

В. В. Руденко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

ОГЛЯД ПРОТОКОЛУ LORA ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

Анотація. У статті розглядається технологія бездротового зв'язку LoRa (Long Range) як протокол передачі даних з низьким енергоспоживанням та великою дальністю дії. Висвітлено принципи роботи технології на основі лінійно частотної модуляції з факторами розповсюдження, що забезпечують стійкість зв'язку навіть в умовах радіозавад та фізичних перешкод. **Метою статті** є аналіз особливостей функціонування протоколу LoRa, дослідження мережевих рішень на його основі та огляд практичних застосувань технології в різних галузях. **Отримані результати:** наведені кількісні показники щодо залежності між фактором розповсюдження, шириною смуги пропускання та часом передачі даних демонструють можливості адаптації технології до різних завдань, де пріоритетом є надійний зв'язок, а не швидкість передачі. **Висновки:** впровадження пристроїв на базі LoRa суттєво підвищує ефективність у галузях з великими площами та в умовах малорозвиненої телекомунікаційної інфраструктури, зокрема в сільському господарстві, логістиці, надзвичайних ситуаціях та в умовах бойових дій.

Ключові слова: LoRa, LPWAN, бездротовий зв'язок, IoT, лінійно частотна модуляція, фактор розповсюдження, прогальність, мережева архітектура, ToA.

Опис протоколу LoRa

Протокол LoRa (Long Range) — це технологія бездротового зв'язку малої потужності, яка забезпечує передачу даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Він має велику перевагу над іншими широкоживаними IoT протоколами Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth у дальності роботи та в надзвичайно низькому енергоспоживанні. Також він є стійким до радіозавад, як і до насиченого ефіру, так і до РЕБ. Ще слід зазначити, що LoRa добре проходить фізичні перешкоди, такі як міська забудова чи щільні зелені насадження. Дослідження показують, що LoRa може бути дуже корисним у розробці підводних бездротових мереж для застосувань моніторингу в реальному часі на мілководді [1]. Схожою технологією в ніші LPWAN є Sigfox та LTE-M.

Розробником протоколу є компанія Semtech. Він є в їхній власності, тому лише Semtech може виробляти чи давати дозволи на виробництво радіомодулів, що підтримують LoRa модуляцію. Велика кількість компаній, що працюють в ніші IoT, об'єдналися в LoRa Alliance. LoRa Alliance — це відкрита некомерційна асоціація, яка з моменту свого створення у 2015 році стала однією з найбільших асоціацій у сфері технологій. За їх участі був розроблений стандарт LoRaWAN, що є продовженням LoRa. Цей стандарт описує, як LoRa пристрої мають бути об'єднані в мережу і як повинні працювати в інтернеті. До об'єднання входять такі відомі компанії, як STM, Semtech, Bosch, Siemens.

LoRa — це технологія на основі лінійно-частотної модуляції (ЛЧМ). Цей метод модуляції полягає в тому, що частота несучого сигналу змінюється за лінійним законом. Такий сигнал називається чирпованим, а символи називаються чирпами. В англомовній літературі ЛЧМ називають Chirp Spread Spectrum (CSS) — чирповане розширення спектру. Дуже схожа технологія використовується в сонарах, де CHIRP — стиснутий високо інтенсивний випромінюваний імпульс [2] (рис. 1).

Компанія Semtech, яка розробила технологію LoRa, вдосконалила її, додавши до ЛЧМ фактор

розповсюдження (англ. Spreading factor (SF)). Фактор розповсюдження — це параметр, який контролює швидкість передачі даних та швидкість чирпів. Модуляція CSS використовує фактор розповсюдження (SF) для розподілу інформації по частоті. Фактори розповсюдження є ортогональними один до одного і визначають кількість чирпів на один символ сигналу.

