

## ТЕХНОЛОГІЯ НИЗЬКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ LORA

*В роботі проведено огляд технології низькошвидкісної передачі даних LORA, розглянуто модель каналу зв'язку. Проведений порівняльний аналіз дальності зв'язку та чутливості приймача з аналогічними низькошвидкісними технологіями передачі даних.*

**Восколович А.И., Панченко И.В., Чурилов И.А. Технология низкоскоростной передачи данных LORA.** *В работе проведен обзор технологии низкоскоростной передачи данных LORA, рассмотрена модель канала связи. Проведен сравнительный анализ дальности связи и чувствительности приемника с аналогичными низкоскоростным технологиями передачи данных.*

**O.Voskolovich, I.Panchenko, I.Chyrylov Low-speed data transmission technology LORA.** *In this paper, we reviewed the low-power LORA technology, and considered the communication channel model. Conducted a comparative analysis of the communication range and sensitivity of the receiver with similar low-speed data transmission technologies.*

**Ключові слова:** LORA, CSS, LPWAN, дальність зв'язку, чутливість приймача.

**Постановка завдання.** Бездротові сенсорні мережі WSNs (англ. *Wireless sensor networks*) в останні роки мають стрімкий розвиток, обумовлений автоматизацією процесів збору даних та автоматичного керування відповідно до концепції IoT (англ. *Internet of Things*), а також використанням військовими формуваннями для різних цілей, таких як моніторинг та відстеження сил супротивника і захист власних підрозділів [1 – 4].

Типовий елемент WSNs, як правило, є компактним пристроєм з низькою швидкістю передачі даних і малим власним енергоспоживанням. Одним з основних вимог до нього є мінімальна вартість організації каналу зв'язку. Використання існуючих стільникових мереж для цілей WSNs прийнято вважати надлишковим і дорогим, складні протоколи і підвищена швидкість обміну інформацією призводять до надмірного енергоспоживання і швидкої розрядки батарей датчиків і інших пристроїв [2].

Для кінцевих пристроїв мережі, зазвичай виконуючих функції збору даних, не так важливі швидкість і обсяг переданої інформації, визначальними характеристиками є тривалість роботи без додаткового обслуговування і зарядки акумуляторів (вимірюється місяцями і роками).

Для відповідності даній вимозі активно впроваджуються нові типи малопотужних мереж LPWAN (англ. *Low-power Wide-area Network*), описаних у стандарті IEEE 802.15.4-2003 [2 – 5], що відрізняються низьким енергоспоживанням і одночасно великим радіусом дії. До типових елементів мереж даного типу відносяться автономні лічильники споживання (води, газу, електрики), встановлені в підвалах житлових будинків, модулі управління вуличним освітленням, датчики систем безпеки, тощо.

В даний час існує декілька поширених LPWAN технологій для WSNs, які працюють в неліцензованих субгігагерцових частотних діапазонах – LORA, SigFox, СТРИЖ, *Wheatghless-W* та ін. [3, 4].

Основні характеристики найбільш популярних технологій LPWAN дальньої дії представлено в табл.1. З таблиці 1 видно, що за всіма критеріями найбільш цікавими є технології LORA, SigFox, СТРИЖ. В свою чергу SigFox та СТРИЖ мають частково та повністю закрити архітектуру системи відповідно, що значно ускладнить, а в деяких випадках і унеможливить процес розгортання власної бездротової сенсорної мережі. Таким чином дослідження технології низькошвидкісної передачі даних LORA є актуальним і буде проведено в даній роботі.

Таблиця 1

	<i>LORA</i>	СТРИЖ	<i>SigFox</i>	<i>Wheatghless-W</i>	<i>Nuel</i>	<i>Nwave</i>	<i>Dash7</i>
Дальність	2-5 км в місті, до 45 км поза містом	до 40 км	10 км в місті, до 50 км поза містом	2-5 км	до 10 км	до 10 км	до 2 км в місті
Частота	різна, до 1 ГГц	868,8 МГц	868/902 МГц	до 1 ГГц	до 1 ГГц	до 1 ГГц	різна, до 1 ГГц
Швидкість передачі	0,3 – 50 кбіт/с	до 50 біт/с	10-100 біт/с	до 100 біт/с	10-100 кбіт/с	до 100 біт/с	до 167 кбіт/с
Симетричність каналу	так	так	ні	так	так	ні	так
Прошивка ПЗ *по повітря*	так	ні	ні	так	ні	ні	так
Місцезнаходження сенсора відоме	так	триангуляція RSSI	ні	так	ні	ні	так
Стандарт	<i>LORA</i>	немає	немає	<i>Wheatghless</i>	<i>Wheatghless</i>	<i>Wheatghless</i>	ISO/IEC 18000-7

