

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-35>

УДК 004.77:621.396.97

Радченко Костянтин Олександрович, ст. викладач

<https://orcid.org/0000-0002-1282-6307>

Статечний Сергій Валерійович, магістрант

<https://orcid.org/0009-0009-3586-1971>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО КОНТЕКСТНО-ЗАЛЕЖНОЇ АДАПТАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ LoRaWAN У ЕНЕРГООБМЕЖЕНИХ IoT-СИСТЕМАХ

Радченко К. О., Статечний С. В., Сучасні підходи до контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN у енергообмежених IoT-системах. У статті розглянуто підходи до підвищення надійності передавання даних і енергоефективності функціонування енергообмежених IoT-систем шляхом розроблення контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN на основі узагальнення існуючих рішень та розвитку адаптивних методів керування радіообміном у динамічних умовах функціонування мережі. Використано методи системного та порівняльного аналізу для узагальнення сучасних підходів адаптації параметрів LoRaWAN, методи моделювання мережевих процесів для оцінювання взаємозв'язку між якістю сигналу, втратами пакетів і затримками підтвердження, а також методи функціонального узагальнення для формування моделі контекстно-залежного керування передаванням даних. Досліджено особливості функціонування енергообмежених IoT-систем і встановлено, що ефективність LoRaWAN визначається узгодженістю параметрів передавання з поточним контекстом роботи мережі. Виявлено інерційність стандартного механізму ADR та обмеженість підходів, орієнтованих лише на показники рівня сигналу. Доведено доцільність інтегрованого врахування RSSI, SNR, частоти втрат пакетів і затримок підтвердження як єдиної інформаційної основи адаптації. Розроблено модель контекстно-залежної адаптації параметрів передавання, яка забезпечує проактивну зміну режимів роботи вузлів, зменшення кількості повторних передач і оптимізацію енергоспоживання без ускладнення архітектури мережі. Установлено, що перехід від параметричної до контекстної адаптації дозволяє підвищити надійність функціонування LoRaWAN та забезпечити стабільність передавання даних у масштабованих IoT-мережах. Запропоновані підходи сприяють подовженню автономної роботи пристроїв і підвищенню ефективності використання радіоресурсу.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, адаптивне керування, енергоощадні протоколи, оптимізація радіоресурсу, якість каналу зв'язку, доставка пакетів, мережеве навантаження, автономні сенсорні вузли, масштабованість мереж, низькопотужні комунікації.

Radchenko K., Statechnyi S. Modern Approaches to Context-Dependent Adaptation of LoRaWAN Parameters in Energy-Constrained IoT Systems. The article aims to substantiate approaches to enhancing data transmission reliability and energy efficiency in energy-constrained IoT systems by developing context-aware adaptation of LoRaWAN parameters, based on the generalization of existing solutions and the advancement of adaptive radio communication control methods under dynamically changing network conditions. System and comparative analysis methods were applied to generalize modern LoRaWAN adaptation approaches; network process modeling methods were used to evaluate relationships between signal quality, packet loss, and acknowledgment delay; functional generalization methods were employed to develop a context-dependent transmission control model. The functioning characteristics of energy-constrained IoT systems were investigated, and it was established that LoRaWAN efficiency depends on the consistency between transmission parameters and the operational network context. The inertia of the standard Adaptive Data Rate mechanism was identified, along with limitations of approaches relying solely on signal-level indicators. The necessity of integrated consideration of RSSI, SNR, packet delivery statistics, and acknowledgment delay as a unified adaptation basis was proven. A context-dependent adaptation model was developed that enables proactive adjustment of transmission parameters, reduces retransmissions, and optimizes energy consumption without increasing network architectural complexity. It was established that the transition from parameter-based to context-aware adaptation improves LoRaWAN operational reliability and ensures stable data delivery in scalable IoT networks. The proposed approaches contribute to extended device lifetime and more efficient utilization of radio resources.

Keywords: wireless sensor networks, adaptive control, energy-aware protocols, radio resource optimization, link quality assessment, packet delivery performance, network load management, autonomous sensor nodes, network scalability, low-power communications.