У LoRa існує шість можливих факторів, від 7 до 12, які визначають кількість бітів, необхідних для передачі однакової кількості даних. Він також впливає на діапазон, завантаженість каналу, час у ефірі, термін служби батареї та чутливість приймача.

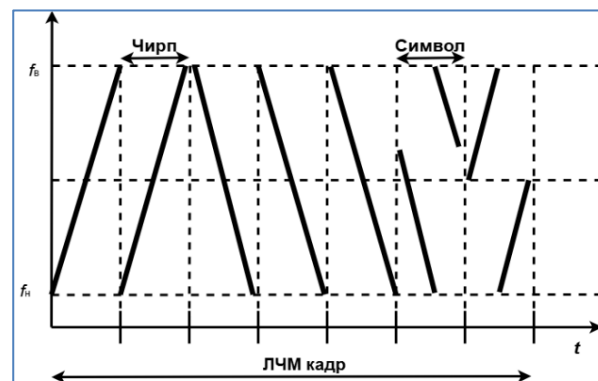


Рис. 1. Чирпований кадр [3]

У контексті ЛЧМ, на якій базується LoRa, чирпи служать носіями даних. Нижчі фактори розповсюдження призводять до швидших чирпів і вищої швидкості передачі даних. Тоді як, кожне збільшення фактору розповсюдження зменшує швидкість чирпів і швидкість передачі даних вдвічі.

Крім того, нижчі фактори розповсюдження зменшують час передачі LoRa сигналу і підвищують бітрейт. Таким чином, зміни фактору розповсюдження дозволяють мережі підвищувати, або знижувати швидкість передачі даних для кожного кінцевого пристрою за рахунок діапазону.

Використання різних факторів розповсюдження на одному каналі запобігає інтерференції між

сигналам. Це означає, що сигнали, модульовані різними факторами розповсюдження та передані одночасно на одному частотному каналі, не будуть заважати один одному. Це дозволяє ефективніше використовувати канал і збільшує кількість пристроїв, які можуть його одночасно використовувати.

Вищі фактори розповсюдження збільшують час перебування в ефірі, оскільки для передачі даних до того, як приймач їх отримає, потрібно більше часу. Відповідно, це збільшує час активності і збільшує енергоспоживання[4].

Відношення між фактором розповсюдження, шириною смуги пропускання та розміром пакета є ключовим для визначення часу в повітрі. Час в повітрі (англ. Time on Air (ToA)) - це загальний час, за який повідомлення буде передано по радіоканалу. Два пакети з однаковим розміром і шириною смуги пропускання, але з різними факторами розповсюдження, матимуть суттєво різний час перебування в повітрі.

Як правило, радіомодулі LoRa, окрім самої LoRa модуляції, також можуть використовувати і загальнодоступні методи модуляції, такі як FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK. Прикладом є серія радіомодулів SX12XX[5].

LoRa працює на доступних неліцензійних частотах загального призначення (ISM), наприклад, 915 МГц, 868 МГц і 433 МГц. Однак, існують певні регіональні законодавчі обмеження щодо використання LoRa. Вони визначають які діапазони частот можна використовувати в країні. В Україні дозволеними є діапазони 433.05-434.79 МГц та 863-870 МГц. Також в специфікації LoRa використовується термін «план каналу» або «частотний план». Для України це EU433 та EU863-870[6].

План каналу, або частотний план, — це термін, що позначає географічно специфічні канали та швидкості передачі даних, тобто обсяги даних, які передаються через мережу за певний проміжок часу. Зазначені швидкості передачі та канали мають відповідати Регіональним параметрам LoRaWAN для певної географічної області або частотного діапазо-

ну, тобто визначеного набору електромагнітних частот[7]. Він визначає які частоти дозволено використовувати, скільки каналів є доступними, швидкість передачі даних, а також прив'язує ці параметри до певної ширини смуги пропускання. Як правило, використовують смуги пропускання з шириною 125 КГц, 250 КГц, 500 КГц.

