є єдиною організацією, яка зараз самостійно виробляє радіочіпи з підтримкою технології LoRa. Компанія Ingenu [5] пропонує обидві моделі: користувачі можуть купувати обладнання безпосередньо в Ingenu, потім розгорнути і керувати своїми власними рішеннями; Ingenu також пропонує послуги передачі даних через власні загальнодоступні мережі.

Продуктивність конкретного пристрою є важливим фактором для успішного розгортання LPWAN. Залежно від вимог рішення з точки зору швидкості передачі даних, розміру пакета, енергоспоживання, двонаправленості та діапазону відстаней існує безліч стандартів для задоволення цих потреб. Наприклад, сигнал аварії з датчика, який рідко спрацьовує і посилає простий сигнал увімкнення / вимкнення від кінцевої точки в хмару, найкраще реалізувати на основі Sigfox, тоді як система з високою пропускною здатністю з контролером у складі, що вимагає двостороннього зв'язку в реальному часі, буде краще реалізована на Ingenu. Слід також зазначити, що всі ці технології потребують адаптації до різних частотних спектрів та нормативних вимог країн, де планується їх використання.

Однак ще є декілька LPWAN рішень, які борються за свою частину ринку. Деякі з них перетинаються безпосередньо з цільовими пристроями вище вказаних протоколів. Наступним у черзі є стандарт Weightless, який розроблено і підтримується Weightless Specialty Interest Group (SIG). Існує декілька реалізацій стандарту - Weightless-W, -N та -P [6]. Компанія Nwave є один з основних прихильників комерціалізації технології Weightless. Інші визначні стандарти LPWAN включають Dash7 (підтримується Альянсом Dash7) [4].

Однією з основних діючих LPWAN мереж є LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) [9]. У січні 2015 року було створено некомерційну організацію LoRa Alliance з метою прийняття та просування протоколу LoRaWAN, як єдиного стандарту для глобальних мереж з низьким енергоспоживанням. Учасниками різних рівнів LoRa Alliance є виробники програмного забезпечення, мікроелектроніки, оператори зв'язку і т.д.. У LoRa Alliance входять такі компанії, як: IBM, Semtech, Cisco, Inmarsat, Swisscom і інші.

В порівнянні з іншими стандартами LoRaWAN є найбільш відкритим стандартом для створення невеликих приватних мереж. Якщо ми будемо мережу специфікації LoRa та у нас є сторонній пристрій, який їй відповідає, то даний пристрій в нашій мережі спокійно активується і може працювати. Технологія LoRa використовує діапазони частот, що не потребують ліцензування (для України 433 МГц [10]). Також, LoRa - це технологія з розширеним спектром на основі ЛЧМ (лінійно-частотна модуляція), з більш широкою смугою пропускання, ніж у Sigfox, яка сама по собі виглядає як шум [8]. Через метод модуляції та вбудованої можливості прямого виправлення помилок сигнал LoRa може передавати дані з рівнями сигналу значно нижче мінімального рівня шуму [11]. Швидкість передачі технології LoRa перевищує швидкість передачі технології Sigfox. Технологія LoRa ідеально підходить для систем передачі даних зі швидкостями від 300 б/с до 5000 б/с, на відміну від Sigfox де швидкість менше ніж 300 б/с. Ще одна

важлива особливість технології полягає в тому, що LoRa пропонує ефективну двонаправлену функціональність – що дозволяє реалізувати отримання повідомлень від кінцевих точок та надсилання повідомлень з базових станцій на кінцеві точки (наприклад, у системах управління та контролю). Результати аналізу приведено в Таблиця 2.

Отже, визначеним критерієм найбільше відповідає протокол LoRaWAN.

III. МОДУЛЯЦІЯ LoRa

LoRa - це «chirp spread spectrum (CSS)» модуляція [12]. Це техніка розширеного спектра (spread spectrum), яка використовує широкосмугові лінійно-частотні модульовані ЛЧМ(chirp) - імпульси для кодування інформації [4]. ЛЧМ це синусоїдальний сигнал з частотою, яка змінюється за лінійним законом. На Рис. 1 наведено приклад висхідного сигналу в якому частота змінює лінійно з плином часу [13]. Інколи частота висхідного сигналу може збільшуватися за експоненціальним законом з плином часу.

