

Г. І. Влах-Вигриновська, М. А. Вигриновський, О. О. Іванюк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп’ютеризованих систем автоматички

ОГЛЯД І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ LPWAN ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

© Влах-Вигриновська Г. І., Вигриновський М. А., Іванюк О. О., 2018

Досліджено сучасні рішення та перспективи розгортання мереж з низьким енергоспоживанням LPWAN в Україні для розроблення ефективного рішення щодо підключення інтелектуальних, автономних і різнорідних пристроїв IoT з погляду терміну служби батареї, ємності, вартості та якості обслуговування, оскільки технології LPWAN забезпечуватимуть зв’язок десятків мільярдів пристроїв у наступному десятилітті.

Ключові слова: Інтернет речей, LPWAN, LoRa, NB-IoT, аналіз, властивості, перспективи.

The modern solutions and prospects of LPWAN low power network deployment in Ukraine are explored for efficient decision on connecting intelligent, autonomous and heterogeneous IOT devices in terms of battery life, capacity, cost and service quality. Because, LPWAN technology will shape tens of billions of devices in the next decade.

Key words: Internet of Things, LPWAN, LoRa, NB-IoT, analysis, properties, prospects.

Вступ

Розвиток Інтернету речей (IoT, Internet of Things) істотно змінив природу підключених пристроїв, створивши величезні можливості для сім’ї технологій глобальних мереж з низьким енергоспоживанням LPWAN (англ. Low-power Wide-area Network), які з’явилися у 2016 р. і поступово набувають популярності [1].

Сьогодні LPWAN привертають велику увагу передусім завдяки їхній здатності пропонувати доступне підключення до малопотужних пристроїв, розподілених на дуже великих географічних територіях. Протоколи LPWAN розраховані на термін служби пристроїв понад десять років з використанням джерела живлення типу “таблетка”. Для передавання даних на великі відстані та енергоощадності LPWAN застосовує надійну модуляцію і прості односторонні протоколи зв’язку відповідно.

Втілюючи бачення Інтернету речей, технології LPWAN доповнюють, а іноді й витісняють традиційні стільникові та бездротові технології WIFI, Bluetooth за продуктивністю з управління інфраструктурою, промисловим Інтернетом речей і реалізацією концепцій “розумне місто”. Найпопулярнішими серед таких технологій є LoRa, Sigfox, NB-IoT, RPMA, і Weightless [2, 4, 6], які конкурують за великомасштабне розгортання IoT. Їх поява зумовлена необхідністю підключення великої кількості приладів обліку і телеметрії для централізованого збирання даних на хмарних серверах.

Багато незалежних досліджень прогнозують, що до 2020 р. понад 50 мільярдів пристроїв будуть під’єднані через глобальні мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN). Можна сказати, що фактично ми живемо в епоху Інтернету речей, оскільки кількість пристроїв, пов’язаних між собою за допомогою Інтернету, перевищує кількість людей на планеті.

Мета роботи – дослідження особливостей будови та перспективи розгортання мереж з низьким енергоспоживанням LPWAN (LoRa, NB-IoT), з урахуванням пріоритетів операторів стільникового зв'язку України для розроблення ефективного рішення щодо підключення інтелектуальних, автономних і різнорідних пристроїв IoT.

Мережа з низьким енергоспоживанням LPWAN

У концепції IoT дистанційна взаємодія між пристроями побудована на обміні короткими фрагментами даних, але наявні бездротові технології далеко не завжди здатні ефективно забезпечити такий обмін. Технологія LPWAN була спеціально розроблена з метою надати простий, надійний і дешевий спосіб зв'язку датчиків і приладів обліку, розташованих на великій території, задовольняючи потреби додатків, невимогливих до швидкості передавання даних. В основу передавання даних LPWAN систем покладено принцип збільшення енергетики, а значить, і дальності зв'язку зі зменшенням швидкості передачі. Чим нижча бітова швидкість передачі, тим більше енергії вкладається в кожен біт і тим легше виділити його на тлі шумів на приймальній стороні. Отже, низька швидкість передавання даних дозволяє добитися більшої дальності поширення радіосигналу, і, як наслідок, збільшення радіуса дії приймальної станції. Отримані на сервері LPWAN дані від кінцевих пристроїв, безпосередньо підключених до шлюза за топологією “зірка”, використовуються для відображення, аналізу, побудови звітів та прийняття рішень. Управління пристроями й оновлення програмного забезпечення відбуваються з використанням зворотного каналу зв'язку [1, 3].