Також частотний план визначає дуже важливий параметр – прогальність. Прогальність - це відрізок часу, або періоду, коли система або сигнал активний. В англійській літературі використовують термін коефіцієнт заповнення (англ. Duty Cycle). Він показує яку частину від загального часу роботи система активно працює.

У контексті радіопередачі – це період часу, коли радіомодуль випромінює сигнал на певному каналі. Якщо половину часу радіомодуль випромінює сигнал, а іншу половину слухає ефір, то коефіцієнт заповнення буде 0.5, або 50%.

Згідно частотного плану EU433, коефіцієнт заповнення має бути менше 10%, тоді як для EU863-870 – менше 1%.

Прогальність суттєво впливає на швидкість передачі за секунду. Швидкість передачі буде розподілятися по кожному каналу. Візьмемо як приклад частотний план EU433 та фактор розповсюдження 10 (табл. 1). Відповідно, LoRa пристрій може передавати на одному каналі лише 10% загального часу, а швидкість передачі при SF10 приблизно дорівнює 580 біт/с, то виходить, що по одному каналу LoRa зможе передавати лише 58 біт за секунду (рис. 2).

Механізм контролю коефіцієнту заповнення базується на вимірюванні тривалості кожної передачі в ефірі та гарантує, що загальний час передачі не перевищує встановлений ліміт у заданому часовому інтервалі. У разі досягнення цього порогу стек блокує подальші передачі на визначений проміжок часу, щоб дотриматись обмежень.

Звичайно, ця швидкість передачі сильно поступається іншим протоколам передачі, як Wi-Fi, Bluetooth, LTE. LoRa обмінює швидкість передачі на дальність та стійкість зв'язку.

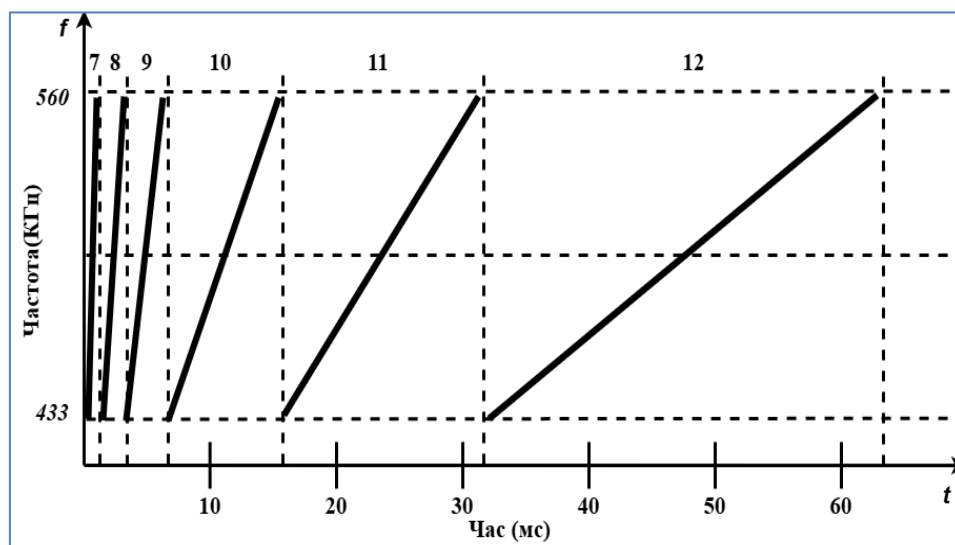


Рис. 2. Порівняння факторів розповсюдження від SF7 по SF12 [8]

Таблиця 1 – Відношення між фактором розповсюдження, пропускнуою здатністю та часом в повітрі [9]

SF	Навантаження 50 біт		Максимальне навантаження		
	ToA(c)	Пропускна здатність (біт/с)	ToA (c)	Максимальний розмір навантаження(біт)	Максимальна пропускна здатність (біт/с)
7	0.113	3543.1	0.394	242	4913.7
8	0.205	1948.2	0.697	242	2777.6
9	0.369	1082.1	0.677	115	1358.9
10	0.698	572.8	0.698	51	584.5
11	1.478	270.5	1.479	51	275.9
12	2.629	152.1	2.793	51	146.1

Загалом, LoRa є цікавим інструментом для розробки у сфері IoT, забезпечуючи з'єднання в умовах, де інші технології неефективні. Серед інших протоколів він вирізняється дальністю роботи і надійністю зв'язку, що робить його доцільним рішенням для задач, де ці питання є ключовими.

