

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-32>

УДК 621.39

БРАЇЛОВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0003-0082-247X>

e-mail: v.brailovskyi@chnu.edu.ua

ГУБЧАК ВІКТОР

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0009-0003-5680-7962>

e-mail: hubchak.viktor@chnu.edu.ua

РОЖДЕСТВЕНСЬКА МАРГАРИТА

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0002-0333-2604>

e-mail: m.rozhdestvenska@chnu.edu.ua

РУСНАК РОМАН

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0009-0005-5604-703X>

e-mail: rusnak.roman@chnu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ СИСТЕМ ІОТ ТЕХНОЛОГІЇ LoRaWAN ПОРТАТИВНИМИ АНАЛІЗАТОРАМИ СПЕКТРУ

В роботі розглянуто питання вивчення особливостей сигналів, що використовуються у системах Інтернету речей (IoT) і, зокрема, у технології LoRaWAN. Показано, що застосування портативного спектроаналізатора tinySA Ultra та запропонованого в роботі джерела тестових сигналів на основі модуля Heltec WiFi LoRa 32 V3 дозволяє спостерігати спектри сигналів, що відповідають різним режимам роботи LoRa-передавача. Отримані експериментальні результати повною мірою корелюють з теоретичними залежностями, що свідчить про можливість використання наведеної методики для контролю параметрів сигналів LoRa, а також при підготовки фахівців, які забезпечуватимуть функціонування таких інформаційних систем.

Ключові слова: системи IoT, бездротові технології, аналіз спектрів, дослідження сигналів, LoRaWAN.

BRAILOVSKY VOLODYMYR, HUBCHAK VIKTOR, ROZHDESTVENSKA MARHARYTA, RUSNAK ROMAN

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

STUDY OF SIGNAL CHARACTERISTICS OF IOT SYSTEMS USING LORAWAN TECHNOLOGY WITH PORTABLE SPECTRUM ANALYZERS

The article examines the applicability of portable spectrum analyzers for the investigation of signal characteristics in Internet of Things (IoT) systems, with a particular focus on the LoRaWAN technology. The study emphasizes the relevance of practical signal analysis in the context of rapidly expanding IoT infrastructures, which increasingly rely on low-power wide-area networks (LPWAN) to ensure energy-efficient and long-range connectivity. The proposed methodology integrates the use of the compact spectrum analyzer tinySA Ultra together with a custom-designed test signal generator based on the Heltec WiFi LoRa 32 V3 module. This experimental setup enables the observation of spectral features corresponding to different transmission modes of LoRa devices, including variations in bandwidth and spreading factor. The results obtained demonstrate a correlation with theoretical predictions, thereby validating the feasibility of employing cost-effective portable analyzers in educational and applied research environments.

The paper provides a review of recent publications underscores the multidimensional development of LoRaWAN, ranging from simulation tools and propagation models to spectral monitoring and AI-based optimization techniques. Against this background, the authors propose a practical framework for laboratory training that bridges theoretical knowledge with hands-on experimentation. The developed software module, implemented in Python, facilitates the processing of measurement data exported from the analyzer, including visualization of amplitude-frequency responses and bandwidth estimation. The methodology is extendable to other IoT protocols, including ZigBee, Bluetooth Low Energy, and Wi-Fi, thus broadening its applicability across the spectrum of modern infocommunication systems. By combining affordability, accessibility, and technical rigor, the proposed approach contributes to the advancement of educational practices in electronic communications and supports the preparation of specialists capable of implementing and maintaining IoT infrastructures.

Keywords: IoT systems, wireless technologies, spectrum analysis, signal investigation, LoRaWAN.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 14.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Браїловський Володимир, Губчак Віктор, Рождественська Маргарита, Руснак Роман

Постановка проблеми

Інтенсивне поширення технологій Інтернету речей (IoT) вже не обмежується окремими галузями, а перетворюється на системний чинник трансформації суспільства, що послідовно інтегрується у щоденні практики, виробничі процеси та інституційні механізми. Наприклад, у звіті, опублікованому компанією Ericsson, зазначається, що загальна кількість підключень IoT перевищила 15 мільярдів та, за прогнозами, зросте на 16% до 38,8 мільярда до 2029 року [1, 2]. З досліджень маркетингових агенцій (рис. 1) випливає, що найвищі темпи зростання – у країнах Азійсько-Тихоокеанського регіону, проте Північна Америка та Європа як регіони середньої динаміки розвитку також демонструють стабільне поширення цих технологій.

Бурхливий розвиток у сфері Інтернету речей (IoT) зумовлює потребу у практичному вивченні систем і протоколів бездротового зв'язку фахівцями, які забезпечуватимуть їх впровадження та технічний супровід.

