

УДК 004.85

О. В. ПОЛОНЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент;

О. М. ТКАЛЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

В. І. АГАФОНОВА, магістр,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕРЕЖІ LoRaWAN

**Досліджено технічні характеристики мережі LoRaWAN. У ході дослідження запропоновано параметри, які потрібно змінити, щоб покращити роботу даної технології, збільшити швидкість передавання та знизити швидкість помилок пакета за наявності коротких завад. Розглянуто основні переваги та недоліки технології LoRaWAN. Змінення параметрів дасть змогу більш ефективно працювати. Технологію LoRaWAN орієнтовано на програми, що потребують гарантованого передавання невеликого обсягу даних, можливості тривалої роботи мережних пристроїв від автономних джерел живлення, великого територіального охоплення безпроводовою мережею.**

**Ключові слова:** технологія LoRaWAN; параметри; ефективність; кадр; чутливість приймача; пропускна здатність.

### Вступ

LoRa — радіошарування, що забезпечує можливість далекого зв'язку. Технологічний стек LoRa/LoRaWAN є найкращим вибором для підімкнених міст через його довгий діапазон сигналів та мінімальні потреби в енергії. Залежно від умов сигнали можуть досягати 10...15 км.

Саме технологія LoRaWAN сприятиме розв'язанню важливих питань, використовуватиме ще ширший спектр застосувань і, зрештою, забезпечить успіх глобального масового розгортання IoT у майбутньому.

LoRaWAN (*Long Range wide-area networks*, глобальна мережа великого радіусу дії) — найбільш відомий апаратний протокол LoRa, який призначено для керування зв'язком між LPWAN-шлюзами і кінцевими пристроями.

LoRaWAN базується на топології «зірка» [1; 2]. Безліч пристроїв по безпроводовому з'єднанню передають дані не на один шлюз, а відразу на кілька. Підімкнення між пристроями і шлюзами відбувається на двобічній основі, а зв'язок між шлюзами здійснюється через безпроводові вирішення, які використовують широкосмугову модуляцію LoRa або FSK. Технологію радіодоступу LoRa застосовують у комунікаціях між кінцевим пристроєм і шлюзами. Шлюзи та мережний сервер під'єднуються через стандартні IP-з'єднання.

Потім шлюзи, які одержали інформацію, перенаправляють отримані пакети від кінцевого вузла до хмарного мережного сервера, підімкненого через мобільний або супутниковий зв'язок. Звідти дані надходять на сервери додатків.

Використання кількох шлюзів зручно тим, що кінцеві вузли не мають прив'язки. Це дає можливість гарантувати передавання інформації і контролювати пристрої, що перебувають у русі.

**Постановка проблеми.** Розглядається технологія LoRaWAN, основні галузі застосування технології: енергетика, житлово-комунальне господарство, сільське господарство, безпека і охоронні системи, моніторинг автомобільного трафіку, моніторинг навколишнього середовища, будівництво, медицина та додатки Інтернету речей. Сфера застосування дуже широка, тому необхідно визначити основні переваги та недоліки технології, дослідити її параметри для покращення ефективності роботи технології LoRaWAN.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технологія низькошвидкісного передавання даних LoRaWAN досліджувалась такими науковцями, як Восколович А. І., Панченко І. В., Чурилов І. А. [5]. Однак виконані дослідження в цій роботі не описують підвищення показників ефективності роботи технології.

**Мета дослідження** — проаналізувати технічні характеристики LoRaWAN для покращення ефективності роботи даної технології.

### Основна частина

Розглянемо технічні характеристики технології LoRaWAN.

Стандарт — LoRaWAN.

Частота — 863...870 МГц.

Дальність дії — 2...5 км у місті; до 15 км поза містом.

Швидкість передавання — 290 біт/с ... 50 Кбіт/с.

Енергоспоживання — низьке.  
 Масштабованість — так.  
 Діапазон ISM — так.  
 Автентифікація — так.  
 E2E шифрування — так.  
 Вартість обладнання — низьке.  
 Місцезнаходження сенсора відомо — так.  
 Повна двонапрямленість — так, залежно від режиму.  
 Підтримання сенсорів, які рухаються між хабами — так.

