

РОЗПОДІЛЕНА ІОТ-ЕКОСИСТЕМА РАДІОЧАСТОТНОГО МОНІТОРИНГУ

Афанасьєв Ю.В.

Кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
Україна

E-mail: yurii.afanasiev@nure.ua

Abstract

A concept of a distributed radio frequency spectrum monitoring system for urban ecosystems is proposed. The goal is to provide continuous monitoring, early detection of anomalies, and support for decisions on shared spectrum use. The architecture includes a layer of IoT sensor nodes, a streaming processing infrastructure, and a big data cloud module for long-term storage and in-depth analysis. A prototype with a scalable topology and temporal and spatial measurement binding has been implemented. Experimental evaluation in real-time has demonstrated the correctness of event detection, the stability of metrological characteristics, and acceptable processing latency. The approach is suitable for monitoring band occupancy, optimizing wireless channels for urban and industrial services, and improving the information.

Сучасний радіочастотний спектр розглядається, як стратегічний та вичерпний ресурс, раціональне використання якого безпосередньо визначає ефективність функціонування бездротових телекомунікаційних систем, інфраструктури Інтернету речей (IoT). Забезпечення контролю за використанням спектра дає змогу своєчасно виявляти радіозавади, факти роботи несанкціонованих передавачів, а також неефективний розподіл частотного ресурсу між користувачами. У цьому контексті зростає значущість задач радіочастотного моніторингу, який доцільно розглядати, як безперервний процес відстежування параметрів електромагнітного випромінювання з метою детектування сигналів та джерел перешкод, їх просторово-частотної локалізації та аналізу режимів роботи. Особливої ваги це набуває в умовах щільної міської забудови, де стабільність каналів зв'язку є критичним чинником безпеки користувачів і надійності функціонування технічних систем [1].

Традиційні технічні засоби радіочастотного моніторингу, до яких відносять програмно-кероване радіо та аналізатори спектра, забезпечують широкий частотний діапазон сканування та високу точність вимірювань. Однак, в разі побудови розгалуженої системи контролю радіоефіру на значних територіях їх застосування пов'язане з високою вартістю та конструктивною складністю апаратури. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання розподілених сенсорних мереж на базі маловартісних IoT-пристроїв, що дає змогу формувати щільне поле вимірювальних вузлів і реалізувати радіочастотний моніторинг у режимі, наближеному до реального часу [2]. Такі IoT-орієнтовані рішення характеризуються низкою істотних обмежень, серед яких недостатня пропускна здатність і чутливість окремих радіомодулів, необхідність синхронізації роботи просторорозподілених сенсорів, а також потреба в обробці великих обсягів даних, що генеруються при безперервному скануванні спектра. Подолання зазначених обмежень зумовлює необхідність розроблення та впровадження інтелектуальних методів організації збору й попередньої обробки вимірювальної інформації, інтеграції хмарних сервісів та побудови масштабованих архітектур IoT-екосистем, спеціалізованих для задач радіочастотного моніторингу.

Апаратною основою запропонованої системи є вимірювальні вузли на базі мікроконтролерів ESP32 з підключеними радіочастотними модулями сімейства SX12xx (SX1281, SX1278, SX1268, SX1262), що підтримують протокол LoRa та забезпечують роботу в діапазонах 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц і 2,4 ГГц, які є типовими для IoT-застосувань [3]. Поєднання різних типів вузлів дає змогу охоплювати одночасно кілька спектральних діапазонів та адаптувати конфігурацію мережі під

конкретні задачі моніторингу. Сенсорні вузли функціонують у режимі радіочастотного сканування: здійснюється послідовний перегляд частот із заданим кроком, фіксується рівень потужності прийнятого сигналу (RSSI) та, за потреби, додаткові параметри сигналу. З огляду на обмежену миттєву смугу пропускання модулів LoRa, сканування реалізовано сегментно, із поділом загального діапазону на піддіапазони.