Варто зазначити, що LPWAN спеціально розробляли з розрахунку на Інтернет речей. Саме тому у цих мереж низька вартість обладнання та бюджетне енергоспоживання, а отже, в розпорядженні LPWAN – тривалий час автономної роботи від акумуляторів (до десяти років і більше).

З часом обладнання стає доступним за ціною, а інструменти інтеграції – простішими в експлуатації. Отримувати інформацію з датчиків, розташованих за декілька кілометрів від диспетчерського пункту, тепер дуже просто, до того ж інтегрувати дані з віддалених пристроїв можна в різні додатки. Залишилося лише організувати канали зв'язку.

Оскільки устаткування в LPWAN передає невеликі обсяги інформації, то потреби в забезпеченні високих швидкостей для такого класу обладнання немає, а це впливає на кінцеву вартість пристроїв. Завдяки цим факторам з'явилися сучасні мережі LPWAN [3].

Як правило, мережі LPWAN використовують для передавання малого об'єму даних (найчастіше до 1 МБ на місяць) від пристроїв, здатних роками працювати від одного AA-акумулятора, на великі відстані. Завдяки цьому вартість обслуговування такого обладнання в мережах LPWAN зводиться до мінімуму.

Сьогодні, згідно з думкою експертів J'son & Partners Consulting, до найпоширеніших технологій мереж далекого радіуса дії LPWAN належать: LoRaWAN, SIGFOX та Cellular Internet of Things (CIoT).

Технології LPWAN можна розділити на дві категорії. Це мережі, що потребують ліцензування робочих частот, і мережі, що розгортаються в неліцензованих смугах. Консорціум 3GPP [9-11] стандартизував два відкриті протоколи LTE-M і NB-IoT [10, 11], які використовують чинну стільникову інфраструктуру оператора. LoRa, SigFox, RPMA і Weightless є прикладами неклітинних технологій, які працюють у неліцензованих діапазонах і безкоштовно використовують ресурси бездротового спектра для розгортання мереж групової взаємодії й підвищують загальну надійність передавання інформації.

Зауважимо, що тестове розгортання мережі LPWAN в Україні заплановано на 2019 р.

Оператор lifecell вирішив за прикладом нідерландських колег будувати мережу, використовуючи технологію LoRaWAN. “LoRa працює на нижчих частотах і забезпечує більше покриття, ніж NB-IoT на LTE 1800”, – пояснили свій вибір в компанії. Оператор буде використовувати для цього частоту в 868 МГц. Така технологія дасть змогу підтримувати зв'язок між пристроями на відстані до 15 км з мінімальним споживанням енергії.

А оператори стільникового зв'язку Київстар і Vodafone погоджуються, що в Україні потрібні окремі мережі IoT, і почали розвивати NB-IoT, оскільки ця технологія забезпечує хороше покриття в приміщеннях і підземних спорудах, може обслуговувати величезну кількість з'єднань, а сумісні з нею пристрої доволі недорогі. Ще одна важлива перевага NB IoT – низьке енергоспоживання підключених пристроїв.

Технологія LoRa

LoRa – це технологія бездротового передавання даних, розроблена для енергоефективних мереж далекого радіуса дії (Low-Power Wide-Area Network або LPWAN), які передбачають автономні запити або передавання даних у пристроях (M2M), що дасть змогу об'єднувати пристрої в певні мережі на відстань до 20 км за швидкості до 50 Кбіт/с, а також мінімальне споживання електроенергії, що забезпечує до 10 років автономної роботи на одному акумуляторі типу AA [5, 7].