*Аналіз останніх публікацій.* Дії в каналі зв'язку з розширенням спектру методом CSS перекриття сигналів (міжсимвольної інтерференції) внаслідок багатопроменевого поширення досліджувались такими науковцями як *Taeung Yoon, Dahae Chong, Sangho Ahn, Seokho Yoon* в роботі [6]. Вплив доплерівського зсуву частоти та результату дії багатопроменевого поширення на канал зв'язку *LORA* досліджувались авторами С.М.Кириловим, І.В.Лукашином, Ю.І.Полтавцем в роботі [7]. Однак проведені дослідження в цих роботах не описують модель та основні характеристики каналу зв'язку *LORA*, не проводиться порівняльний аналіз дальності зв'язку та чутливості приймача з аналогічними низькошвидкісними технологіями передачі даних.

*Метою статті* є огляд технології *LORA*, представлення моделі каналу зв'язку, а також проведення порівняльного аналізу дальності зв'язку та чутливості приймача з аналогічними низькошвидкісними технологіями передачі даних.

*Основний матеріал.* Технологія модуляції *LORA™* (від англ. *Long Range*) являє собою метод модуляції, який дозволяє отримати значно більшу дальність зв'язку (зону покриття), ніж інші конкуруючі з ним способи. Цей тип модуляції ґрунтується на технології модуляції з розширеним спектром і варіації лінійної частотної модуляції (англ. *CSS – chirp spread spectrum*) з інтегрованою прямою корекцією помилок *FEC* (англ. *FEC – forward error correction*) [8, 9].

Технологія *LORA* значно підвищує чутливість приймача і аналогічно іншим методам модуляції з розширеним спектром, використовує всю ширину смуги пропускання каналу для передачі сигналу, що робить його стійким до каналних шумів і нечутливим до зсувів, викликаних неточностями в налаштуванні частот при використанні недорогих опорних кварцевих резонаторів. Технологія *LORA* дозволяє здійснювати демодуляцію сигналів з рівнями на 19,5 дБ нижче рівня шумів [8, 9].

Модуляція *LORA* визначає фізичний рівень *PHY* (від англ. *physical layer*, ще використовують термін «шар», *OSI media layer 1*), який може використовуватися з різними протоколами каналного рівня і в різних варіантах мережевої архітектури: *mesh*-мережі, зірка (*star*), точка-точка (*point-to-point, p2p*) [8, 9].

*LORA* модуляція ґрунтується на технології модуляції з розширеним спектром і варіації лінійної частотної модуляції (англ. *CSS – chirp spread spectrum*) з інтегрованою прямою корекцією помилок *FEC* (англ. *FEC – forward error correction*).

Технологія *FEC* реалізована на каналному рівні і представляє собою цифрову обробку прийнятих вхідних даних. Більш детально зупинимося на методі розширення спектру *CSS* [6], який описано нижче.

**Модель каналу зв'язку *LORA*.** В загальному вигляді комплексний еквівалент базової смуги сигналу  $c(t)$  внутрішньоімпульсної лінійної ЧМ (ВЛЧМ) виражається як

$$c(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c}} \exp(j\pi\mu t^2), \quad |t| < \frac{T_c}{2}, \quad (1)$$

де  $T_c$  і  $\mu$  ( $\neq 0$ ) позначають тривалість і швидкість ВЛЧМ відповідно. Швидкість лінійної ЧМ визначається як швидкість зміни миттєвої частоти. Сигнал ВЛЧМ називається up-ВЛЧМ (Down- ВЛЧМ), якщо  $\mu$  позитивний (негативний), тобто миттєва частота збільшується (зменшується). Модель каналу розраховується за умови застосування двійковій фазовій маніпуляції (BPSK) з up-ВЛЧМ, як показано на рис. 1.