**Огляд фізичного шару.** LoRa — це модуляція широкого спектра чирпу [3], в якій використовуються частотні чирпи з лінійною варіацією частоти в часі з метою кодування інформації. Зважаючи на лінійність імпульсів сигналу, зсув частоти між приймачем і передавачем еквівалентно тимчасовим зміщенням, які легко усуваються в декодері. Це також робить цю модуляцію несприйнятливою до ефекту Доплера, еквівалентного зсуву частоти. Зсув частоти між передавачем і приймачем може досягати 20% пропускної здатності, не впливаючи на продуктивність декодування [4]. Це допомагає знизити ціну передавачів LoRa, оскільки кристали, вбудовані в передавачі, не потрібно виготовляти з надзвичайною точністю. Приймачі LoRa здатні зафіксувати отримані частотні сигнали, пропонуючи чутливість порядку  $-130$  дБм [3; 4].

Оскільки тривалість символу LoRa довша, ніж типові сплески AMinterference, що породжуються системами спектра частотного стрибкового розширення (FHSS), помилки, породжені подібними завадами, легко виправляються за допомогою коду виправлення помилок вперед (FECs). Типова позаканальна селективність (максимальне співвідношення потужності між заводою в сусідній смузі та сигналом LoRa) та відхилення спільного каналу (максимальне співвідношення потужності між втручанням у тому самому каналі та сигналом LoRa) приймачі LoRa становлять відповідно 90 та 20 дБ [3; 4]. Це перевершує традиційні схеми модуляції, зокрема частотну модуляцію (FSK), і робить LoRa добре придатною для передавання малої потужності та передавання далекого радіусу дії.

**Параметри фізичного шару.** Для налаштування модуляції LoRa доступно кілька параметрів: пропускна здатність  $BW$ , коефіцієнт поширення  $SF$  та швидкість коду  $CR$ . LoRa використовує нетрадиційне визначення коефіцієнта поширення як логарифма у базі 2 кількості сигналів на символ. Ці параметри впливають на ефективний бітрейт модуляції, її стійкість до завад і простоту розшифрування.

Ширина смуги пропускань є найважливішим параметром модуляції LoRa. Символ LoRa складається із сигналів  $2SF$ , які охоплюють весь частотний діапазон. Починається з серії верхніх сигналів. Коли максимальної частоти смуги буде досягнуто, частота згортається, і її збільшення починається знову з мінімальної частоти. Приклад передавання LoRa в коливанні частоти в часі наведено на рис. 1. Положення цього розриву в частоті — це те, що кодує передану інформацію. Оскільки в символі є сигнали  $2SF$ , символ може ефективно кодувати  $SF$ -біти інформації.

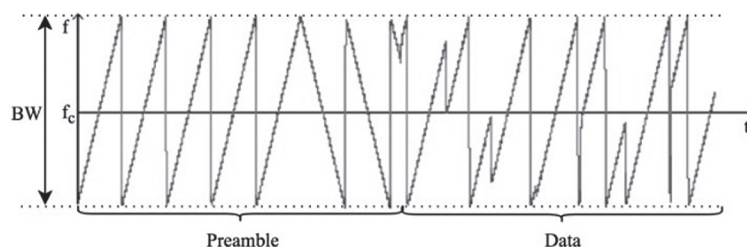


Рис. 1. Коливання частоти в часі зразкового сигналу, що випромінюється передавачем LoRa [5]:  
 $f_c$  — центральна частота каналу,  $BW$  — пропускна здатність

У LoRa швидкість сигналу залежить лише від пропускної здатності: швидкість сигналу дорівнює пропускній здатності (один сигнал за секунду на Герц пропускної здатності). Це має кілька наслідків для модуляції: збільшення одного з коефіцієнтів поширення розділить частотний діапазон сигналу на два (оскільки  $2SF$  сигналу покривають усю пропускну здатність) і помножить тривалість символу також на два. Однак він не розділить швидкість передавання бітів на два, оскільки в кожному символі буде передано ще один біт. Більше того, оскільки швидкість передавання символів і швидкість передавання бітів при заданому коефіцієнті поширення пропорційні частотній смузі частот, то подвоєння пропускної здатності ефективно подвоює швидкість передавання. Це подано в формулі (1), яка пов'язує тривалість символу  $T_s$  з пропускну здатністю та коефіцієнтом поширення:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}. \quad (1)$$

Окрім того, LoRa має прямий код виправлення помилок. Швидкість коду  $CR$  дорівнює:  $4/(4 + n)$ , при  $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ . Враховуючи це, а також той факт, що  $SF$ -біти інформації передаються за символ, формула (2) дає змогу обчислити корисну швидкість передавання бітів  $R_b$ :