Технологія LoRa визначає лише фізичний рівень мережі згідно моделі OSI. Протокол LoRaWAN, один із кількох можливих варіантів реалізації вищих рівнів, є найбільш поширеним і виконує функції мережевого рівня. Він забезпечує маршрутизацію трафіку між кінцевими пристроями та шлюзами в LPWAN-мережах. Хоча більшість застосунків LoRa використовують LoRaWAN, використання останнього не є обов'язковим — LoRa може працювати і без реалізації мережевого і каналного рівнів.

Мережева архітектура LoRaWAN базується на зіркоподібній структурі, де шлюзи виступають проміжними вузлами, що передають дані між кінцевими пристроями і центральним сервером. Кожен кінцевий пристрій з'єднується зі шлюзом, який має підключення до Інтернету та, зазвичай, підтримує IP-протоколи.

Внаслідок обраної топології та зосередженості на зв'язку "кінцевий вузол – шлюз", LoRaWAN має певні обмеження щодо можливих сценаріїв використання; зокрема, він не підтримує повноцінну комунікацію між вузлами, а отже, не дозволяє реалізувати справжню mesh-мережу[10].

Альтернативною технологією для об'єднання LoRa в мережу та підключення до інтернету є Meshtastic. Проект Meshtastic надає можливість застосовувати бюджетні LoRa-радіопристрої, як автономну платформу для організації далекого зв'язку в місцевостях, де відсутня або нестабільна комунікаційна інфраструктура. Слід відмітити, що Meshtastic розробляється не комерційною компанією чи об'єднанням, на кшталт LoRa Alliance, а вільною спільнотою програмістів. Також, вихідний код для Meshtastic є відкритим.

Meshtastic використовує LoRa-радіопристрої для ретрансляції отриманих повідомлень, утворюючи mesh-мережу. Така конфігурація забезпечує доставку повідомлень усім учасникам групи, включно з тими, хто знаходиться на найбільшій відстані.

Крім того, радіопристрої Meshtastic можуть бути підключені до одного телефону, що дозволяє друзям і членам родини надсилати повідомлення безпосередньо на ваш конкретний пристрій. Важливо зазначити, що кожен пристрій підтримує одночасне підключення лише одного користувача[11].

Приклади застосування LoRa

Впровадження LoRa пристроїв суттєво збільшить ефективність праці в галузях, де використовуються великі площі, а також в умовах погано розвинутої телекомунікаційної інфраструктури. LoRa вже широко використовується в сільському господарстві, логістиці, наукових дослідженнях. Також цікавим є використання LoRa для фото полювання. В умовах бойових дій LoRa теж знайшов свою нішу.

Компанія Semtech впроваджує LoRa для управління водними ресурсами. Вона пропонує Sensoterra, як бездротову та дистанційну систему, яка надає фермерам у реальному часі інформацію про стан вологості ґрунту їхніх культур. Sensoterra є альтернативою для систем, що використовують візуальний метод для аналізу ґрунтів та посівів за допомогою БПЛА та супутників. Sensoterra використовує мережу датчиків, що розкидані по полю і вимірює стан ґрунтів та передає цю інформацію на базову станцію. Це дозволяє ефективніше використовувати воду у системах зрошення, зменшивши використання води до 30%, а також запобігає пошкодженню посівів через перенасичення водою[12].