У взаємодії сенсорних мереж, систем автоматизації та мобільних пристроїв особливе місце займають LoRaWAN, ZigBee, Bluetooth Low Energy та інші стандарти, що працюють у неліцензованих ISM-діапазонах (Industrial, Scientific and Medical). ISM-діапазони – це інтервали радіочастотного спектра, виділені для промислового, наукового та медичного використання без потреби ліцензування. Найбільш поширені з них – 433 МГц, 868 МГц, 915 Гц, 2.4 ГГц та 5 ГГц – стали основою для більшості сучасних IoT-систем.

Щодо специфіки їх застосування, то аналіз показує, що сьогоднішня картина виглядає так:

- LoRaWAN активно розширює присутність у муніципальних і промислових проєктах;
- ZigBee та BLE залишаються популярними для локальних сенсорних мереж і пристроїв із низьким енергоспоживанням;

- Wi-Fi використовується для високошвидкісного доступу, але поступається у енергоефективності;

- NB-IoT та LTE-M конкурують із LoRaWAN у сегменті довготривалих сенсорних мереж.

Як зазначено вище, серед таких, що найбільш стрімко розвиваються, є технології LoRa (Long Range) та LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) (рис. 2) [1-4]. Вони дозволяють реалізовувати низькоенергетичні мережі широкого радіусу дії (LPWAN) в застосунках Інтернету речей

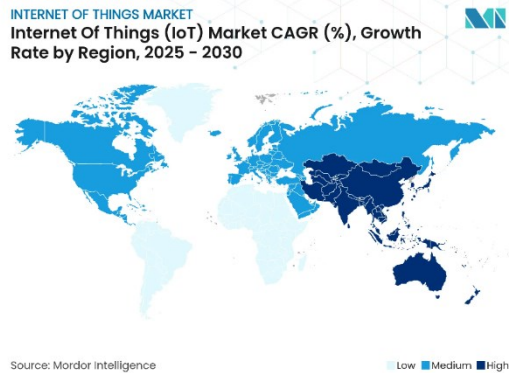


Рис. 1. Динаміка ринку IoT [2]

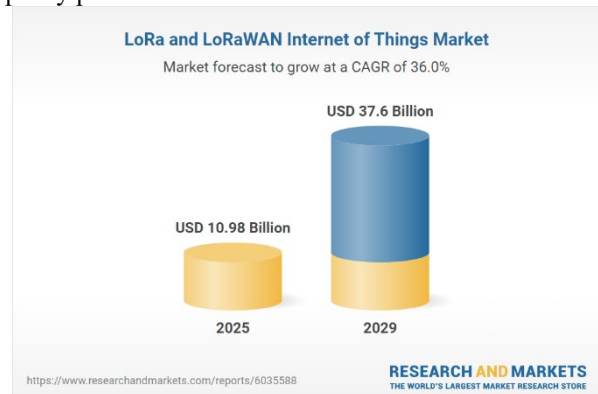


Рис. 2. Динаміка ринку технологій LoRa та LoRaWAN [3]

LoRa – це технологія фізичного рівня, яка забезпечує передавання сигналів на великі відстані з низьким енергоспоживанням за допомогою CSS модуляції (Chirp Spread Spectrum modulation). LoRaWAN – протокол зв'язку та системна архітектура, яка керує зв'язком між кінцевими пристроями та мережними шлюзами. Разом вони забезпечують економічне та енергоефективне з'єднання на великих відстанях, що робить їх оптимальними для давачів та пристроїв з автономним живленням у віддалених або важкодоступних середовищах [3]. Відкритий стандарт LoRaWAN, що регулюється LoRa Alliance, стимулював створення глобальної екосистеми виробників пристроїв, мережних операторів та постачальників послуг, прискорюючи її впровадження в державних та приватних мережах [3].

Аналіз досліджень та публікацій

Науковці і практики, які працюють у відповідній сфері, велику увагу приділяють дослідженню характеристик сигналів систем Інтернету речей з метою розроблення ефективних методик оптимізації режимів роботи таких мереж. Технологія LoRaWAN у сучасних дослідженнях IoT посідає особливе місце завдяки поєднанню енергоефективності та можливості забезпечувати зв'язок на великі відстані, що зумовлює значну кількість наукових статей та матеріалів конференцій, а також веб-ресурсів, присвячених системам LoRaWAN. Розглянемо низку публікацій останніх років, що висвітлюють різні аспекти функціонування LoRa та перспективи її застосування.

Загальний огляд IoT-протоколів, архітектур та інструментів моделювання, представлений у роботах [1, 4 та інших], окреслює LoRa як одну з ключових технологій для майбутніх застосувань, демонструючи її переваги у сфері енергоефективності та широкого покриття.