Постановка наукової проблеми. Стрімке зростання кількості пристроїв Інтернету речей (Internet of Things, IoT) супроводжується розширенням сфер застосування енергообмежених сенсорних мереж, у яких визначальним чинником ефективності функціонування є забезпечення тривалої автономної роботи вузлів за умов обмежених енергетичних ресурсів. У таких системах мережі дальнього радіозв'язку з низьким енергоспоживанням (Low Power Wide Area Network, LPWAN) розглядаються як базова технологічна основа масштабованого обміну даними між розподіленими пристроями. Однією з найбільш поширених реалізацій цього підходу є мережевий протокол LoRaWAN (Long Range Wide Area Network, LoRaWAN), який забезпечує передавання даних на великі відстані з мінімальними витратами енергії кінцевих пристроїв.

Разом із тим практичне розгортання енергообмежених IoT-систем відбувається в умовах динамічного радіосередовища, змінної щільності вузлів, нерівномірного навантаження каналів зв'язку, перешкод та варіативності якості сигналу, що істотно впливає на стабільність передавання даних і тривалість роботи пристроїв. Традиційні механізми керування параметрами LoRaWAN, зокрема адаптація швидкості передавання даних (Adaptive Data Rate, ADR), орієнтовані переважно на усереднені характеристики каналу зв'язку та не враховують повною мірою контекст функціонування мережі, який формується поєднанням енергетичних, просторових, часових і середовищних факторів. У результаті виникає суперечність між потребою підвищення енергоефективності мережі, забезпечення надійності передавання даних і необхідністю масштабування IoT-інфраструктур у реальних експлуатаційних умовах.

Проблема контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN набуває особливої актуальності у прикладних завданнях моніторингу довкілля, розумного сільського господарства (smart agriculture), міської інфраструктури (smart city) та промислового інтернету речей (Industrial Internet of Things, IIoT), де від стабільності мережевої взаємодії безпосередньо залежить якість прийняття управлінських рішень, безперервність технологічних процесів і ефективність використання ресурсів. Таким чином, формування науково обґрунтованих підходів до контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN у енергообмежених IoT-системах пов'язане з розв'язанням важливих наукових і практичних завдань підвищення енергоефективності бездротових сенсорних мереж, оптимізації використання радіоресурсу, забезпечення надійності передавання даних та розвитку інтелектуальних методів керування розподіленими мережевими системами нового покоління.

Аналіз досліджень. Огляд сучасних досліджень свідчить, що розвиток цієї проблематики відбувається через поступове ускладнення підходів до керування передаванням даних - від класичних оптимізаційних моделей до інтелектуальних багаторівневих систем адаптації, що враховують динамічний стан мережевого середовища, радіоканалу та енергетичних ресурсів пристроїв.

Значна частина досліджень присвячена оптимізації базових параметрів передавання як фундаменту енергоефективної роботи LoRaWAN. Дослідження [1] обґрунтовує модель енергообмеженого розподілу коефіцієнту розширення спектра, що дозволяє досягти балансу між імовірністю приймання пакетів і витратами енергії кінцевих вузлів. У статті [2] показано, що зменшення обсягу передаваних даних за рахунок компресійного зондування істотно скорочує час активної роботи передавача і, відповідно, енергоспоживання сенсорних пристроїв. Дослідники [3] довели, що оптимізація покриття IoT-мереж і розміщення інфраструктурних елементів є критичною умовою стабільності енергетичних режимів LoRaWAN. Водночас, стаття [4] встановлює, що використання множинних шлюзів підвищує якість приймання сигналу та дозволяє зменшити потужність передавання вузлів.

Подальший розвиток досліджень зосереджується на адаптивному керуванні швидкістю передавання та протокольними механізмами LoRaWAN, які виступають ключовим інструментом контекстної адаптації. Автори [5] дослідили адаптивні методи зміни швидкості передавання в енергообмежених LoRa-мережах, продемонструвавши залежність ефективності ADR від характеристик радіоканалу. У роботі [6] представлено системний аналіз оптимізації Adaptive Data Rate, визначивши інерційність алгоритмів як одну з головних проблем сучасних LoRaWAN-мереж. Робота [7] узагальнює потенціал LPWAN-технологій, підкресливши необхідність гнучкого керування параметрами передавання для забезпечення масштабованості систем. Стаття [8] показує, що адаптація швидкості передавання повинна одночасно враховувати затримку, втрати пакетів і енергоспоживання, особливо у великомасштабних IoT-мережах із чутливими до затримок застосуваннями.

