

УДК 004.77:621.396.97

Старший викладач Радченко К.О., магістрант Статечний С.В.,
асистент Крайносвіт А.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОПРОТОКОЛУ ДЛЯ LOW POWER IOT СИСТЕМ

Abstract

Radchenko K., senior teacher; Statechnyi S., postgraduated student;
Krainosvit A., assistant

Adaptive Method for Improving the Reliability and Energy Efficiency of a Radio Protocol for Low-Power IoT Systems

This paper presents an adaptive method to improve the reliability and energy efficiency of a radio communication protocol for low-power IoT systems. The method dynamically adapts the spreading factor, transmission power, and packet timing in response to changing channel conditions and network congestion. Unlike conventional LoRaWAN schemes with fixed settings or slow ADR mechanisms, the proposed approach applies context-aware adaptation based on packet loss, signal quality, and congestion. It also introduces adaptive retransmission control and flexible receive windows to reduce energy consumption without compromising reliability. System-level modeling was performed to evaluate the method against baseline LoRa and enhanced ADR variants, showing that contextual parameter adjustment can improve link stability and extend device lifetime in dynamic radio environments.

Вступ

У сучасному світі IoT є однією з найперспективніших технологій, що активно використовується у системах моніторингу довкілля, розумного міста та промисловій автоматизації. Вона забезпечує взаємодію великої кількості малопотужних пристроїв у спільній інформаційній мережі. Основним викликом при проектуванні таких систем є забезпечення надійного та енергоефективного обміну даними між вузлами, які працюють у зашумленому радіосередовищі та мають обмежені енергетичні ресурси.

Серед технологій класу LPWAN найбільш поширеним рішенням є протокол LoRaWAN, який забезпечує зв'язок на великі відстані при низькому енергоспоживанні. Водночас його ефективність знижується в умовах динамічних змін параметрів радіоканалу, коли фіксовані параметри передачі не дозволяють швидко реагувати на коливання сигналу чи

навантаження мережі. Це створює компроміс між стабільністю зв'язку, пропускнуою здатністю та тривалістю автономної роботи пристрою.

З метою усунення цих обмежень у даній роботі запропоновано адаптивний метод керування параметрами радіопротоколу, який у режимі реального часу реагує на зміну стану каналу зв'язку, рівень завад і навантаження мережі, забезпечуючи оптимальний баланс між надійністю та енергоефективністю системи.

Забезпечення надійного та енергоефективного зв'язку в енергообмежених IoT-системах ускладнюється змінними умовами радіоканалу та фіксованими параметрами передачі в існуючих протоколах. Стандартні механізми адаптації, такі як ADR, реагують повільно та не враховують поточний стан мережі, що призводить до втрати пакетів та перевитрат енергії. Метою роботи є підвищення надійності та енергоефективності обміну даними шляхом розробки адаптивного методу керування параметрами радіопротоколу, який динамічно регулює характеристики передачі залежно від стану каналу та навантаження мережі.

Термінологія

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – показник потужності отриманого сигналу.

SNR (*Signal-to-Noise Ration*) – співвідношення між корисним сигналом та шумом, яке показує якість сигналу порівнянно з фоновим шумом.

LPWAN (Low-Power Wide Area Network) – клас бездротових мереж, призначених для передачі невеликих обсягів даних на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням.

LoRa (LongRange) – модуляція радіосигналу з розширеним спектром (*Spread Spectrum*), що забезпечує стійкий зв'язок на великій відстані при низькій потужності передавання.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) – мережевий протокол побудований на LoRa, який визначає структуру зв'язку між вузлами та шлюзами, механізми підтвердження, повторів і керування швидкістю передачі даних.

ADR (Adaptive Data Rate) – механізм LoRaWAN, який регулює параметри передавання (SF, TxPower) залежно від якості з'єднання з метою підвищення ефективності мережі.

PDR (Packet Delivery Ratio) – відношення кількості успішно доставлених пакетів до загальної кількості переданих, що характеризує надійність та ефективність зв'язку.

Duty Cycle – частка часу, протягом якої передавач може перебувати в активному стані; визначається нормативними обмеженнями для радіодіапазону.

SF (Spreading Factor) – параметр модуляції LoRa, який визначає тривалість символу та впливає на дальність зв'язку і швидкість передавання даних.

TxPower (Transmission Power) – потужність передавання радіосигналу, що впливає на енергоспоживання вузла та якість прийому.