У навчальному матеріалі [5] детально розкрито базові технічні засади LoRaWAN, де пояснюються принципи модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS) та наводяться останні досягнення на шляху її вдосконалення. Це дозволяє створити фундамент для розуміння специфіки протоколу та його можливостей.

Оглядові статті, як-от робота [6], систематизують знання про протокол LoRa, його архітектуру та перспективи використання в умовах сучасної України та світу загалом. Доповнюють цей напрям дослідження [1, 7], які аналізують продуктивність LoRaWAN у різних мережевих сценаріях, окреслюючи актуальні застосування та майбутні напрями розвитку.

Важливим етапом є моделювання та симуляція параметрів мережі. Автори [8] демонструють можливості симулятора FLoRa для аналізу параметрів LoRa-мереж, що дозволяє прогнозувати їхню поведінку у різних умовах. У дослідженні [9] аналізується енергоефективність технології LoRa у бездротових моніторингових мережах. Автори показують, що оптимізація кількості передач даних у змодельованих топологіях «точка-точка» та «зірка» дозволяє забезпечити тривале автономне функціонування сенсорних вузлів.

Окрему групу становлять роботи, присвячені спектральному аналізу та застосуванню штучного інтелекту. У статті [10] досліджують втрати та завади у LoRaWAN при використанні спектрального моніторингу, а автори [11] пропонують методи спектрального аналізу на основі AI, що відкриває нові можливості для оптимізації використання частотного ресурсу.

Прикладні методи оптимізації представлені у роботі [12], де запропоновано підхід до підвищення пропускної здатності LoRa-мереж. Це демонструє той факт, що активно відбувається розвиток як теоретичних досліджень, так і практичних рішень, спрямованих на вдосконалення продуктивності систем.

До окремої категорії доцільно віднести практичні розробки, спрямовані на створення доступних інструментів для вимірювань у реальних умовах [13, 14]. Так, у проєкті LoraSA [13] представлено портативний недорогий спектроаналізатор для сигналів LoRa. Його використання дозволяє проводити польові дослідження без застосування дорогого лабораторного обладнання, що відкриває нові можливості для інженерів та дослідників у сфері IoT.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про багатовимірність досліджень LoRaWAN: технологія розвивається у напрямі інтеграції з AI, адаптивного управління параметрами та моделювання складних середовищ.

Формулювання цілей статті

Вивчення систем IoT, зокрема, LoRa/LoRaWAN, та характеристик їх сигналів являє собою важливу складову підготовки фахівців сфери електронних комунікацій та радіотехніки. Ця задача, як показано вище, може в значній мірі розв'язуватись за допомогою лабораторних досліджень з використанням аналізаторів спектру. Однак такі пристрої, що мають широкий діапазон досліджуваних частот, характеризуються високою вартістю [15, 16]. В цьому контексті портативні спектроаналізatori, як-от Explorer WSUB1G Plus, HTOOL SA8, tinySA Ultra тощо, відкривають можливості спостереження сигналів у реальному часі, що дозволяє отримати практичні навички роботи з сучасними IoT-системами.

Метою роботи є розроблення методики та інструментів проведення навчальних досліджень щодо вивчення параметрів сигналів систем LoRa/LoRaWAN на основі застосування ефективних бюджетних рішень.

Виклад основного матеріалу

Кожна технологія має характерний спектральний слід, який можна виявити за допомогою портативного аналізатора спектру. Це дозволяє не лише ідентифікувати протокол, а й оцінити параметри сигналу – частоту, амплітуду, ширину спектра.

Можливості спектроаналізатора tinySA Ultra щодо дослідження IoT-сигналів [17]:

- частотний діапазон: 100 кГц – 6 ГГц (охоплює всі основні IoT-стандарты в ISM-смугах);
- функціонал: аналіз спектру, вимірювання рівня сигналу, маркери для точних вимірювань, режим генератора сигналів, збереження даних;
- переваги: компактність, доступність, простота використання у навчальних лабораторіях;
- обмеження: відсутність протокольного аналізу, обмежена точність та швидкість оновлення спектра.

Складові дослідної установки, яка використовуватиметься, наведені на рис. 3. Зовнішній вигляд tinySA Ultra та розміщення його елементів керування та інтерфейсів представлені на рис. 4 [17].



Рис. 3. Структурна схема дослідної установки

Як джерела тестових сигналів IoT можна розглядати різні пристрої:

- смартфони, які генерують активність у діапазонах стандартів LTE, Wi-Fi, Bluetooth;
- бездротові маршрутизатори та точки доступу, що можуть слугувати стабільними джерелами Wi-Fi-сигналів;
- IoT-модулі та спеціалізовані плати розробників, що підтримують модуляцію LoRa;
- SDR-платформи, які дозволяють моделювати сигнали різних протоколів.