Наступна група досліджень демонструє перехід до підходів, керованих даними і використання методів штучного інтелекту як інструменту контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN. Дослідники [9] запропонували підхід з глибоким навчанням для прогнозування оптимальних параметрів мережі з метою підвищення продуктивності та енергоефективності сенсорних систем. У статті [10] застосовано навчання з підкріпленням для динамічного призначення параметрів передавання, що дозволяє системі самостійно формувати політику адаптації залежно від поточного контексту функціонування. Робота [11] узагальнює реалізацію LoRaWAN на основі даних і визначає їх як ключовий напрям еволюції LPWAN-мереж. Дослідники [12] розробили енергоефективну IoT-архітектуру з динамічним плануванням передачі

та адаптивним керуванням потужністю, що підтвердило ефективність прогнозних моделей у прикладних сценаріях.

Окрему групу становлять роботи, у яких адаптація параметрів LoRaWAN розглядається як елемент комплексної архітектури функціонування IoT-систем. Так, робота [13] досліджує захищені енергообмежені LoRaMesh-мережі, показавши вплив механізмів безпеки на енергетичний баланс вузлів і необхідність їх врахування під час адаптації параметрів передавання. У статті [14] здійснено протокольно-орієнтований аналіз енергетично-обмежених IoT-систем, і доводиться залежність ефективності адаптації від узгодженості рівнів мережевого стеку. Автори [15] дослідили LoRaWAN-інтегровані переносні сенсорні мережі, у яких контекст адаптації визначається мобільністю користувачів і варіативністю радіоканалу. Узагальнення цих досліджень дозволяє зробити висновок про необхідність формування комплексних контекстно-орієнтованих архітектур LoRaWAN, що інтегрують протокольну оптимізацію, безпеку та специфіку прикладних сценаріїв.

Попри значну кількість досліджень у сфері LoRaWAN, невирішеною залишається проблема комплексної адаптації параметрів передавання в енергообмежених IoT-системах. Існуючі підходи здебільшого орієнтовані на оптимізацію окремих характеристик зв'язку та демонструють обмежену ефективність у динамічному радіосередовищі через інерційність ADR, недостатнє врахування мережевого навантаження та обмежені ресурси кінцевих пристроїв. Недостатньо дослідженим залишається інтегроване використання показників якості сигналу, втрат пакетів і затримок підтвердження як єдиного контексту керування передаванням даних.

Запропоноване дослідження спрямоване на подолання зазначених прогалин шляхом узагальнення принципів контекстно-залежного керування та розроблення моделі адаптації параметрів LoRaWAN, що забезпечує узгоджену зміну режимів передавання відповідно до поточного стану мережі. Це дозволяє підвищити надійність зв'язку, зменшити кількість повторних передавань і оптимізувати енергоспоживання вузлів, розширюючи наукові підходи до побудови енергоефективних IoT-систем.

Мета дослідження. Метою статті є підвищення надійності передавання даних та енергоефективності функціонування енергообмежених IoT-систем шляхом обґрунтування підходів до контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN на основі узагальнення матеріалів замовника та розвитку адаптивних методів керування радіообміном у динамічних умовах функціонування мережі.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Проаналізувати особливості функціонування енергообмежених IoT-систем та ефективність існуючих підходів адаптації параметрів LoRaWAN;
2. Узагальнити принципи контекстно-залежного керування та визначити проблеми реалізації адаптивних механізмів LoRaWAN;
3. Розробити модель контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN для підвищення надійності передавання даних і енергоефективності IoT-систем.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Функціонування енергообмежених IoT-систем пов'язане з необхідністю забезпечення стабільного обміну даними за умов обмежених енергетичних ресурсів кінцевих вузлів та високої варіативності радіосередовища. У мережах LoRaWAN ефективність передачі визначається не окремими параметрами зв'язку, а їх узгодженою взаємодією із характеристиками каналу, щільністю розгортання пристроїв, інтенсивністю трафіку та режимами мережевої взаємодії. Дослідження сучасних підходів до адаптивного керування параметрами передавання показують, що використання статичних налаштувань призводить до зростання втрат пакетів або перевитрат енергії, оскільки реальні IoT-мережі функціонують у динамічних умовах із змінним рівнем сигналу, перешкодами та колізіями передач.