Через лінійність імпульсів ЛЧМ, зміщення між приймачем і передавачем еквівалентні часовим зміщенням, які легко усуваються в декодері. Це також робить модуляцію захищеною від ефекту Доплера, еквівалентного зміщенню частоти [4]. Зміщення частоти між приймачем і передавачем може сягати 20% смуги пропускання без впливу на продуктивність декодування. Приймачі LoRa можуть підтримувати чутливість порядку 130 dBm. Це допомагає зменшити ціну на LoRa передавачі. Декілька параметрів доступні для зміни LoRa модуляції: смуга пропускання (Bandwidth (BW)), коефіцієнт розширення (Spreading Factor (SF)) і швидкість кодування (Code Rate (CR)) [14]. LoRa використовує нетрадиційне визначення коефіцієнта розширення - логарифм за основою числа 2, ЛЧМ імпульсів на символ. Ці параметри впливають на швидкість модуляції, стійкість до накладання шумів на сигнал та легкість декодування. Смуга пропускання найбільш важливий параметр для LoRa модуляції. Лора символ складається з 2SF ЛЧМ імпульсів, які покривають усю смугу частот. Усе починається з серії висхідних імпульсів. Коли максимум смуги частот досягнуто, частота згортається і збільшення частоти починається знову з мінімального значення. Рис. 2 ілюструє приклад LoRa передачі зі зміною частоти з плином часу [4]. Положення цього розриву в частоті - це те, що кодує передану інформацію. Оскільки в символі є 2SF ЛЧМ імпульсів, символ може ефективно кодувати SF біти інформації.

Таблиця 2 РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ.

| Критерій | Sigfox | LoRaWAN |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Відкритість | Пропріетарна | Альянс |
| Діапазон дії | За містом:30-50 в місті: 3-10 | За містом:30-50 в місті: 3-10 |
| Швидкість передачі | менша 300 б/с | від 300 б/с до 5000 б/с |
| Вартість розгортання базової станції | 4000€ | 1000 € |

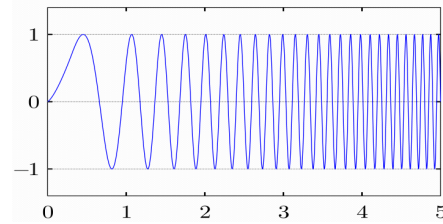


Рис. 1 Лінійно частотна модуляція висхідного сигналу в часовій області.

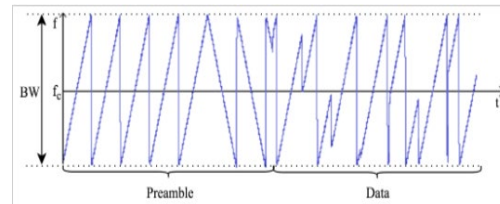


Рис. 2 Зміна частоти з часом. Приклад сигналу, який випромінює LoRa передавач. Центральною(несучою) частотою каналу є f_c , а BW - пропускною здатністю каналу

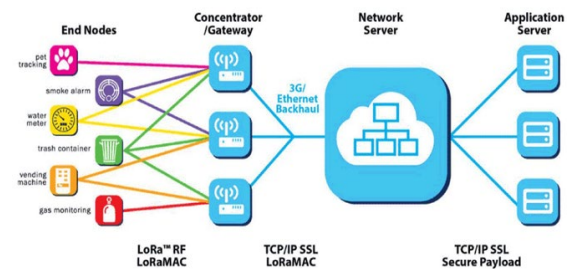


Рис. 3 Архітектура мережі LoRaWAN.

IV. АРХІТЕКТУРА LoRaWAN МЕРЕЖІ

Типова мережа LoRaWAN складається з наступних елементів : кінцеві пристрої, шлюзи, мережевий сервер, сервер додатків [15] – рис. 3.

- Кінцевий вузол (End Node) призначений для здійснення керуючих або вимірювальних функцій. Він містить набір необхідних датчиків і керуючих елементів.
- Шлюз LoRa (Gateway / Concentrator) - пристрій, що приймає дані від кінцевих пристроїв за допомогою радіоканалу і передає їх в транзитну мережу. В якості такої мережі можуть виступати Ethernet, WiFi, стільникові мережі та будь-які інші телекомунікаційні канали. Шлюз і кінцеві пристрої утворюють мережеву топологію типу зірка. Зазвичай даний пристрій містить багатоканальний приймач для обробки сигналів в декількох каналах одночасно або навіть, кількох сигналів в одному каналі[16]. Відповідно, кілька таких пристроїв забезпечує зону покриття мережі та прозору двосторонню передачу даних між кінцевими вузлами та сервером.