Для вивчення сигналів LoRaWAN доцільно розробити спеціалізований генератор тестових сигналів (маяк), який би забезпечував можливість зміни параметрів випромінювання в залежності від завдань дослідження. Реальні кінцеві пристрої IoT для таких цілей не підходять, оскільки передбачають налаштування на енергоефективне передавання в конкретних умовах і не розраховані на постійне змінювання параметрів сигналів.

Джерело тестових сигналів реалізовано на основі плати Heltec WiFi LoRa 32 V3, яка дозволяє швидко налаштовувати тестові сигнали, відображати параметри на дисплеї та працювати автономно [18]. Плата побудована на мікроконтролері ESP32-S3. Він забезпечує високу продуктивність, багатозадачність та підтримку сучасних бібліотек (Arduino, PlatformIO, ESP-IDF, MicroPython). Це спрощує розробку та експерименти з сигналами. Блок-схема модуля наведена на рис. 5.

Для роботи тестового маяка у середовищі Arduino IDE розроблений скетч, який передбачає генерування сигналів LoRa з різними параметрами. Тестовий сигнал являє собою повідомлення "BEACON_01" з центральною частотою LoRa - сигналу 868 МГц, що відповідає дозволеним в Україні діапазонам LoRaWAN. Скетч надає можливість вибору режиму передавання: BW=125 кГц, 250 кГц або 500 кГц при SF=7, а також BW=125 кГц при SF=12 (табл. 1). Необхідно зауважити, що SF (Spreading Factor) визначає швидкість передавання та стійкість до завад, а BW (Bandwidth) у LoRa відповідає за ширину смуги частот сигналу. Ці характеристики належать до ключових фізичних параметрів LoRa, що безпосередньо впливають на швидкість передавання даних, чутливість приймача та стійкість до завад. Параметри потужності та коефіцієнт кодування CR (Code Rate) обрані з міркувань відповідності типовим (рекомендованим) значенням оптимальної роботи системи.

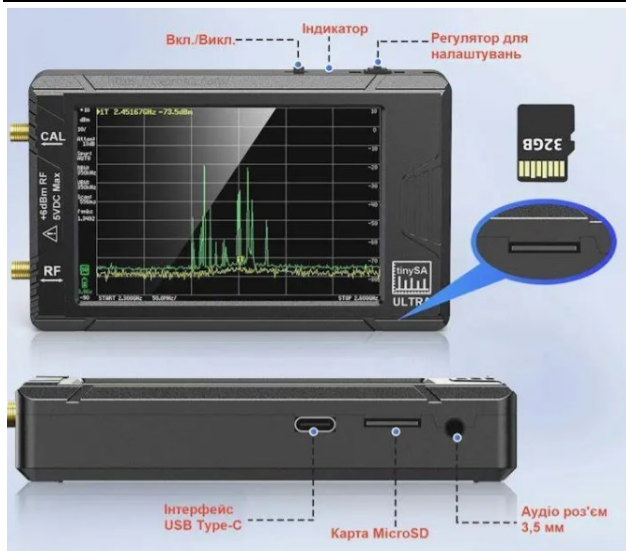


Рис. 4. Зовнішній вигляд аналізатора tinySA Ultra з позначенням основних елементів аналізатора [17]

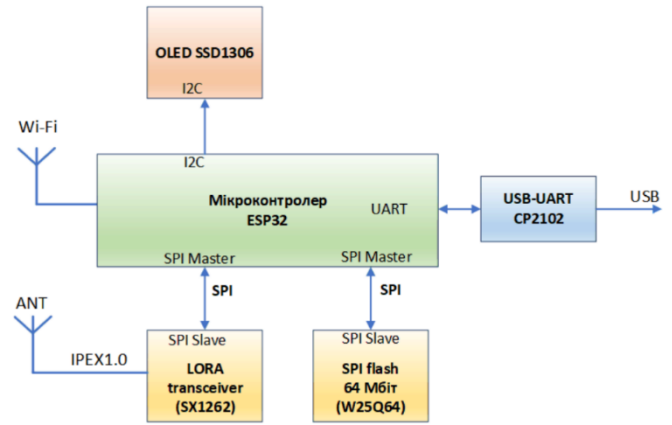


Рис. 5. Блок-схема плати Heltec WiFi LoRa 32 V3 [18]

Перемикання режимів роботи маяка виконується користувачем за допомогою кнопки User/Program, розташованої на модулі Heltec WiFi LoRa 32 V3.