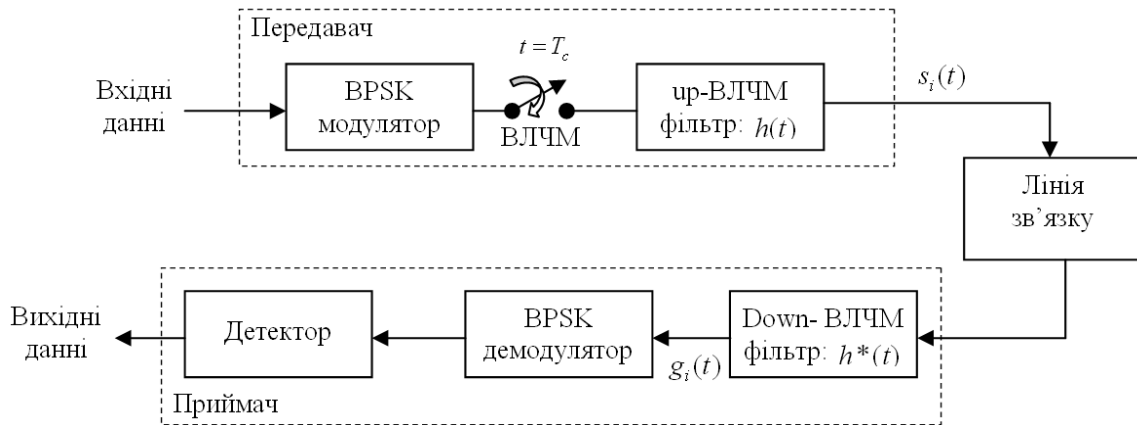


Рис.1. Структурна схема каналу зв'язку з *CSS*

На рис. 1, вхідний сигнал модулюється в сигнал з BPSK. Потім сигнал модулюється в короткому імпульсі проміжної частоти (ППЧ) кожен  $T_c$  секунд. На наступному етапі ППЧ проходить через фільтр з up-ВЛЧМ, в наслідок чого має вигляд  $h(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c}} \exp(j\pi\mu t^2)$ , де  $\mu > 0$  і  $|t| < \frac{T_c}{2}$ , що ніщо інше як  $i$ -ий передаваний символ ВЛЧМ  $s_i(t)$ , виражений як

$$s_i(t) = b_i \sqrt{E_b} c(t), \quad i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

де  $E_b$  та  $b_i \in \{\pm 1\}$  позначають енергію сигналу, що передається на біт даних і  $i$ -ий переданий біт даних, відповідно. У приймачі, спотворений завадами сигнал спочатку надходить до фільтру з down-ВЛЧМ, імпульс якого відповідає  $h^*(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c}} \exp(j\pi\mu' t^2)$ , де  $\mu' = -\mu$  та  $|t| < \frac{T_c}{2}$

Вихідний  $i$ -ий сигнал с фільтра down-ВЛЧМ  $g_i(t)$ , дорівнює короткому ППЧ зі значно більш коротким імпульсом і визначається як

$$g_i(t) = s_i(t) \otimes h^*(t) = b_i(\sqrt{E_b}) \frac{\sin\left\{\pi Bt\left(1 - \frac{|t|}{T_c}\right)\right\}}{\pi Bt} = b_i(\sqrt{E_b}) p(t), \quad |t| < T_c \quad (3)$$

де  $B(\equiv \mu|T_c)$  – ширина смуги ВЛЧМ, що визначається як діапазон миттєвої частоти,  $\otimes$  означає оператор згортки, а  $p(t) = \sin\{\pi Bt(1 - |t|/T_c)\}/\pi Bt$  огинаюча сигналу  $g_i(t)$  в (3), яка проходить через перші нульові точки при  $t \approx \pm \frac{1}{B}$ . Отже, ступінь стиснення або коефіцієнт посилення (визначається як відношення тривалості ВЛЧМ до ширини імпульсу  $g_i(t)$ ) задається  $BT_c$ . Після фільтрації, стиснений сигнал детектується при  $t=0$ , де  $g_i(t)$  максимізується і виводиться. Нарешті, вихідні дані визначаються як „0”, або „1” відповідно до результату детектування.

Основні характеристики модуляції *LORA* вражаються наступним чином [8, 9]:

Бітову швидкість модуляції  $R_b$  можна визначити як:

$$R_b = SF \frac{1}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)}$$

де  $SF$  – коефіцієнт розширення спектру,  $BW$  – ширина смуги модуляції.

Тривалість символу  $T_c$  визначається як:

$$T_c = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Таким чином, швидкість передачі символів,  $R_c$ , швидкість передачі символів  $T_c$ :

$$R_c = \frac{1}{T_c} = \frac{BW}{2^{SF}}$$

Нарешті, ми можемо визначити частоту чіпів  $R_{ch}$ :

$$R_{ch} = R_c 2^{SF}$$

Модуляція *LORA* також включає в себе схему змінної корекції помилок, яка покращує надійність сигналу, що передається за рахунок надлишковості.

Таким чином, можна визначити номінальну швидкість передачі даних у вигляді:

$$R_b = SF \frac{4/4 + CR}{2^{SF}/BW},$$

де  $SF$  – коефіцієнт розширення спектру,  $CR$  – кодова швидкість,  $BW$  – ширина смуги модуляції.