У сучасних практичних сценаріях експлуатації IoT-мереж робота вузла LoRaWAN фактично являє собою процес безперервної адаптації до середовища функціонування. Наприклад, у системах екологічного моніторингу сенсорні вузли розташовуються на значних відстанях від шлюзів і працюють у складних умовах поширення сигналу. При зниженні RSSI або погіршенні SNR збільшення SF дозволяє зберегти стабільність зв'язку, однак подовжує час передачі пакета, що підвищує енергоспоживання. У протилежній ситуації – при стабільному каналі – зменшення TxPower і збільшення інтервалів між передачами дає змогу істотно продовжити термін автономної роботи пристрою без втрати якості сервісу (табл. 1).

Таблиця 1. Ключові фактори впливу на стабільність зв'язку та енергоспоживання вузлів LoRaWAN

Фактор	Характер впливу	Вплив на стабільність зв'язку	Вплив на енергоспоживання
RSSI (Received Signal Strength Indicator)	Рівень прийнятого сигналу	Зменшення втрат пакетів	Скорочення повторних передач
SNR (Signal-to-Noise Ratio)	Якість сигналу	Стійкість прийому	Менший час активності радіомодуля
SF (Spreading Factor)	Параметр модуляції	Збільшення дальності зв'язку	Зростання часу передачі
TxPower (Transmission Power)	Потужність сигналу	Компенсація завад	Підвищення витрат енергії
Інтервал передачі	Частота передач	Зниження колізій	Менше енергоспоживання
Повторні передачі	Відновлення втрачених пакетів	Підвищення PDR (Packet Delivery Ratio)	Прискорене розрядження батареї
RX Window (Receive Window)	Час прослуховування каналу	Отримання підтверджень АСК	Витрати енергії приймача
Навантаження мережі	Щільність вузлів	Ризик колізій	Непряме зростання споживання

У міських IoT-системах, таких як розумне освітлення або дистанційний облік ресурсів, вирішальним фактором стає мережеве навантаження. Велика кількість одночасних передач створює колізії навіть за високого рівня сигналу, тому зростає кількість повторних пакетів, які формують основну частку енергетичних витрат вузла. Практичний досвід експлуатації LoRaWAN показує, що оптимізація лише потужності сигналу або швидкості передачі є недостатньою; необхідним є комплексне врахування параметрів каналу, статистики втрат і часових характеристик підтвердження передач.

У промислових IoT-рішеннях моніторингу обладнання адаптивне регулювання параметрів дозволяє переходити між режимами енергозбереження та підвищеної надійності. За стабільних умов вузол працює в енергоощадному режимі з мінімальною потужністю та рідкісними передачами, тоді як при появі завад або зростанні втрат пакетів автоматично активується режим підвищеної стійкості зв'язку із збільшенням SF або кількості повторів. Такий підхід забезпечує підтримання гарантованого рівня доставки даних без постійного перевитрачання енергії.

Отже, у сучасних IoT-системах стабільність зв'язку формується як результат динамічного балансування параметрів передавання, а енергоефективність визначається здатністю мережі адаптуватися до поточного контексту функціонування. Саме контекстно-залежне керування параметрами LoRaWAN дозволяє забезпечити масштабованість мереж, прогнозовану якість зв'язку та багаторічну автономну роботу сенсорних вузлів у реальних умовах експлуатації.

Адаптація параметрів передавання даних у LoRaWAN формується як еволюційний перехід від реактивних алгоритмів керування зв'язком до інтелектуальних механізмів динамічного розподілу радіоресурсу. Ефективність мережі дедалі більше визначається не абсолютними значеннями параметрів передачі, а здатністю системи підтримувати їх узгодженість із поточним станом каналу зв'язку та інтенсивністю трафіку. Сучасні підходи адаптації орієнтовані на мінімізацію часу перебування вузла в активних режимах роботи радіомодуля при одночасному забезпеченні необхідного рівня доставки пакетів, що є критичним для енергообмежених IoT-систем.

Різні підходи адаптації демонструють відмінну поведінку залежно від характеру мережевого середовища та типу прикладного навантаження. Механізм ADR забезпечує ефективну оптимізацію у сценаріях зі стабільною топологією мережі, де статистика каналу накопичується поступово й дозволяє зменшувати SF та TxPower без ризику втрати зв'язку. Це характерно для інфраструктурних IoT-рішень із передбачуваним профілем передач, зокрема систем дистанційного обліку енергоресурсів або стаціонарного екологічного моніторингу, де вузли працюють роками в незмінних умовах розміщення (табл. 2).