Сканування широкого частотного діапазону реалізується поетапно. Програмно змінюється центральна частота приймача та задаються дискретні значення робочої смуги в інтерфейсі сканера, унаслідок чого здійснюється поділ загального діапазону на піддіапазони, що послідовно аналізуються. Для модулів SX1278, SX1268, SX1262 використано набір номінальних значень діапазону сканування: 62,5 кГц, 125 кГц, 250 кГц та 500 кГц, тоді як для SX1281 застосовується інші діапазони: 203,125 кГц, 406,25 кГц, 812,5 кГц та 1625 кГц. Така конфігурація забезпечує можливість гнучкого поєднання режимів оглядового аналізу спектра та його деталізованого дослідження відповідно до поставлених задач моніторингу.

Проведено натурне моделювання системи радіочастотного моніторингу що запропоноване та її дослідження. Результати сканування в діапазоні від 2,4 ГГц до 2,5 ГГц представлено на рис. 1.

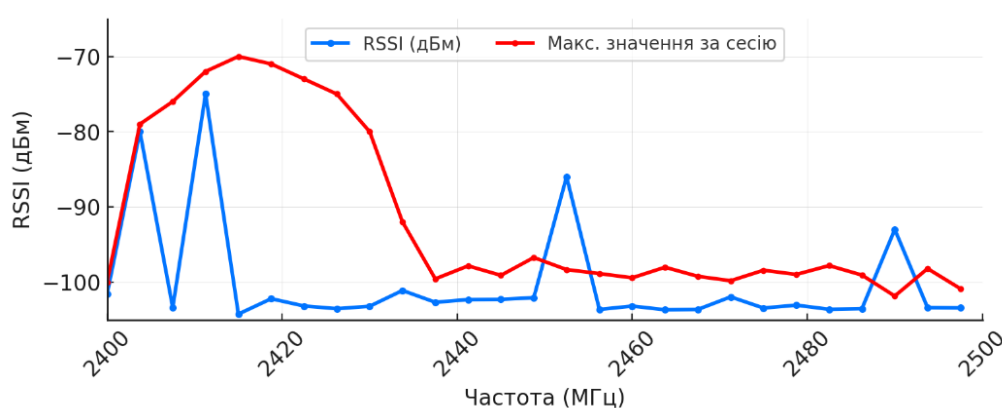


Рис. 1. Результати радіочастотного моніторингу в діапазоні від 2,4 ГГц до 2,5 ГГц

За результатами аналізу даних експериментального дослідження IoT-екосистеми радіочастотного моніторингу визначено, що така система забезпечує можливість дискретного моніторингу радіоефіру в широкому діапазоні частот. В основі побудови вузлів IoT-екосистеми застосовується пристрій з радіомодулями LoRa. Розподілений характер розташування вузлів в зоні радіочастотного моніторингу забезпечує виявлення смуг діапазону частот з підвищеним навантаженням, що дозволяє формувати карту використання радіочастотного спектру.

Архітектура IoT-екосистеми може бути масштабованою за рахунок використання різних радіомодулів. Властивості IoT-екосистем дозволяють розглядати її в якості системи для підтримки прийняття рішення щодо управління радіочастотним спектром. Данна властивість є актуальною в умовах підвищення кількості споживачів радіочастотного ресурсу. Мережа сенсорів генерує значні обсяги даних, для збереження та подальшого аналізу яких необхідно застосовувати хмарні технології та підходи Big Data до обробки великих масивів інформації.

Література

1. Rafiqi H., Mahendru G., Gupta S.H. Effect of Relay-based Communication on Probability of Detection for Spectrum Sensing in LoRaWAN // Wireless Personal Communications. 2023. P. 2345–2366.
2. Calvo-Palomino R., Cordobés H., Engel M., Fuchs M., Jain P., Liechti M., Rajendran S., Van den Bergh B., Pollin S., Giustiniano D., Lenders V. Electrosense+: Crowdsourcing radio spectrum decoding using IoT receivers [Електронний ресурс] // Computer Networks. 2020. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128619314471>.
3. Stangaciu V., Stangaciu C., Gusita B. et al. Integrating Real-Time Wireless Sensor Networks into IoT Using MQTT-SN // J Netw Syst Manage. 2025. P. 33 - 37. <https://doi.org/10.1007/s10922-025-09916-1>