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR. \tag{2}$$

Наприклад, установка з  $BW = 125$  кГц,  $SF = 7$ ,  $CR = 4/5$  дає швидкість передавання бітів  $R_b = 5,5$  кбіт/с. Ці параметри також впливають на чутливість декодера. Взагалі, збільшення пропускної здатності знижує чутливість приймача, тоді як збільшення коефіцієнта поширення збільшує чутливість приймача. Зниження швидкості коду допомагає знизити швидкість помилок пакета  $PER$  за наявності коротких сплесків завад, тобто пакет, переданий із кодовою швидкістю  $4/8$ , буде більш толерантним до завад, ніж сигнал, що передається з кодовою швидкістю  $4/5$ . Цифри в наведеній далі таблиці взято з таблиці даних SX1276 [3].

Інший параметр модуляції LoRa, реалізований у приймачах Semtech, — це низька оптимізація швидкості передавання даних. Цей параметр є обов’язковим у LoRa у разі використання коефіцієнтів поширення 11 і 12 із пропускною здатністю 125 кГц або меншою. Ефект цього параметра не задокументовано, однак формула (2) показує, що він вдвічі зменшує кількість бітів, переданих на символ.

Чутливість приймача LoRa Semtech SX1276 LoRa, дБм, за різної пропускної здатності та коефіцієнтів поширення

$SF$	7	8	9	10	11	12
$BW$						
125 кГц	-123	-126	-129	-132	-133	-136
250 кГц	-120	-123	-125	-128	-130	-133
500 кГц	-116	-119	-122	-125	-128	-130

**Формат фізичного кадру.** Хоча модуляція LoRa може бути застосована для передавання довільних кадрів, фізичний формат кадру задається та реалізується у передавачах і приймачах Semtech. Ширина смуги пропускання та коефіцієнт поширення є постійними для кадру.

Кадр LoRa починається з преамбули. Преамбула починається з послідовності постійного підняття, яке охоплює весь діапазон частот. Останні два підняття кодують слово синхронізації. Слово синхронізації — це однокбайтове значення, яке застосовують для диференціації мереж LoRa, що використовують однакові смуги частот. Пристрій, налаштований на задане слово синхронізації, перестане слухати передавання, якщо декодоване слово синхронізації не відповідає його конфігурації. За словом синхронізації йдуть два з чвертю нижніх сигнали тривалістю 2,25 символу. Загальна тривалість цієї преамбули може бути налаштована між 10,25 та 65,539,25 символами. Структуру преамбули зображено на рис. 2.

Після преамбули з’являється необов’язковий заголовок. Коли заголовок наявний, він передається зі швидкістю коду  $4/8$ . Це вказує на розмір корисного навантаження (у байтах), швидкість коду, застосовного для кінця передавання, та чи є 16-бітна  $CRC$  для корисного навантаження в кінці кадру. Заголовок також включає в себе  $CRC$ , щоб дати можливість приймачу відкидати пакети з недійсними заголовками. Розмір корисного навантаження зберігається за допомогою одного байта, обмежуючи розмір корисного навантаження до 255 байт. Заголовок не є обов’язковим, що дозволяє його вимкнути в ситуаціях, коли це не потрібно, наприклад, коли довжина корисного навантаження, швидкість кодування та наявність  $CRC$  відомі раніше. Корисне навантаження надсилається після заголовка, а в кінці кадру — додаткова  $CRC$ . Схематичне узагальнення формату кадру унаочнює рис. 2.

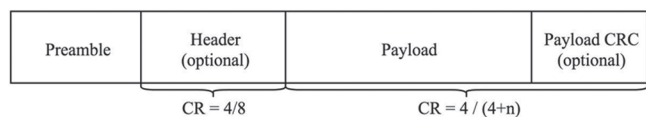


Рис. 2. Структура кадру LoRa,  $n \in \{1..4\}$

Формула (3), отримана з таблиць даних Semtech [3; 4], дає кількість символів, необхідних для передавання корисного навантаження  $n_s$ , як функцію всіх цих параметрів. Це число слід додати до кількості символів преамбули, щоб обчислити загальний розмір пакета в символах:

$$n_s = 8 + \max \left( \left[ \frac{8PL - 4SF + 8 + CRC + H}{4 \times (SF - DE)} \right] \times \frac{4}{CR} \right), \tag{3}$$

де  $PL$  — розмір корисного навантаження в байтах;  $CRC = 16$ , якщо  $CRC$  увімкнено, а нуль інакше;  $H = 20$ , коли заголовок увімкнено, і нуль в іншому разі;  $DE = 2$ , коли увімкнено низьку оптимізацію швидкості передавання даних, і нуль інакше. Ця формула також показує, що мінімальний розмір пакета становить вісім символів.