Таблиця 2. Сучасні підходи адаптації параметрів передавання даних у LoRaWAN

Підхід адаптації	Принцип функціонування	Практичний ефект у мережі
ADR	Динамічне регулювання SF і TxPower на основі статистики каналу	Зменшення енергоспоживання та підвищення пропускної здатності
Адаптивне керування потужністю	Коригування TxPower відповідно до рівня сигналу	Стабілізація прийому даних
Адаптація інтервалів передач	Регулювання частоти виходу вузла в ефір	Зниження колізій у мережі
Прогнозування стану каналу	Використання моделей прогнозування якості зв'язку	Підвищення передбачуваності передач
Контекстно-залежна адаптація	Одночасна зміна комплексу параметрів	Баланс енергоефективності та надійності

Із зростанням щільності вузлів змінюється домінуючий фактор ефективності мережі: визначальним стає не якість сигналу окремого пристрою, а колективна поведінка системи передач. У міських середовищах або виробничих об'єктах одночасна активність великої кількості вузлів формує конкуренцію за радіоканал, тому адаптація інтервалів передач виступає інструментом керування мережевою стабільністю. Зміщення часових параметрів передачі дозволяє зменшити імовірність колізій без збільшення потужності сигналу, що фактично переводить оптимізацію з фізичного рівня на рівень керування трафіком.

Адаптивне керування потужністю сигналу проявляє найбільшу ефективність у граничних зонах покриття або в середовищах зі змінною екранованістю сигналу, наприклад у промислових приміщеннях із металевими конструкціями чи підземних інженерних мережах. У таких умовах навіть незначне коригування TxPower дозволяє підтримувати стабільний рівень прийому без переходу на більший SF, що запобігає непропорційному зростанню часу передачі та витрат енергії.

Методи прогнозування стану каналу змінюють логіку функціонування LoRaWAN від реактивної до проактивної. Замість реагування на вже зафіксовані втрати пакетів система оцінює тенденції зміни параметрів каналу та завчасно модифікує режим передачі. Такий підхід є особливо релевантним для мобільних або напівмобільних вузлів, зокрема логістичних датчиків чи аграрних IoT-платформ, де якість зв'язку змінюється разом із переміщенням об'єктів.

Найвищий рівень ефективності демонструють контекстно-залежні механізми адаптації, які інтегрують параметри фізичного рівня, мережеву статистику та часові характеристики обміну даними. У цьому випадку вузол або мережевий сервер приймає рішення не за окремим показником, а за їх сукупністю, що дозволяє уникнути конфлікту між енергоефективністю та надійністю передачі. Така модель керування поступово формує архітектуру самооптимізованих IoT-мереж, у яких стабільність зв'язку забезпечується не резервуванням ресурсу, а інтелектуальним узгодженням режимів роботи всіх вузлів системи.

Контекстно-залежне керування параметрами передавання в LoRaWAN відображає перехід від локальної оптимізації параметрів радіозв'язку до системного керування поведінкою мережі на основі інтерпретації стану середовища обміну даними. Якщо класичні механізми адаптації орієнтовані переважно на миттєві значення рівня сигналу, то сучасні підходи враховують взаємозв'язок між якістю каналу, результатами попередніх передач і часовими характеристиками мережевої взаємодії. Контекст у цьому випадку виступає агрегованою інформаційною моделлю функціонування мережі, що формується на основі показників RSSI, SNR, частоти втрат пакетів і затримки підтвердження передач. Узагальнення таких показників дозволяє системі переходити від реактивної зміни параметрів до адаптивного прогнозування режимів передавання, що відповідає логіці адаптивного алгоритму керування параметрами радіопротоколу, де рішення приймається після оцінювання накопиченої статистики зв'язку та стану каналу (табл. 3).

Таблиця 3. Принципи контекстно-залежного керування параметрами передавання в LoRaWAN

Контекстний показник	Інформаційний зміст	Керуюча дія системи	Очікуваний ефект
RSSI, SNR	Поточний стан радіоканалу	Коригування SF і TxPower	Стабілізація рівня прийому
Частка втрат пакетів	Реальна надійність передач	Зміна політики повторів	Підвищення PDR

Затримка підтвердження АСК	Ознака перевантаження мережі	Адаптація RX Window та інтервалів передач	Зменшення колізій
Динаміка зміни показників	Тенденції деградації каналу	Проактивна адаптація	Запобігання втратам зв'язку
Інтегральний контекст	Узагальнений стан мережі	Комплексна зміна параметрів	Баланс енергоефективності й надійності

Контекстно-залежне керування фактично трансформує процес передавання даних у LoRaWAN із послідовності незалежних сеансів зв'язку в керований цикл прийняття рішень. Кожна передача пакета розглядається як джерело інформації про стан мережі, а накопичення статистики дозволяє інтерпретувати відхилення показників не ізольовано, а в причинно-наслідковому зв'язку. Зростання втрат пакетів, наприклад, може бути наслідком погіршення сигналу, перевантаження шлюзу або синхронізації передач великої кількості вузлів; контекстний підхід дозволяє розрізнити ці сценарії та застосовувати різні керуючі дії замість універсального збільшення потужності сигналу.