Таблиця 1

Режими передавання, реалізовані в дослідній установці

Режим роботи маяка	Параметри тестового сигналу			
	Смуга частот (BW)	Фактор розширення (SF)	Потужність передавача	Коефіцієнт кодування (CR)
1	125 кГц	7	14 дБм (25 мВт)	4/5
2	250 кГц	7	14 дБм (25 мВт)	4/5
3	500 кГц	7	14 дБм (25 мВт)	4/5
4	125 кГц	12	14 дБм (25 мВт)	4/5

Для зручності налаштування tinySA Ultra та аналізу спектрів сигналів використовується програмне забезпечення від розробника пристрою, зокрема, tinySA-App [19]. Воно надає можливість здійснювати базове керування, перегляд спектра та збереження отриманих результатів у вигляді зображення або набору даних у форматі *.csv.

З метою спрощення аналізу отриманих результатів, зокрема, для побудови графічних зображень спектрів у заданій системі координат за експортованими з tinySA Ultra даними, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення (мова програмування – Python із використанням відповідних бібліотек). Програмний модуль дозволяє:

- зчитати дані з обраних файлів *.csv;
- побудувати АЧХ аналізованого сигналу та визначити смугу пропускання на заданому рівні (наприклад, -3 дБ);
- вивести декілька кривих в одній системі координат для порівняння спектрів сигналів при різних параметрах передавання.

Загалом, згідно теоретичних відомостей [5], спектр LoRa-сигналів є змінним і може мати вигляд як на рис. 6.

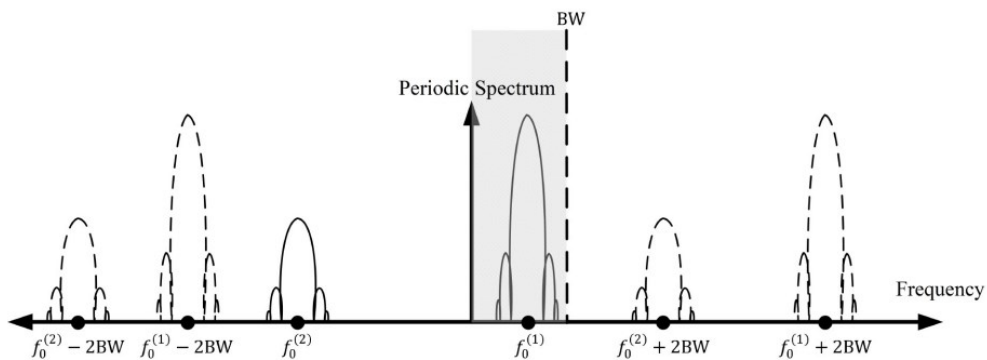


Рис. 6. Періодичний спектр дискретно-часового дечирпованого сигналу CSS для частоти дискретизації $f_s \approx 2BW$ [5] (дечирпований сигнал – це сигнал після множення на зворотний чирп, що використовується для демодуляції CSS)

Реальний вигляд спектру сигналів постійно змінюється, один з його варіантів зображено на рис. 7.



Рис. 7. Вигляд спектру прийнятого сигналу в один з моментів передавання тестового сигналу

Спостереження змін спектру при переході між різними режимами передавання (зокрема, $BW=125$ кГц та 500 кГц при $SF=7$) дає очікувані [20] криві, наведені на рис. 8 а, б. Видно, що при $BW = 125$ кГц смуга частот сигналу учетверо вужча; при $BW = 500$ кГц спектр перетворюється на широку плато-подібну залежність, яка займає значно більший діапазон частот. При цьому енергія сигналу розподіляється на ширшу смугу, тому рівень сигналу на дисплеї аналізатора виглядає нижчим.