**Висновки**

Проаналізувавши технічні характеристики мережі LoRaWAN, доходимо висновків, що подвоєння пропускної здатності ефективно подвоює швидкість передавання, а збільшення пропускної здатності

знижує чутливість приймача, тоді як збільшення коефіцієнта поширення збільшує чутливість приймача, також зниження швидкості коду допомагає знизити швидкість помилок пакета *PER* за наявності коротких появ завад.

Визначили такі переваги технології LoRaWAN: велика віддаль передавання сигналу порівняно з іншими безпроводовими технологіями досягає 10...15 км; низький рівень споживання енергії в кінцевих пристроїв; висока проникна здатність радіосигналу; висока масштабованість мережі на великих територіях; відсутність необхідності отримання частотного дозволу та плати за радіочастотний спектр, внаслідок використання неліцензованих частот (ISM band); низька вартість обладнання.

Недоліки LoRaWAN: відносно низька пропускна здатність внаслідок використання низької частоти радіоканалу. Варіюється залежно від використовуваної технології передавання даних на фізичному рівні, становить від кількох сотень біт за секунду до кількох десятків кілобіт за секунду. Затримка передавання даних від дачача до кінцевого додатку, пов'язана з часом передавання сигналу, може досягати від кількох секунд до кількох десятків секунд.

Таким чином, поява енергоефективних безпроводових технологій LoRaWAN дасть можливість будувати глобальні і водночас більш прості мережі передавання даних із великою кількістю кінцевих вузлів. Основні переваги — це розширений радіус дії, тривала автономна робота і гарантоване виявлення корисного сигналу на тлі впливу завад.

#### Список використаної літератури

1. **Технологія LoRaWAN** [Електронний ресурс]. URL: <https://deps.ua/knowegable-base-ru/spravochnaya-informatsiya/item/66633.html> (дата звернення 3.12.2019).
2. **Проблеми інформатизації та управління** [Електронний ресурс] 2017. URL: [file:///C:/Users/admin/Downloads/12810-33334-1-SM%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/12810-33334-1-SM%20(1).pdf).
3. **3GPP, Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT)**, 3GPP, Nov. 2015.
4. **LoRa SX1276/77/78/79** [Електронний ресурс] 2015. URL: [http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1276\\_77\\_78\\_79.pdf](http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1276_77_78_79.pdf).
5. **Технологія низькошвидкісної передачі даних LoRaWAN** [Електронний ресурс]. URL: [http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2017/2/3\\_2\\_2017.pdf](http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2017/2/3_2_2017.pdf).

**Рецензент:** доктор техн. наук, доцент **К. П. Сторчак**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

#### *О. В. Полоневич, О. М. Ткаленко, В. И. Агафонова* **ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТИ LORAWAN**

*Исследованы технические характеристики сети LoRaWAN. В ходе исследования выделены и предложены какие из параметров нужно изменить, чтобы улучшить работу данной технологии, увеличить скорость передачи и снизить скорость ошибок пакета при наличии коротких помех. Рассмотрены основные преимущества и недостатки технологии LoRaWAN. Изменение параметров позволит более эффективно работать. Технология LoRaWAN ориентирована на приложения, требующие гарантированной передачи небольшого объема данных, возможности длительной работы сетевых устройств от автономных источников питания, большого территориального охвата беспроводной сети.*

**Ключевые слова:** технология LoRaWAN; параметры; эффективность; кадр; чувствительность приемника; пропускная способность.

#### *O. V. Polonevich, O. M. Tkalenko, V. I. Agafonova* **LORAWAN TECHNICAL SPECIFICATIONS**

*This article explores the technical characteristics of the LoRaWAN network. In the course of the study, we highlighted and suggested which of the parameters need to be modified to improve the operation of this technology, increase transmission speed, and reduce packet error rates in the presence of short interference. The main advantages and disadvantages of LoRaWAN technology are discussed. Changing the settings will allow you to work more efficiently. LoRaWAN technology is focused on applications that require the guaranteed transfer of small amount of data, the possibility of long-term operation of network devices from standalone power sources, large territorial coverage of the wireless network.*

**Keywords:** LoRaWAN technology; parameters; efficiency; frame; receiver sensitivity; capacity.