У системах індустріального моніторингу обладнання характерними є короткочасні імпульсні завади, що викликають тимчасове падіння SNR без зміни геометрії мережі. Контекстна модель у таких випадках ігнорує одиничні відхилення, реагуючи лише на стійку тенденцію деградації каналу, що запобігає надлишковим перебудовам параметрів і зберігає енергетичну стабільність вузлів. Для мереж розумного міського середовища визначальним індикатором стає затримка підтверджень АСК: її зростання сигналізує про конкуренцію за радіоканал навіть за високого рівня сигналу, тому система зменшує інтенсивність передач або зміщує часові вікна прийому, розвантажуючи мережу без втручання у фізичні параметри сигналу.

У розподілених аграрних IoT-платформах контекстно-залежне керування дозволяє узгоджувати поведінку вузлів із сезонною динамікою середовища. Зміна вологості ґрунту або рослинності впливає на поширення сигналу, що проявляється поступовою зміною RSSI; аналіз тенденцій дає можливість коригувати SF до появи масових втрат пакетів, підтримуючи стабільність збору даних без збільшення енергоспоживання. Подібна логіка реалізує проактивну модель адаптації, коли система не реагує на помилки, а попереджає їх виникнення.

Інтеграція показників якості сигналу, статистики доставлення пакетів і часових характеристик підтвердження формує основу самоузгоджуваної поведінки мережі. У масштабованих IoT-системах це дозволяє уникнути конфлікту між енергоефективністю окремого вузла та стабільністю всієї мережі, оскільки керування здійснюється на рівні контексту функціонування, а не окремих параметрів передавання. Саме така парадигма розглядається як ключовий напрям розвитку LoRaWAN у системах із тисячами автономних пристроїв, де ефективність зв'язку визначається здатністю мережі інтерпретувати власний стан і адаптувати режими роботи відповідно до нього.

Реалізація адаптивних механізмів у LoRaWAN супроводжується низкою науково-практичних проблем, що виникають унаслідок невідповідності між теоретичними моделями керування передаванням даних і реальними умовами функціонування енергообмежених IoT-мереж. Ключова суперечність полягає у необхідності одночасного забезпечення високої надійності зв'язку, мінімального енергоспоживання та масштабованості мережі за умов обмежених обчислювальних можливостей кінцевих вузлів і динамічності радіосередовища.

Однією з фундаментальних проблем є інерційність механізму ADR, який здійснює оптимізацію параметрів передачі на основі накопиченої статистики каналу. Такий підхід ефективний лише за відносно стабільних умов поширення сигналу, тоді як у змінному радіосередовищі адаптація відбувається із запізненням відносно реального стану каналу. У результаті система або тривалий час працює з надлишковими параметрами передачі, витрачаючи енергію, або не встигає компенсувати деградацію каналу, що призводить до втрат пакетів. У дослідженнях адаптивного керування параметрами радіопротоколу показано, що стандартні ADR-алгоритми повільно реагують на короткочасні зміни рівня завад і навантаження мережі, що формує компроміс між стабільністю зв'язку та енергоефективністю.

Суттєвим обмеженням виступають ресурсні характеристики кінцевих пристроїв. Більшість IoT-вузлів мають обмежену пам'ять, низьку обчислювальну продуктивність і жорсткі енергетичні обмеження, що ускладнює застосування складних алгоритмів прогнозування або машинного

навчання без збільшення енергоспоживання. Будь-яке розширення логіки адаптації підвищує обсяг обчислень, частоту активації процесора та тривалість роботи радіомодуля, що суперечить основній вимозі довготривалої автономності пристрою. Таким чином, виникає проблема вибору між інтелектуальністю алгоритму та його енергетичною доцільністю.