Схожу систему на основі LoRa впроваджують в Європейському Союзі. За підтримки ЄС проводилось дослідження LoRa на експериментальних фермах в Нормандії. Мета проекту – створення цифрової платформи в сільськогосподарському дослідному господарстві. Реалізовано цифрову мережу, що дозволяє зв'язуватися з підключеними об'єктами через радіозв'язок з Інтернетом. Спеціальні датчики будуть встановлені на господарстві і будуть розташовані на великих відстанях (10 км) від антени. Було створено датчики і різноманітні цифрові інструменти для полегшення ведення рослинництва та тваринництва.

Цей проект спрощує прийняття рішень, забезпечує більшу оперативність, меншу трудомісткість і створює більш безпечні ферми в плані моніторингу

харчових продуктів, здоров'я, відтворення, запліднення [13].

В Австрії, спільно з LoRa Alliance та Ursalink, впроваджували проект цифрового землеробства в Австрії. Цей пілотний проект зосереджений на зборі, зчитуванні та візуалізації даних, отриманих від кількох датчиків LoRaWAN, застосованих у рішенні для управління здоров'ям рослин, оскільки їх потрібно захищати від шкідливих погодних умов, коли вони ще делікатні та особливо схильні до хвороби. По суті, те, що має фундаментальне значення для управління здоров'ям рослин, — це дані про температуру, вологість і сонячне світло. Однак час від часу буде важко перевіряти дані вручну, оскільки погодні умови можуть постійно змінюватися протягом дня, а також відповідно змінюється сонячне світло. В цьому проекті замінять дорогу дротову мережу на бездротову на базі LoRa. Дані з датчиків будуть візуалізовані, що спростить аналіз та прийняття рішень [14].

Зазвичай, LoRa не вважається придатним для передачі зображень, через його низьку пропускну здатність. Однак, LoRa може бути використаний у програмах, де вам потрібно лише одне зображення на день. Зокрема, перевірка здоров'я вулика — це не те, що потребує уваги щодня. LoRa-пристрій передає зображення вулика декілька раз на тиждень на базову станцію. Потім система використовує машинний зір для розпізнавання бджіл і комах, щоб звітувати про їхню діяльність, а також аналізує стан і здоров'я вулика. Це зменшує потребу перевіряти вулик особисто, оскільки гарне зображення може надати багато інформації про стан вулика [15].

Безпосередньо після стихійного лиха, такого як повінь, лісова пожежа або землетрус, мережі можуть бути перевантаженими або пошкодженими, що робить їх непридатними для використання рятувальниками. У таких ситуаціях використання традиційного підходу з фіксованими шлюзами є неефективним через мобільність рятувальників. Було спроектовано та оцінено дворівневу мережеву систему під назвою LoRaUAV з метою вирішення вищезазначених проблем. LoRaUAV базується на ad hoc Wi-Fi мережі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які виступають у ролі ретрансляторів для трафіку між мобільними вузлами LoRaWAN та віддаленою базовою станцією. Ядром системи є повністю розподілений алгоритм мобільності, який періодично оновлює топологію БПЛА для адаптації до руху наземних вузлів [16].

Війна в Україні з кожним роком стає все технологічною. Технології, розроблені для мирних галузей починають використовувати у військових цілях. LoRa не є виключенням. Було зазначено, що LoRa підходить для використання у надзвичайних ситуаціях, бо розгортання цих пристроїв є швидким і простим. Це дуже корисно в умовах бойових дій, де телекомунікаційна інфраструктура є пошкодженою або відсутньою.

Помічено використання дистанційних засобів ініціалізації та GPS-маячків на базі LoRa в українських БПЛА «Щедрік». LoRa-сенсор в дроні передає

оператору координати свого місця розташування. Дрон може втратити керування, або піддатися впливу засобів РЕБ. Однак, LoRa-сенсор з GPS-приймачем має окреме живлення і залишається активним та передає інформацію про координати дрона, що спрощує його пошук.