- Мережевий сервер (Network Server) призначений для управління мережею (формування розкладу передачі, погодження швидкості передачі, зберігання та обробка отриманих даних).
- Сервер додатків (Application Server) може віддалено контролювати роботу кінцевих вузлів і збирати необхідні дані з них.

LoRaWAN має три різних класи кінцевих пристроїв для задоволення різних потреб додатків [9].

- Двонаправлені кінцеві пристрої (клас А): кінцеві пристрої класу А дозволяють здійснювати двосторонній зв'язок, в результаті чого передача кожного кінцевого пристрою по лінії зв'язку на сервер супроводжується двома короткими вікнами прийому по лінії зв'язку від сервера. Для низхідного зв'язку з сервером у будь-який інший час, доведеться чекати наступний запланований сеанс зв'язку від кінцевого пристрою.
- Клас В - двонаправлений із запланованими вікнами прийому. Кінцеві пристрої класу В відкривають додаткові вікна прийому в запланований час. Для складання розкладу кінцевий пристрій здійснює синхронізацію по спеціальному каналу від шлюзу.
- Клас С - двонаправлений з максимальним прийомним вікном. Кінцеві пристрої класу С мають майже безперервні вікна прийому. Таким чином, вони мають максимальне енергоспоживання.

Слід зазначити, що LoRaWAN не дозволяє встановити зв'язок між пристроями: пакети можуть передаватися тільки від кінцевого пристрою на мережевий сервер або навпаки. Таким чином, зв'язок між пристроями може бути реалізований тільки через проміжний мережевий сервер.

Відкритість протоколу LoRaWAN дозволяє створювати власні компоненти мережі, перш за все – кінцеві пристрої та шлюзи з використанням доступних технічних та апаратних рішень, які забезпечують необхідні параметри. Наприклад, мікрокомп'ютер Raspberry Pi (приблизна вартість якого становить 38\$) може бути використаний для побудови шлюзу, а мікроконтролер Arduino (3\$) для створення кінцевих вузлів з відповідними сенсорами. Параметри мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3 (4 ядра, 1 Гб оперативної пам'яті, частота тактування 1,2 ГГц) [17] перевершують параметри популярної конструкції шлюзу LoRa EMB-GATE-LR (однопоточний ARM Cortex A5, 256 Мб оперативної пам'яті, частота 536 МГц) [16]. Ціна EMB-GATE-LR перевищує 300\$.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз технологій класу LPWAN показав, що обраним критеріям (відкритість, діапазон покриття, швидкість передачі даних і ціна розгортання базової станції) найбільше відповідає протокол LoRaWAN, який базується на технології LoRa.

Ефективність технології LoRa визначається такими факторами: можливість передачі даних нижче рівня шуму, висока швидкість передачі даних, низьке енергоспоживання, низька вартість розгортання, великий діапазон покриття.

Компоненти мережі LoRaWAN можуть бути побудовані з використанням таких апаратних засобів, як мікрокомп'ютер Raspberry Pi та мікроконтролер Arduino.