Окрему групу проблем формує нестабільність радіосередовища, пов'язана з багатопроблемним поширенням сигналу, часовими змінами екранування, мобільністю об'єктів і стохастичним характером завад. У таких умовах параметри RSSI та SNR можуть змінюватися швидше, ніж алгоритм адаптації встигає накопичити достатню статистику, що знижує достовірність прийнятих рішень. Це ускладнює відокремлення короткочасних флуктуацій каналу від реальної деградації зв'язку та часто призводить до коливань параметрів передачі, які самі стають джерелом нестабільності мережі.

Проблемним залишається також масштабування LoRaWAN-мереж. Із зростанням кількості вузлів ефективність індивідуальної адаптації параметрів зменшується через колективний характер використання радіоканалу. Навіть оптимально налаштований окремий вузол може створювати колізії з іншими пристроями, оскільки класичні адаптивні механізми майже не враховують глобальний стан мережі. Це призводить до виникнення мережевих ефектів, коли локальна оптимізація окремих пристроїв погіршує загальну продуктивність системи.

Додатковою науковою проблемою є обмежена інформативність доступних метрик керування. Показники RSSI або SNR відображають лише фізичний рівень каналу і не дозволяють однозначно визначити причини втрат пакетів, які можуть бути зумовлені перевантаженням шлюзу, затримками підтверджень або синхронізацією передач великої кількості вузлів. Відсутність узагальненої моделі контексту функціонування ускладнює побудову універсальних алгоритмів адаптації.

Складність реалізації адаптивних механізмів підсилюється нормативними обмеженнями радіодіапазону, зокрема вимогами Duty Cycle, які обмежують частоту передач і зменшують можливість швидкої перебудови параметрів зв'язку. У ситуаціях погіршення каналу система не завжди може оперативно повторити передачу або перевірити нові налаштування, що уповільнює процес стабілізації мережі.

Розроблення моделі контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN спрямоване на усунення системної неузгодженості між енергоефективністю вузлів і надійністю передавання даних у енергообмежених IoT-системах. Існуючі механізми адаптації змінюють окремі параметри передавання незалежно один від одного, що забезпечує лише локальну оптимізацію та не враховує комплексний стан мережі. Запропонована модель розглядає процес передавання як замкнений цикл керування, у якому рішення щодо зміни режиму передачі приймається на основі інтегрованої оцінки контексту функціонування мережі, сформованого за сукупністю показників якості сигналу, втрат пакетів і затримок підтвердження. Актуальність моделі зумовлена тим, що в реальних LoRaWAN-мережах причини деградації зв'язку мають різну природу: погіршення каналу, перевантаження шлюзу або синхронізацію передач вузлів. Реакція лише на рівень сигналу призводить до перевитрат енергії, тоді як запропонований підхід забезпечує причинно-орієнтовану адаптацію. На відміну від ADR, який працює на основі довготривалої статистики, модель використовує циклічне оцінювання стану мережі після кожної передачі, що дозволяє виконувати проактивну зміну параметрів. Концептуально модель базується на принципі контекстної узгодженості: параметри SF, TxPower, інтервали передач і кількість повторів змінюються узгоджено, а не ізольовано. Такий підхід відповідає адаптивному алгоритму керування радіопротоколом, у якому вузол аналізує RSSI, SNR, частоту втрат пакетів і затримку ACK перед вибором режиму передачі (рис. 1).



Рис. 1. Модель контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN

Функціонування моделі реалізується як послідовний цикл аналізу та коригування параметрів передавання. Після кожної передачі вузол формує контекстний стан мережі та визначає причину змін якості зв'язку. Погіршення сигналу без зростання затримок інтерпретується як деградація каналу і компенсується збільшенням SF або TxPower, тоді як збільшення ACK delay за стабільних параметрів сигналу трактується як перевантаження мережі, що призводить до зміни інтервалів передач замість підсилення сигналу.