Цей модуль знаходиться в сплячому режимі, але з певним інтервалом включається, зчитує з навігаційного супутника координати та відправляє їх на свій шлюз. Дальність дії приймачів LoRa може бути різною, але за сприятливих обставин вона здатна досягати декількох кілометрів. Що ефективно, якщо пролітає поблизу великий дрон, що виконує роль шлюзу.

Припустили використання LoRa і в радіорозвідці. В зоні, де є велика активність БПЛА, встановлюються спеціальні світлофори, які попереджають солдатів про активність дронів. В точці, де є хороша радіовидимість, встановлена станція РЕР, що приймає сигнали від дронів. Тоді як світлофори рознесені по окрузі і мають зв'язок на LoRa з центральним пунктом управління. Коли станція РЕР помічає БПЛА в небі, то передає сигнал на світлофор, вказуючи, який режим йому ввімкнути [17].

Також, LoRa використовується, як маячок для пошуку втрачених БПЛА. Прикладом є розробка інженера Бажена Левковця. Він створив пошуковий GPS-маячок для визначення місця розташування дронів на територіях, де відсутнє мобільне покриття. За словами розробника, маячки дуже важливі в умовах щільної роботи засобів радіоелектронної боротьби, коли безпілотники часто втрачають зв'язок з оператором і їх необхідно знайти. Маячок складається з GPS-модуля (діапазону L1), мікроконтролера STM32 і радіомодуля LoRa на 433 МГц. Живиться пристрій від літій-полімерного акумулятора на 1000 мАг.

Маячок є додатковим модулем до дрона, та змогу знаходити його за допомогою пошукових світлових сигналів, п'єзоелектричного зумера, що видає звуки, або за координатами GPS [18].

Висновок

Технологія LoRa є перспективним рішенням у сфері IoT, що відрізняється низьким енергоспоживанням та великою дальністю зв'язку порівняно з іншими поширеними протоколами. Базуючись на лінійно-частотній модуляції з фактором розповсюдження, LoRa забезпечує стійкий зв'язок навіть у складних умовах, включаючи міську забудову, щільні зелені насадження та радіоперешкоди. Хоча швидкість передачі даних значно поступається таким протоколам як WiFi чи Bluetooth, ця технологія ефективно виконує завдання, де пріоритетом є надійний зв'язок на великих відстанях при мінімальному енергоспоживанні.

Практичне застосування LoRa охоплює широкий спектр галузей: від сільського господарства (системи моніторингу вологості ґрунту, датчики для тваринництва) до надзвичайних ситуацій і військової сфери (пошукові маячки для БПЛА, системи попередження про дроніву небезпеку). Особливо