RX Window – часовий інтервал після передавання, протягом якого вузол активно прослуховує канал зв'язку для можливого отримання підтвердження на попередньо надісланий пакет.

Аналіз існуючих рішень

Одним із ключових завдань у сучасних IoT-системах є забезпечення надійного бездротового зв'язку за мінімального енергоспоживання.

Для досягнення цього балансу в мережах класу LPWAN застосовуються різні методи регулювання параметрів передавання – зокрема швидкості, потужності сигналу та частоти виходу в ефір. Одним із найпоширеніших рішень є протокол LoRaWAN, у якому реалізовано механізм ADR [1]. Він змінює параметри передавання залежно від рівня сигналу, що знижує навантаження на мережу та подовжує автономність вузлів. Водночас стандартний ADR має інерційний характер, повільно реагує на короткочасні зміни умов каналу та не забезпечує ефективного балансування між надійністю і енергоспоживанням.

Інші підходи орієнтуються на динамічне керування потужністю передавання [2], коли вузол змінює *TxPower* на основі значень RSSI і SNR. Такі алгоритми дозволяють зменшити витрати енергії, проте не враховують поточне навантаження мережі та можливі колізії під час одночасної передачі даних кількома вузлами.

У низці досліджень запропоновано використання методів машинного навчання для прогнозування стану каналу [3] або контекстно-залежної адаптації частоти передавання [4]. Ці рішення демонструють покращення стабільності зв'язку, однак потребують значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх практичне застосування у малопотужних пристроях.

Загалом більшість існуючих рішень зосереджені лише на окремих аспектах оптимізації — або енергоспоживанні, або надійності зв'язку — без урахування комплексної взаємодії між параметрами мережі. Це створює передумови для розроблення методу, який забезпечує одночасну адаптацію параметрів у реальному часі, враховуючи як стан радіоканалу, так і навантаження мережі.

Опис запропонованого методу

У даному дослідженні запропоновано адаптивний метод керування параметрами радіопротоколу для енергообмежених IoT-систем, спрямований

на підвищення надійності зв'язку та зниження енергоспоживання. Суть методу полягає в адаптації параметрів передавання (SF, TxPower, інтервал між пакетами, кількість повторів) відповідно до змін умов радіоканалу та навантаженості мережі.