**Порівняння *LORA* з вузькосмуговою модуляцією *FSK*.** При проведенні порівняння вище перелічених видів модуляції були взяті данні з випробувань відповідного обладнання. Оскільки випробування проводилися в різних місцях (з щільною міською забудовою), дані

випробувань ([10] – *FSK*, [11] – *LORA*) необхідно усереднити і порівняти. Порівняльна характеристика представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Відстань, м	2- <i>FSK</i> : 4,8 кб/с		Відстань, м	<i>LORA</i> : 125 кГц, <i>SW</i> =8 (3.125 кб/с)	
	Чутливість, dBm	Пропущених пакетів, %		Чутливість, dBm	Пропущених пакетів, %
100	-97	0	80	-91	0
150	-100	0	150	-100	0
250	-112	1	280	-102	0
300	-	100	330	-114	10
450	-118	8	480	-124	0
600	-	100	560	-120	0
800	-	100	1180	-112	0
1200	-	100	1350	-126	10
1500	-	100	1750	-127	100

У наведеному вище прикладі модем *LORA Semtech's SX127x family* та вузькосмуговий модем *FSK Hoperf Microelectronics Co, Ltd* були налаштовані на передачу короткого корисного навантаження з номінальною вихідною потужністю +13 дБм.

При порівнянні чутливості трансиверів, згаданих вище, еталонним був обраний *FSK* модуль, налаштований на швидкість передачі 1,2 кб/с з відповідною чутливістю -122 дБм. У модулі *LORA* були обрані режими з різними значеннями розширення спектра, зазначені в табл. 3.

Таблиця 3

Модуляція	Швидкість передачі, кб/с	Чутливість, dBm	$\Delta$ , dB
<i>FSK</i>	1,2	-122	-
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =12	0,293	-137	+15
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =11	0,537	-134,5	+12,5
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =10	0,976	-132	+10
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =9	1757	-129	+7
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =8	3125	-126	+4
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =7	5468	-123	+1
<i>LORA</i> , <i>SF</i> =6	9375	-118	-3

Таким чином, видно, що навіть при передачі більш ніж в 4 рази еквівалентної швидкості передачі даних, модуляція *LORA* забезпечує аналогічну чутливість до звичайної системи *FSK*.

Коли швидкість передачі даних приблизно дорівнює, еквівалент поліпшення чутливості за допомогою *LORA* становить від 7 до 10 дБ.

**Висновок.** Таким чином, в роботі проведено огляд каналу зв'язку та порівняння низькошвидкісної технології передачі даних *LORA* з технологіями *LPWAN*, а саме дальності зв'язку та чутливості приймача.

Завдяки своїм перевагам, а саме: відкритому стандарту, великій для свого класу дальності зв'язку, високій проникаючій здатності в міській забудові, низькому енергоспоживанню, використанню неліцензованих смуг частот (109 МГц, 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц, ISM), адаптивній швидкості передачі даних, комплексній безпеці і

вбудованій ідентифікації і аутентифікації технологія передачі даних *LORA* може бути використана при побудові сенсорів тактичної військової бездротової мережі.

Напрямок подальших досліджень є проведення аналізу завадозахищеності каналу зв'язку з використанням модуляції *LORA*.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Жук О.В. Система управління тактичними сенсорними мережами / О.В.Жук, В.А.Романюк, О.Я.Сова // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 2. – С. 88 – 96.
2. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А.Гепко, В.Ф.Олейник, Ю.Д.Чайка, А.В.Бондаренко / Киев: ЭКМО, 2009. – 672 с.
3. Нгуен Д.К. Разработка метода взаимодействия узлов сети LPWAN на базе ячеистой топологии /Д.К.Нгуен, Р.В.Киричек / 2-я международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых „Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2016)”, 2016. – С. 42 – 46.
4. Mahmoud M.S. A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques / Modules for Internet of Things (IoT) Applications / M.S.Mahmoud, A.A.H. Mohamad /Advances in Internet of Things, 2016, 6, p.19 – 29.
5. IEEE Std 802.15.4a-2007. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, 2007.
6. Yoon T. Bit-Error-Rate Performance Analysis of an Overlap-based CSS System / T.Yoon, D.Chong, S.Ahn, S.Yoon / World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol: 3, No: 2, 2009. P. 357 – 361.
7. Кирилов С.Н. Повышение устойчивости радиолиний передачи информационно-управляющих сигналов к мешающим факторам. / С.Н.Кирилов, И.В.Лукашин, Ю.И.Полтавец, А.В.Поляков, С.А.Круглов / Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы: Радиотехника и космическая связь. Том 2, выпуск 4, с. 55 – 58, 2015 г.
8. A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. LoRa® Alliance, November 2015.
9. LoRaWAN™ Specification. LoRa® Alliance, October 2015.
10. Уоллес Р. Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться. Новости электроники вып. № 11, 2015, с. 3 – 13.
11. Бруцкий В. LoRa модуляция – тест на дальность передачи данных. Электроний ресурс <http://lorawan.lace.io/lora-range-test/>.