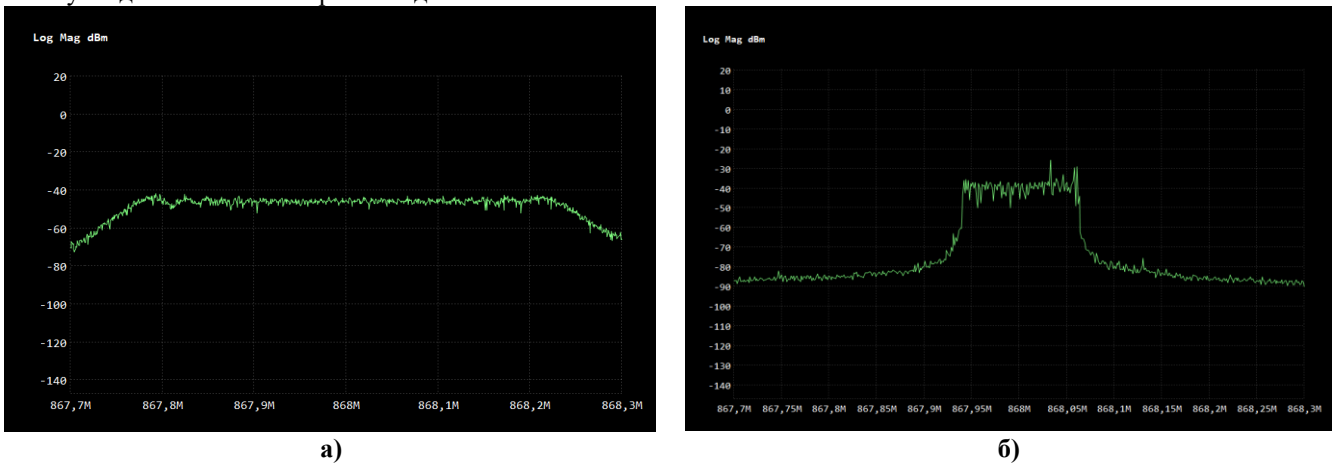


Рис. 8. Спектр сигналів LoRa з різними BW при $SF=7$: а) – $BW=500$ кГц, б) – $BW=125$ кГц.

При побудові кривих за отриманим з *tinySA Ultra* масивом даних застосовано згладжування за методом Савицького-Голея, що забезпечує високу ефективність згладжування спектрів на основі поліноміальної апроксимації та зберігає форму сигналу [21]. Приклад застосування розробленого програмного модуля наведено на рис. 9, б.

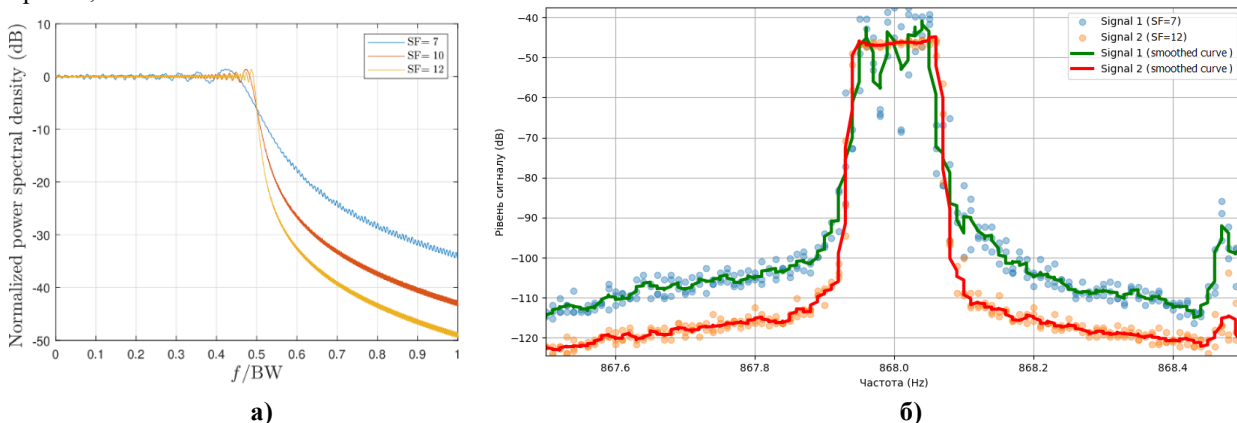


Рис. 9. Неперервний спектр комплексної обвідної для модуляції CSS з різними значеннями SF [5] (а) та результати експериментальних досліджень спектрів сигналів за допомогою *tinySA Ultra* для $SF=7$ та $SF=12$ ($BW=125$ кГц) (б)

Розроблене ПЗ дозволяє оптимізувати процес оброблення результатів досліджень, не потребуючи встановлення додаткових ліцензійних програмних продуктів.

Аналіз кривих на рис. 9 (теоретичної (а) та експериментальної (б)) свідчить, що при $SF = 7$ сигнал передається швидко, чирпи короткі. У режимі max hold аналізатора спектрограма виглядає як щільно заповнена смуга шириною ~ 125 кГц, але з більш «рваними» краями, оскільки піки накопичуються при швидких переходах. У випадку $SF = 12$ сигнал передається повільно, чирпи розтягнуті у часі, тому у режимі max hold спектрограма виглядає як широка смуга тієї ж ширини (125 кГц), але заповнена більш рівномірно, без різких піків. Через довший час перебування сигналу у смузі, накопичення піків створює більш «плавне» та щільне заповнення спектра.