Технологія LoRa ґрунтується на технології розширення спектра, яка дозволяє збільшити дальність зв'язку майже в десять разів порівняно зі звичайними системами прямого радіозв'язку за тих самих аналогічних характеристик передавачів. Це досягається застосуванням:

- спеціальних сигналів з гауссовою модуляцією GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) з мінімальним фазовим зрушенням, перед модуляцією яких послідовність з прямокутних імпульсів даних проходить через фільтр Гаусса;
- частотно-маніпульованих FSK (Frequency Shift Keying) сигналів;
- ширококутних модуляцій з розширенням спектра, за яких дані кодуються ширококутними імпульсами з лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) з частотою, що збільшується або зменшується на деякому часовому інтервалі з коефіцієнтом розширення спектра $SK = 7-12$.

Модуляція LoRa визначає фізичний рівень передавання даних, тоді як LoRaWAN – це відкритий протокол для високоємних (до 1 000 000 пристроїв у одній мережі) мереж з великим радіусом дії й низьким енергоспоживанням, який LoRa Alliance стандартизував для малопотужних глобальних мереж (Low Power Wide Area Networks, LPWAN). LoRaWAN мережа організована як мережа типу “зірка”, а всі дрібні “зірки” з'єднують у велику “зірку”, тому відмова одного пристрою ніяк не позначається на системі загалом. Система містить різні класи (A, B і C) пристроїв для оптимізації компромісу між швидкістю доставлення інформації й терміном роботи за батарейного живлення.

LoRaWAN розробляли з можливістю застосування в загальнонаціональних мережах великих операторів зв'язку і LoRa Alliance стандартизує LoRaWAN з урахуванням сумісності й взаємодії з глобальними операторами зв'язку.

Мережа LoRaWAN

Мережа LoRaWAN складається з множини кінцевих пристроїв (модулів LoRa), які по бездротових з'єднаннях передають дані на один шлюз LoRa (Gateway/Concentrator), або одночасно на декілька. Підключення між пристроями й шлюзами здійснюється на двосторонній основі між кінцевими пристроями та сервером. Шлюз і кінцеві пристрої утворюють мережеву топологію типу “зірка”. Зв'язок між шлюзами здійснюється через бездротові рішення, які використовують ширококутну модуляцію LoRa або FSK. Далі шлюзи, які отримали інформацію, перенаправляють отримані пакети від кінцевого пристрою до хмарного мережевого сервера (Network Server), підключеного за допомогою стандартних технологій Wi-Fi/Ethernet/3G/4G, які належать до рівня інтерфейсів IP-мереж (фізичного і каналного рівнів стека TCP/IP) [3]. Отримані з кінцевих пристроїв дані зберігаються, відображаються й обробляються на сервері додатків (на автономному Web-сайті або в “хмарі”). Для аналізу IoT-даних можна застосовувати методи Big Data. Користувачі за допомогою клієнтських додатків, встановлених на смартфон або ПК, мають можливість доступу до інформації на сервері додатків.

Мережа LoRa зазвичай має топологію “зірка”, в якій пристрої під'єднуються через шлюзи LoRa, які, своєю чергою, підключені до загального сервера мережі (NetServer) через стандартні протоколи IP (рис. 1).



Рис. 1. Архітектура мережі LoRaWAN

Швидкість передавання даних між кінцевими пристроями та шлюзами варіюється від 0,3 до 50 кбіт/с і може регулюватися самими шлюзами залежно від сценаріїв використання. Мережева архітектура LoRaWAN – “клієнт-сервер”. Експериментальні дослідження, виконані із застосуванням технології LoRa, показали, що моделі LPWAN повинні доповнити наявні стандарти Інтернету речей [3, 7].

У LoRaWAN мережах стандарту передбачено обов’язкове дворівневе шифрування даних двома різними AES-64 і 128 ключами для захисту від несанкціонованого доступу і спотворення, або перехоплення даних, переданих кінцевими пристроями.

Для вирішення різних завдань і застосувань на основі LoRa MAC-рівня передбачено три класи пристроїв:

- Клас А. Пристрої із двостороннім каналом. Зв’язок ініціює кінцевий пристрій, після чого виділяють два часових вікна, протягом яких очікується відповідь від мережі.