цінною ця технологія стає в умовах відсутньої або пошкодженої телекомунікаційної інфраструктури, що робить її незамінною для екстремальних умов і віддалених районів, де традиційні методи зв'язку неефективні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lin K., Hao T., Zheng W., He W. Analysis of LoRa Link Quality for Underwater Wireless Sensor Networks: A Semi-empirical Study. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Singapore, 2019. pp. 120-122. DOI: 10.1109/APMC46564.2019.9038666
2. Burden T. What's CHIRP Sonar? WestMarine. 07.01.2025. URL: <https://www.westmarine.com/west-advisor-electronics/Understanding-CHIRP-Scanning-Sonar.html>.
3. Shilpa B., Gupta H.P., Jha R.K. et al. LoRa interference issues and solution approaches in dense IoT networks: a review. Telecommunication Systems. 2024. Vol. 87. pp. 517–539. DOI: 10.1007/s11235-024-01192-9
4. TEKTELIC Communications Inc. Spreading Factor (SF). TEKTELIC Communications. URL: <https://tektelic.com/what-it-is/spreading-factor/>
5. Semtech Corporation. SX1276. ICs for Sensors/Trackers. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>
6. LoRaWAN® Regional Parameters. LoRa Alliance, Inc. 2020. 90 c. URL: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2021/05/RP-2-1.0.3.pdf>
7. TEKTELIC Communications Inc. Channel Plan. TEKTELIC Communications. URL: <https://tektelic.com/what-it-is/channel-plan/>
8. Yalcin S. An artificial intelligence-based spectrum sensing methodology for LoRa and cognitive radio networks. International Journal of Communication Systems. 2023. Vol. 36. DOI: 10.1002/dac.5433
9. Cotrim J.R., Kleinschmidt J.H. LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication. Sensors. 2020. Vol. 20. 4273. DOI: 10.3390/s20154273
10. Manzoni P., Merzougui S.E., Palazzi C.E., Pozzan P. A Resilient LoRa-Based Solution to Support Pervasive Sensing. Electronics. 2023. Vol. 12. 2952. DOI: 10.3390/electronics12132952
11. Introduction | Meshtastic. Meshtastic. URL: <https://meshtastic.org/docs/introduction/>
12. Marketing S. C. Conserving resources and reducing agriculture water waste. Inside Out | Semtech's Corporate Blog. URL: <https://blog.semtech.com/improving-nature-restoration-and-eliminating-agriculture-water-waste-with-lora-technology>
13. Experimental digital platform LoRa in agriculture | EU CAP Network. Welcome to the EU CAP Network | EU CAP Network. URL: https://eu-cap-network.ec.europa.eu/projects/experimental-digital-platform-lora-agriculture_en#tab_id=overview
14. LoRa Alliance. Experimental digital platform LoRa in agriculture. LoRa Alliance. URL: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2019/04/Digital-Farming-Is-Creating-a-More-Plentiful-Sustainable-Food-System.pdf>
15. LoRa Transmission of Images. Element14. URL: <https://community.element14.com/challenges-projects/design-challenges/save-the-bees-design-challenge/b/blog/posts/lora-transmission-of-images>
16. Stellin M., Sabino S., Grilo A. LoRaWAN Networking in Mobile Scenarios Using a WiFi Mesh of UAV Gateways. Electronics. 2020. Vol. 9, no. 4. P. 630. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9040630>
17. Бескрестнов С. Флеш. Facebook. URL: https://www.facebook.com/story.php?story_fbid=8824964230905216&id=100001751811701
18. Бойко П. Скоротить втрати дронів. ФОКУС. URL: <https://focus.ua/uk/digital/587145-skorotit-vtrati-droniv-tvorec-novoyi-tehnologiyi-dlya-zsu-postrazhdav-u-chernigovi-foto>

Received (Надійшла) 18.03.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.05.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Руденко Віталій Віталійович – асистент кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна;

Vitalii Rudenko – Assistant of Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine;

e-mail: vitaliirudenko40@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0006-9094-222X>.

Overview of LoRa protocol and perspectives for its use

Vitalii Rudenko

Abstract. This article examines LoRa (Long Range) wireless communication technology as a low-power, long-range data transmission protocol. It highlights the operating principles of the technology based on chirp spread spectrum modulation with spreading factors that ensure communication reliability even in conditions of radio interference and physical obstacles. **The aim of the article** is to analyze the features of the LoRa protocol operation, investigate network solutions based on it, and review practical applications of the technology in various industries. **Results obtained:** the presented quantitative indicators regarding the relationship between spreading factor, bandwidth, and data transmission time demonstrate the technology's adaptability to various tasks where reliable communication, rather than transmission speed, is the priority. **Conclusions:** implementation of LoRa-based devices significantly increases efficiency in industries covering large areas and in conditions of underdeveloped telecommunications infrastructure, particularly in agriculture, logistics, emergency situations, and combat operations.

Keywords: LoRa, wireless communication, IoT, chirp spread spectrum modulation, spreading factor, duty cycle, network architecture, ToA.