Висновки

Портативні аналізатори спектру, як-от tinySA Ultra, є ефективним інструментом для навчання та базових досліджень сигналів систем IoT. Вони дозволяють:

- спостерігати спектральні характеристики у реальному часі й на основі отриманих даних порівнювати їх з теоретичними залежностями;
- формувати практичні навички роботи з бездротовими технологіями;
- інтегрувати лабораторні дослідження розповсюджених стандартів інфокомунікаційних систем в освітній процес без значних фінансових витрат.

Розроблені в роботі методика та інструменти проведення досліджень щодо вивчення параметрів сигналів систем LoRa/LoRaWAN виступають показовим прикладом, що може бути розширений і на інші протоколи IoT: ZigBee, Bluetooth Low Energy, а також Wi-Fi.

Література

1. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., Soltan, A. A Comprehensive Systematic Survey of IoT Protocols: Implications for Next-Generation Applications. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 113099–113112. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3486927>
2. Internet Of Things Market Size & Share Analysis - Growth Trends And Forecast (2025 - 2030): Market Overview. Prepared by Mordor Intelligence. November, 2025. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market>
3. LoRa and LoRaWAN Internet of Things Market Report 2025: Market Report. Prepared by Market Glass, Inc. – February, 2026. 174 p. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6035588/lora-lorawan-internet-things-market-report>
4. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., Soltan, A. Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 8. Article 3465. URL: <https://doi.org/10.3390/en16083465>
5. Maleki A., Nguyen H. H., Bedeer E., Barton R. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024. Vol. 5. P. 4578–4612. DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3433502
6. Руденко В. Огляд протоколу LoRa та перспективи використання. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2025. № 2. С. 244–248. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.244-248>
7. Saeed, M. S., Wahid, S., Saddique, M. O., Arshad, A., Ashraf M. H. Performance evaluation of LoRaWAN under diverse network settings: current applications and future prospects. *Spectrum of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 3, №8. Pp. 547–564. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16881310>
8. Yaroshenko, R., Onykienko, Y. Computer modelling of LoRa network parameters using the FLoRa simulator. *Technologies and engineering*. 2025. Vol. 26, № 1. Pp. 1–7. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.1.7>
9. Шпатар, П., Нічий, Б., Нічий, С. Дослідження енергоефективності технологій LoRa в безпроводних моніторингових мережах. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. Vol. 3. Pp. 166–174. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-21>
10. Sharma, S., Singh, B. On outage and path loss analysis using spectrum sensing of LoRaWAN in IoT communication at L band parameters. *Sādhanā*. 2024. Vol. 49. Article 233. URL: <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02575-z>
11. Mutescu, P.-M., Popa, V., Lavric, A. LoRa Communications Spectrum Sensing Based on Artificial Intelligence. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 9. Article 2748. URL: <https://doi.org/10.3390/s25092748>
12. Матеко А., Шостко І. Метод підвищення пропускної здатності безпроводової мережі із застосуванням технології LoRa. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2025)»*, Харків, Україна. 4–5 груд. 2025. С. 88–92. URL: https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2025/12/17-Mateko_A_-Sektzia-1.pdf
13. Shytikov, Y. LoraSA. [Online] URL: <https://github.com/Genaker/LoraSA> (дата звернення: 06.01.2026).
14. Fehr, M. ESP32_LoRa_FrequencyAnalyzer. [Online] URL: https://github.com/AndroidCrypto/ESP32_LoRa_FrequencyAnalyzer (дата звернення: 08.01.2026)

15. Spectrum Analyzers. [Online] URL: <https://www.newark.com/w/c/test-measurement/rf-test-equipment/spectrum-analyzers/pr/results/2> (дата звернення: 08.01.2026)
16. Спектроаналізатори. [Online] URL: <https://mirnyk.com/ua/2025/03/02/spektroanalizatory/> (дата звернення: 09.01.2026)
17. tinySA Ultra Інструкція – огляд та початок роботи. [Online] URL: <https://oxorona.com/tinysa-ultra-instruction/> (дата звернення: 09.01.2026)
18. Плата Heltec ESP32 LoRa. [Online] URL: <https://itmaster.biz.ua/directory/kits-nabory/heltec-lora-32.html>
19. Офіційний сайт проекту tinySA. [Online] URL: <https://www.tinysa.org/wiki/> (дата звернення: 06.01.2026).
20. Van Heeswijk, F. Viewing LoRa Spread Spectrum on a Spectrum Analyzer. [Online] URL: <https://blog.frankvh.com/2019/10/04/viewing-lora-spread-spectrum-on-a-spectrum-analyzer> (дата звернення: 06.01.2026).
21. Savitzky, A., Golay, M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* 1964. 36 P. 1627–1639. DOI: 10.1021/ac60214a047 .