Цей клас має найвищу енергоефективність, бо пристроям необхідно отримати пакет даних із сервера тільки після відправлення свого пакета даних і найпоширеніший на практиці.

- Клас В. Пристрої з двостороннім каналом. Додатково до функцій пристроїв “класу А” відкривають додаткові вікна приймання за розкладом. Для цього кінцевий пристрій синхронізується за спеціальними сигналами, які отримує від шлюзу. Ініціатором обміну може бути як кінцевий пристрій, так і сервер LoRaWAN мережі. Пристрої класу В також мають всі можливості пристроїв класу А.

- Клас С. Пристрої з двостороннім каналом і максимальним приймальним вікном. Кінцеві пристрої мають майже безперервно відкрите вікно приймання, яке закривається тільки на час передавання даних, і найменшу затримку між сервером і кінцевими пристроями. Цей клас пристроїв споживає найбільшу кількість енергії (порівняно з класами А і В), тому зазвичай не використовує батарейного живлення.

Порівняння класів пристроїв LoRa

Клас типу А	Клас типу В	Клас типу С
Живлення від батареї	Низька затримка	Немає затримки
Повідомлення Unicast	Повідомлення Unicast та Multicast	Повідомлення Unicast та Multicast
Невеликі корисні навантаження Довгі інтервали	Невеликі корисні навантаження Довгі інтервали Періодичний маяк зі шлюзу	Невеликі корисні навантаження
Кінцевий пристрій ініціює зв’язок (висхідна лінія)	Додаткове вікно приймання	Сервер може ініціювати передавання у будь-який час
Сервер здійснює зв’язок з кінцевим пристроєм по низхідній лінії зв’язку під час заданих вікон відповіді	Сервер може ініціювати передавання з фіксованими інтервалами	Кінцевий пристрій постійно отримує

Щоб максимально збільшити час роботи батареї кінцевих пристроїв і загальну ємність мережі, мережевий сервер LoRa керує швидкістю передавання даних для кожного кінцевого пристрою окремо за допомогою схеми адаптивної швидкості передавання даних.

Можна сказати, що поява енергоефективних бездротових технологій LoRaWAN є ідеальним рішенням для побудови глобальних, і водночас, простіших мереж передавання даних з великою кількістю кінцевих пристроїв й тривалою автономною роботою.

Технологія NB-IoT

Нову технологію вузькосмугового бездротового Інтернету речей NB-IoT (Narrowband Internet of Things) розробив у 2016 р. консорціум 3GPP. Це розширення традиційного ліцензійного стандарту стільникового зв'язку для пристроїв IoT, що використовує наявну інфраструктуру мереж операторів зв'язку [9–11]. NB-IoT можна порівняти з LTE (4G). Технологія NB-IoT використовує переваги мережі 4G: інфраструктура, діапазон та безпека, оскільки характеризується відмінним покриттям і широким діапазоном. NB-IoT розроблено так, щоб витрати на модуль були максимально низькими. Очікується, що ці витрати в майбутньому опустяться нижче від 2 доларів за модуль. Через малу пам'ять (дешевий варіант PSRAM) і єдину антену NB-IoT дешевший за стільниковий M2M.

Однією з особливостей технології NB-IoT є можливість підключати до одного стільника базової станції до 100 тисяч пристроїв, що в десятки разів перевищує можливості наявних стандартів мобільного зв'язку. Використання низькочастотного діапазону (ширина смуги одного каналу – 180 кГц) дозволить забезпечити широку область покриття, охоплюючи важкодоступні місця, такі як цокольні приміщення, підвали тощо. Крім того, працюючи в новому стандарті, пристрої економніше витрачають заряд акумулятора, що дозволяє їм працювати без додаткового живлення до десяти років з використанням до 200 байт на день.

NB-IoT відповідає вимогам ринку LPWA, даючи змогу телеком-операторам працювати з вже традиційними напрямками IoT, такими як “розумні” датчики витрати води, газу, електрики, стеження за об'єктами на базі наддешевих IoT-пристроїв, а також відкриває нові можливості в таких галузях, як сільське господарство, охорона здоров'я, системи забезпечення безпеки, транспорт, логістика.