Предметом подальших досліджень є - створення комплексного програмного додатка, для збору і аналізу даних і віддаленого управління пристроями обліку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] P. Marakhovskyy, "Alternatyva 5G. Yak Ukraini Pobuduvaty Suchasnu Merezhu Zaoshchadyvshy Hroshi [5G alternative. How Ukraine can build a modern network, saving money]," *ООО «IZDATEL 'SKIY DOM «MEDIA-DK»*, p. 2019, Sep-, URL: https://nv.ua/ukr/biz/exp_erts_/alternativa-5g-bezdrotoviy-zv-yazok-lorawan-50041689.html.
- [2] Ajay R. Mishra, *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G*, 2nd ed. Wiley, 2018, ISBN: 978-1-119-33176-6.
- [3] "LTE-M." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/LTE-M>.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Mark, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016, DOI: [10.3390/s16091466](https://doi.org/10.3390/s16091466).
- [5] "What is RPMA Technology?" [Online]. Available: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-rpma-technology>.
- [6] "What is Weightless?" [Online]. Available: <http://www.weightless.org/about/what-is-weightless>.
- [7] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, "LoRaWAN Specification." p. 70, 2016, URL: https://loralliance.org/sites/default/files/2018-05/lorawan1_0_2-20161012_1398_1.pdf.
- [8] I. Brown, "A Detailed Breakdown of LPWAN Technologies and Providers," *luxresearch*. [Online]. Available: http://web.luxresearchinc.com/hubfs/Insight_Breakdown_of_LP_WAN_Technologies.pdf.
- [9] "LoRaWAN What is it?" p. 20, 2015, URL: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>.
- [10] "Hromadianski diapazoni chastot." [Online]. Available: https://vrl.org.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=302&Itemid=1200.
- [11] "LoRa." [Online]. Available: <https://lorareadthedocs.io/en/latest>.
- [12] A. Springer, W. Gugler, M. Huemer, L. Reind, C. Ruppel, and R. Weigel, "Spread spectrum communications using chirp signals," in *Proceedings of the IEEE/AFCEA Information Systems for Enhanced Public Safety and Security (EUROCOMM 2000)*, 2000, pp. 166–170, DOI: [10.1109/EURCOM.2000.874794](https://doi.org/10.1109/EURCOM.2000.874794).
- [13] "Chirp spread spectrum." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Chirp_spread_spectrum.
- [14] "Sikken, B. Project DecodingLoRa. 2016 (accessed on 1 August 2016)." [Online]. Available: <https://revspace.nl/DecodingLoRa>.
- [15] "Tekhnolohyia LoRa." [Online]. Available: <https://habr.com/ru/company/realtrac/blog/304312/>.
- [16] "LoRa Monochannel Wireless-to-Ethernet Gateway." URL: <http://www.acalbf.com/be/IoT-and-Wireless/Radio-Modem/p/LoRa-Monochannel-Wireless-to-Ethernet-Gateway/000008OKD>.
- [17] "Raspberry Pi 3: Specs, benchmarks & testing." [Online]. Available: <https://magpi.raspberrypi.org/articles/raspberry-pi-3-specs-benchmarks>.



UDC 004.031.2

Comparative Analysis of LPWAN Technologies

O. V. Diachuk

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

Abstract—The scope of Internet of Things (IoT) technologies is expanding year by year. One such area is the engineering of systems for collecting and transmitting information from various sensors for further processing and possible control of technological systems. Examples of such systems are "smart city" systems, environmental pollution control systems, natural disasters forecasting systems, soil moisture systems, etc. The technologies and protocols for building such systems must, first and foremost, be characterized by low energy consumption and cover large territorial areas. The technology of this class is commonly known as LPWAN (Low-power Wide-area Network). This paper solves the problem of analyzing the features of LPWAN technologies by the criteria: openness, coverage range, data rate and deployment cost, for further use in the construction of engineering systems for collecting and transmitting information from various sensors for further processing and possible control of technological systems. It is determined that the selected criteria is most consistent with the LoRaWAN protocol. Compared to other standards, LoRaWAN is the most open standard for creating small private networks. If we are building a LoRa specification network and we have a third-party device that responds to it, then the device in our network is quietly activated and can work. LoRa technology uses frequency bands that do not require licensing. A typical LoRaWAN network consists of the following elements: end devices, gateways, network server, application server.

Features of Lora modulation used at the physical layer of the LoRaWAN protocol are considered. LoRa is a "chirp spread spectrum (CSS)" modulation. This is a spread spectrum technique that uses broadband linear frequency modulated (chirp) pulses to encode information.

The network architecture is also analyzed in terms of the ability to create your own hardware components. It should be noted that LoRaWAN does not allow communication between devices: packets can only be transmitted from the end device to the network server or vice versa. Thus, communication between devices can only be implemented through an intermediate network server.

The openness of LoRaWAN enables you to create your own network components, most notably end devices and gateways, using available technical and hardware solutions that provide the necessary parameters. For example, a Raspberry Pi microcomputer (an estimated cost of \$ 38) can be used to build a gateway and an Arduino microcontroller (\$ 3) to create end nodes with appropriate sensors.

Keywords — *Internet of Things; LPWAN; LoRa; LoRaWAN; low power consumption*