References

1. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., Soltan, A. A Comprehensive Systematic Survey of IoT Protocols: Implications for Next-Generation Applications. *IEEE Access.* 2024. Vol. 12. P. 113099–113112. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3486927>
2. Internet Of Things Market Size & Share Analysis - Growth Trends And Forecast (2025 - 2030): Market Overview. Prepared by Mordor Intelligence. November, 2025. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market>
3. LoRa and LoRaWAN Internet of Things Market Report 2025: Market Report. Prepared by Market Glass, Inc. – February, 2026. 174 p. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6035588/lora-lorawan-internet-things-market-report>
4. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., Soltan, A. Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies.* 2023. Vol. 16, № 8. Article 3465. URL: <https://doi.org/10.3390/en16083465>
5. Maleki A., Nguyen H. H., Bedeer E., Barton R. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances. *IEEE Open Journal of the Communications Society.* 2024. Vol. 5. P. 4578–4612. DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3433502
6. Rudenko V. Ohliad protokolu LoRa ta perspektivy vykorystannia. *Control, Navigation and Communication Systems.* 2025. № 2. S. 244–248. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.244-248>
7. Saeed, M. S., Wahid, S., Saddique, M. O., Arshad, A., Ashraf M. H. Performance evaluation of LoRaWAN under diverse network settings: current applications and future prospects. *Spectrum of Engineering Sciences.* 2025. Vol. 3, №8. Pp. 547–564. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16881310>
8. Yaroshenko, R., Onykiienko, Y. Computer modelling of LoRa network parameters using the FLoRa simulator. *Technologies and engineering.* 2025. Vol. 26, № 1. C. 1–7. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.1.7>
9. Shpatar, P., Nychyi, B., Nychyi, S. Doslidzhennia enerhoefektyvnosti tekhnologii LoRa v bezprovidnykh monitorynhovykh merezkhakh. *Measuring and computing devices in technological processes.* 2024. Vol. 3. Pp. 166–174. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-21>
10. Sharma, S., Singh, B. On outage and path loss analysis using spectrum sensing of LoRaWAN in IoT communication at L band parameters. *Sādhanā.* 2024. Vol. 49. Article 233. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02575-z>
11. Mutescu, P.-M., Popa, V., Lavric, A. LoRa Communications Spectrum Sensing Based on Artificial Intelligence. *Sensors.* 2025. Vol. 25, №. 9. Article 2748. URL: <https://doi.org/10.3390/s25092748>
12. Mateko A., Shostko I. Metod pidvyshchennia propusknoi zdatnosti bezprovodovoi mrezhi iz zastosuvanniam tekhnologii LoRa. *Materialy Mizhnarodnoi nauko-tekhnichnoi konferentsii "Informatsiino-komunikatsiini tekhnologii ta kiberbezpeka (IKTK-2025)".* Kharkiv, Ukraina. 4–5 hrud. 2025. S. 88–92. URL: https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2025/12/17-Mateko_A_-Sektsiia-1.pdf
13. Shytikov, Y. LoraSA. [Online] URL: <https://github.com/Genaker/LoraSA> (data zvernennia: 06.01.2026).
14. Fehr, M. ESP32 LoRa FrequencyAnalyzer. [Online] URL: https://github.com/AndroidCrypto/ESP32_LoRa_FrequencyAnalyzer (data zvernennia: 08.01.2026)
15. Spectrum Analyzers. [Online] URL: <https://www.newark.com/w/c/test-measurement/rf-test-equipment/spectrum-analyzers/pr/results/2> (data zvernennia: 08.01.2026)
16. Spektroanalizatory. [Online] URL: <https://mirnyk.com/ua/2025/03/02/spektroanalizatory/> (data zvernennia: 09.01.2026)
17. tinySA Ultra Instruktisiia – ohliad ta pochatok roboty [Online] URL: <https://oxorona.com/tinysa-ultra-instruction/> (data zvernennia: 09.01.2026)
18. Plata Heltec ESP32 LoRa. [Online] URL: <https://itmaster.biz.ua/directory/kits-nabory/heltec-lora-32.html> (data zvernennia: 09.01.2026)
19. Ofitsiynyi sait proektu tinySA. [Online] URL: <https://www.tinysa.org/wiki/> (data zvernennia: 06.01.2026).
20. Van Heeswijk, F. Viewing LoRa Spread Spectrum on a Spectrum Analyzer. [Online] URL: <https://blog.frankvh.com/2019/10/04/viewing-lora-spread-spectrum-on-a-spectrum-analyzer> (data zvernennia: 06.01.2026).
21. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* 1964. 36 p. 1627–1639. DOI: 10.1021/ac60214a047