Консорціум 3GPP пропонує три сценарії розгортання мережі NB-IoT (рис. 2):

1. Standalone operation (автономний режим роботи). Одним з можливих сценаріїв є виділення одного частотного інтервалу 200 кГц у діапазоні GSM, що дає змогу організувати NB-IoT радіоканал з двома захисними інтервалами по 10кГц.

2. Guard band operation (робота в захисній смузі мережі LTE) – виділення одного ресурсного блока в захисному інтервалі за межами робочої смуги частот, використовуваної для надання послуг LTE. Зокрема, захисна смуга для діапазону LTE, ширина якого 20 МГц, становить 1 МГц з кожного боку, для діапазону LTE (ширина 10 МГц) – по 500 кГц.

3. In-band operation (робота в смузі мережі LTE) – виділення одного ресурсного блока в робочій смузі частот, використовуваній для надання послуг LTE.



Рис. 2. Режими для розгортання LPWAN NB-IoT

Сценарій суміщеної роботи (In-band), коли для пристроїв NB-IoT використовують ресурсні радіоблоки всередині наявних радіоканалів, діючих мереж LTE, які мають найбільше покриття і забезпечують необхідну якість обслуговування Інтернету речей. Це оптимальний шлях для

підключення IoT, оскільки дає змогу операторам зв'язку використовувати сучасне обладнання без істотних змін апаратного забезпечення. Отже, in-band NB-IoT дає можливість задовольнити поточний попит на підключення розумних пристроїв.

Швидкість передавання даних у NB-IoT досягає 200 Кбіт/с, що достатньо для пристроїв, які періодично передають однотипні дані невеликого обсягу.

Технологія NB-IoT демонструє успішну інтеграцію технології в мобільну мережу операторів стільникового зв'язку та використовує переваги мережі LTE (4G) і може стати лідером у розробленні рішень NB-IoT для різних вертикальних галузей, серед яких комунальні послуги, сільське господарство, виробництво, настільні електронні пристрої і транспорт, з метою створення досконалого світу зв'язку [11].

Порівняльний аналіз NB-IoT і LoRaWAN

1. Простота розгортання.

NB-IoT – це стандарт стільникового зв'язку, тому для роботи базових станцій необхідно отримати ліцензію. NB-IoT мережа працює в ліцензованій частині спектра – на частотах, де запущені мережі 4G (від 1800 МГц і нижче). Тобто можна додатково використовувати інфраструктуру 4G 1800, який в минулому році з'явився в Україні.

LoRaWAN – стандарт протоколу LPWAN, що працює у технологічному середовищі LoRa. Для роботи LoRaWAN не потрібно отримання ліцензій від держави на використання частот.

2. Синхронізація.

Оскільки мережа NB-IoT належить до стільникового зв'язку, то пристрої, що працюють в ній, повинні “прокидатися” і синхронізуватися з мережею. В іншому випадку отримати або відправити повідомлення не вдасться. Кожен сеанс синхронізації забирає в акумуляторного пристрою заряд енергії.

Устаткування в мережі LoRaWAN працює зовсім інакше. Асинхронне надсилання даних передбачає передавання даних тільки тоді, коли ці дані є. Поки пристрою нічого передавати, він у стані “сон”, економлячи енергію. Можна також задати надсилання даних за розкладом або незалежно від часу.

3. Час автономної роботи.

Оскільки NB-IoT працює у ліцензованому спектрі частот, пристрої повинні синхронізуватися з мережею доволі часто, що призводить до швидкого розряджання акумулятора типу AA.

В архітектурі LoRa синхронізація з мережею не потрібна у разі використання пристроїв LoRa класу A, C, що допомагає зберегти заряд акумулятора.

4. Швидкість передавання даних.

Середня швидкість передавання даних у мережах NB-IoT – 200 Кбіт/с. NB-IoT – ефективніший протокол IoT для “швидших” додатків.

Швидкість передавання даних у мережі LoRa становить від 300 біт/с до 50 Кбіт/с, в міру віддалення від антени знижується, і може опускатися до 11 Кбіт/с, чого, по суті, все одно досить для передавання невеликих обсягів даних.