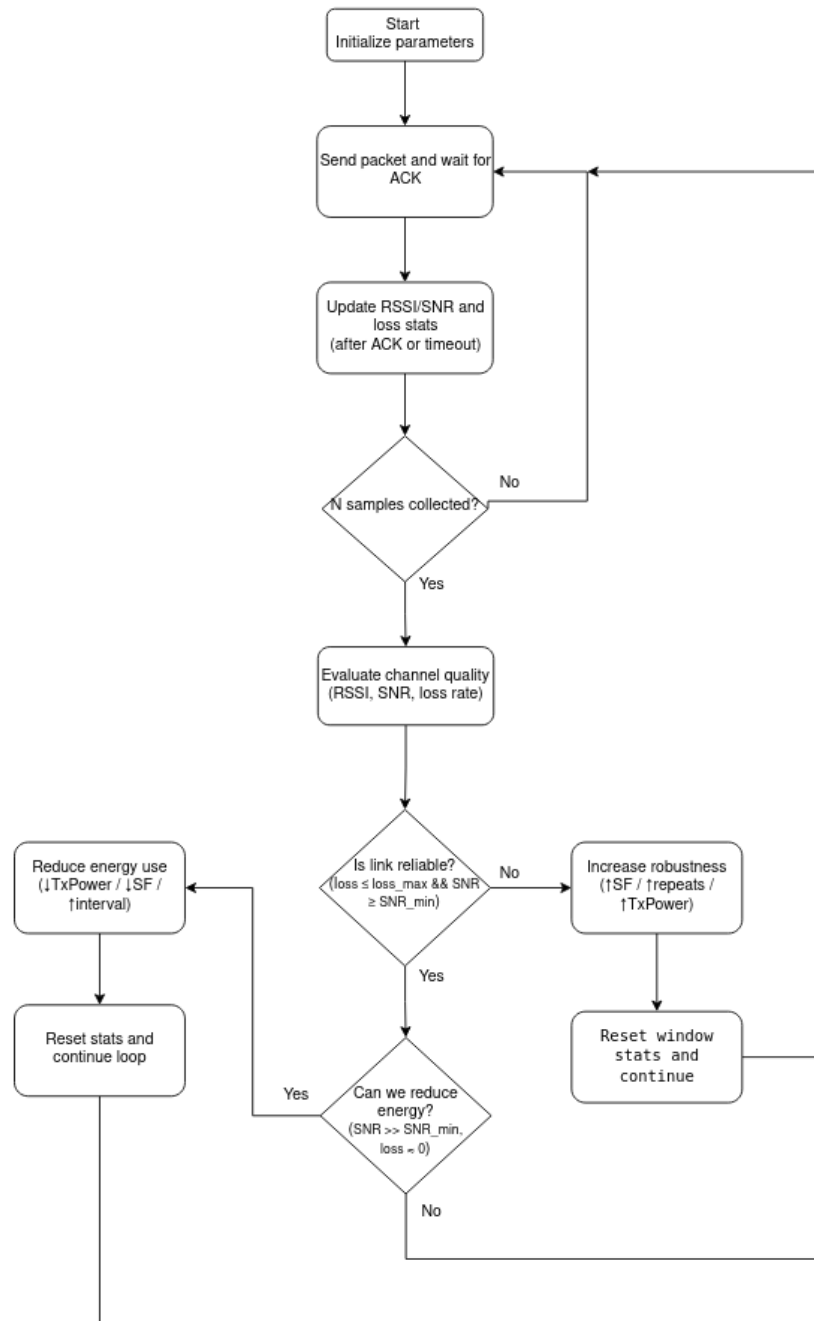


Рис. 2. Логічна схема запропонованого адаптивного алгоритму керування параметрами передавання

Метод реалізує контекстно-залежну адаптацію, у межах якої кожен вузол системи періодично оцінює якість зв'язку за показниками RSSI, SNR, частотою втрат пакетів та затримкою підтверджень (ACK delay). На основі

цих параметрів виконується прийняття рішень щодо зміни режиму передавання. У разі погіршення умов каналу вузол збільшує SF або кількість повторів, а за стабільного з'єднання відповідно зменшує потужність передавання та частоту виходів в ефір, знижуючи енергоспоживання без втрати надійності зв'язку.

Логічну структуру роботи алгоритму наведено на *рис. 2*. Алгоритм функціонує циклічно: після кожної передачі пакетів оновлюється статистика щодо стану каналу, виконується оцінка зібраних даних і приймається рішення щодо зміни параметрів передавання. У разі виявлення деградації каналу система підвищує надійність шляхом збільшення SF, TxPower або кількості повторів. Якщо канал стабільний, алгоритм поступово зменшує енергоспоживання, зберігаючи якість зв'язку.

Для верифікації запропонованого підходу передбачається моделювання роботи системи, яке відтворює взаємодію вузлів IoT у середовищі з перешкодами, різними рівнями завантаженості мережі та обмеженнями за енергоресурсами. У межах експериментів планується порівняння ефективності запропонованого алгоритму з базовим фіксованим протоколом, а також з існуючими реалізаціями механізму ADR, характерними для LoRaWAN. Очікується, що розроблений метод забезпечить оптимальний баланс між надійністю зв'язку та енергоефективністю за змінних умов радіоканалу.

Висновки

Проведене дослідження показало, що підхід із контекстною адаптацією параметрів радіопротоколу здатен підвищити ефективність обміну в малопотужних IoT-системах без ускладнення архітектури мережі. На відміну від стандартних ADR-механізмів, запропонований метод реагує на зміни середовища в реальному часі та дозволяє підтримувати стабільний рівень зв'язку при мінімальних енергетичних витратах.

Результати моделювання свідчать, що навіть проста логіка динамічного коригування коефіцієнта розширення спектра, потужності сигналу та інтервалів між передаваннями може істотно знизити кількість повторів і колізій в умовах високого рівня завад.

Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід може бути використаний як основа для побудови більш гнучких та автономних LPWAN-протоколів, придатних для масштабованих систем моніторингу та промислових IoT-рішень. У подальшій роботі планується докладне дослідження роботи методу в залежності від рівня завад, кількості вузлів та загальної конфігурації мережі.

Література

1. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466.
2. Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., & Alonso, J. (2016). Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? *Proceedings of MSWiM 2016*.
3. Liu, Z., Chen, W., & Liu, S. (2021). Machine Learning-Based Adaptive Data Rate for LoRa Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(12), 9983–9994.
4. Reynders, B., Wang, Q., & Pollin, S. (2018). Optimizing LoRaWAN Adaptive Data Rate for Dynamic IoT Environments. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*.