5. Пропускна смуга

NB-IoT зазвичай працює на вищій пропускну здатності, ніж LoRaWAN, яка становить 180 кГц. LoRa використовує 125 КГц.

6. Покриття мережі

NB-IoT найкраще працює у складних міських районах. Продуктивність мережі буде надлишковою в приміських або сільських районах.

LoRaWAN не покладається на мобільні дані, її покриття залишається порівняно стійким незалежно від умов місцевості.

7. Управління SIM-картами.

Для роботи в мережі NB-IoT потрібна наявність SIM карти, які можуть бути трьох різних форматів – звичайні, термо-SIM карти для роботи в екстремальних кліматичних умовах, SIM-чипи для невеликих пристроїв.

Впровадження технології LoRa істотно посилило конкуренцію на ринку бездротових технологій IoT для стільникових технологій, бо вона працює без SIM карти і відповідно кінцевий вузол підключається до мережі безкоштовно.

Зауважимо, що нині для використання 2G і 3G обладнання потрібно купувати SIM-карти. Але для стільникових LPWAN-мереж, які основані на 4G, розробляють модулі з вбудованими програмованими SIM-чипами, що дасть змогу здешевити й спростити взаємодію з оператором зв'язку.

8. Розгортання мережі LPWAN в Україні.

Оператор стільникового зв'язку lifecell планує розгортати мережу, використовуючи технологію LoRaWAN та частоту 868 МГц. Така технологія дозволить підтримувати зв'язок між пристроями на відстані до 15 км з мінімальним споживанням енергії.

Оператори стільникового зв'язку Київстар і Vodafone погоджуються, що в Україні потрібні окремі мережі IoT, і почали розгортати мережу NB-IoT, яка дає змогу забезпечити хороше покриття в приміщеннях і підземних спорудах і обслуговувати величезну кількість кінцевих пристроїв.

Висновки

Технології NB-IoT і LoRa є двома репрезентативними проривами бездротового LPWAN в секторі зв'язку. Порівняно з GPRS, LPWAN є кращим рішенням для низького енергоспоживання та поліпшеного покриття, а порівняно з IoT ZigBee і WiFi, LPWAN уможливорює масові з'єднання, що охоплюють великі відстані за рахунок мінімальних монтажних робіт і технічного обслуговування.

Зокрема, зазначимо, що розроблення і впровадження технології LoRa істотно посилило конкуренцію для стільникових технологій GSM, NB-IoT, які використовують ліцензовані смуги частот та підтримку SIM-карт.

Отже, можна сказати, що сьогодні LoRa має низку переваг за технічними параметрами, використанням неліцензійного спектра, простою регулювання, до того ж не потрібно ліцензії на надання послуг передавання даних.

1. *Интернет вещей: учеб. пособ. / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 200 с.* 2. Nokia, “Nokia LTE M2M - Optimizing LTE for the Internet of Things”, White paper, 2014. 3. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. *On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. Proceedings of the 14th International Conference on ITS Telecommunications; 2015 Dec 2–4; Copenhagen, Denmark, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway(2015), pp. 55–59.* 4. SigFox, “Sigfox – The Global Communications service provider for the Internet of Things (IoT),” <https://www.sigfox.com/en>. 5. LoRa Alliance, “LoRa Technology – LoRa Alliance,” <https://www.loraalliance.org/What-Is-LoRa/Technology>. 6. Weightless, <http://www.weightless.org/>. 7. Semtech, “LoRaWAN Specification v1.0”, Jan. 2015. 8. Aerial, “Biconical antenna D100-1000”, brochure, http://aerial.fi/wpcontent/uploads/2014/08/aerial_special.pdf, Aug. 2014. 9. 3GPP, “The 3rd Generation Partnership Project,” Available: <http://www.3gpp.org/>. 10. 3GPP, “TR 45.820 Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT)”, version 13.1.0, December 2015. Available: <http://www.3gpp.org/>. 11. Oh S.-M. and Shin J. “An Efficient Small Data Transmission Scheme in the 3GPP NB-IoT System,” in *IEEE Communication Letters*, vol. 7798, No. c, pp. 1–1, 2016.