Такий механізм забезпечує зменшення повторних передач, скорочення часу активності радіомодуля та стабілізацію доставки пакетів у мережах великої щільності вузлів. У системах моніторингу довкілля це проявляється у подовженні строку роботи батарей завдяки поступовому зниженню TxPower після стабілізації каналу, а в промислових IoT-рішеннях – у швидкому відновленні зв'язку після появи завад без тривалого переналаштування мережі. У результаті формується самоузгоджена LoRaWAN-мережа, здатна підтримувати масштабовані енергообмежені IoT-системи із прогнозованою надійністю та мінімізованими енергетичними витратами.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що ефективність функціонування енергообмежених IoT-систем на базі LoRaWAN визначається рівнем контекстної узгодженості параметрів передавання із реальним станом мережі, а не оптимізацією окремих характеристик радіозв'язку. Доведено, що традиційні механізми адаптації, зокрема ADR, забезпечують прийнятні результати лише за квазістатичних умов, тоді як у динамічному радіосередовищі їх інерційність спричиняє зростання втрат пакетів, повторних передач і перевитрати енергетичних ресурсів вузлів. Встановлено, що стабільність передавання формується через інтегральний вплив показників якості сигналу, частоти втрат пакетів і затримок підтвердження, які повинні розглядатися як єдиний контекст функціонування мережі.

Виявлено основні науково-практичні проблеми реалізації адаптивних механізмів LoRaWAN: запізнення реакції ADR на зміну стану каналу, обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси кінцевих пристроїв, стохастичність радіосередовища, мережеві ефекти масштабування та недостатня інформативність ізольованих метрик керування. Показано, що локальна параметрична оптимізація без урахування мережевого контексту обмежує ефективність адаптації та знижує загальну надійність системи.

Обґрунтовано модель контекстно-залежної адаптації параметрів LoRaWAN, яка базується на інтегрованому аналізі стану каналу, статистики доставлення пакетів і часових характеристик підтвердження передач та забезпечує проактивну зміну режимів роботи вузлів. Запропонований підхід дозволяє зменшити кількість повторних передач, оптимізувати енергоспоживання й підвищити стабільність функціонування масштабованих IoT-мереж.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну валідацію моделі в реальних мережах, розвиток розподілених алгоритмів контекстної адаптації, інтеграцію прогнозних

методів оцінювання стану радіоканалу та формування самоорганізованих енергоефективних IoT-інфраструктур нового покоління.

Список бібліографічного опису

1. Narieda S., Fujii T., Umebayashi K. Energy constrained optimization for spreading factor allocation in lorawan. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 16. Article 4417. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20164417>.
2. Wu Y., He Y., Shi L. Energy-saving measurement in LoRaWAN-based wireless sensor networks by using compressed sensing. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 49477–49486. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974879>.
3. Gava M. A., Rocha H. R. O., Faber M. J., Segatto M. E. V., Wörtche H., Silva J. A. L. Optimizing resources and increasing the coverage of Internet-of-Things (IoT) networks: An approach based on LoRaWAN. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 3. Article 1239. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23031239>.
4. Loubany A., Lahoud S., Samhat A. E., El Helou M. Improving energy efficiency in LoRaWAN networks with multiple gateways. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 11. Article 5315. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23115315>.
5. Heeger D., Garigan M., Plusquellic J. Adaptive data rate techniques for energy constrained Ad Hoc LoRa networks. In: *2020 Global Internet of Things Summit (GloTS)*. 2020. P. 1–6. URL: https://ece-research.unm.edu/jimp/pubs/GIoT2020_FINAL.pdf (date of access: 23.02.2026).
6. Kufakunesu R., Hancke G. P., Abu-Mahfouz A. M. A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 18. Article 5044. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20185044>.
7. Milarokostas C., Tsolkas D., Passas N., Merakos L. A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 25, № 1. P. 825–867. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3229846>.
8. Emará M., Kouzayha N., ElSawy H., Al-Naffouri T. Y. Rate adaptation in delay-sensitive and energy-constrained large-scale IoT networks. *IEEE Transactions on Communications*. 2024. Vol. 73, № 3. P. 1895–1908. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2024.3453399>.
9. Alkhayyal M., Mostafa A. M. Enhancing LoRaWAN Sensor Networks: A Deep Learning Approach for Performance Optimizing and Energy Efficiency. *Computers, Materials & Continua*. 2025. Vol. 83, № 1. DOI: [10.32604/cmc.2025.061836](https://doi.org/10.32604/cmc.2025.061836).
10. Chen M., Mokdad L., Ben-Othman J., Fourneau J. M. Dynamic parameter allocation with reinforcement learning for LoRaWAN. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. Vol. 10, № 12. P. 10250–10265. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3239301>.
11. Maurya P., Hazra A., Kumari P., Sørensen T. B., Das S. K. A comprehensive survey of data-driven solutions for lorawan: Challenges and future directions. *ACM Transactions on Internet of Things*. 2025. Vol. 6, № 1. P. 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1145/3711953>.
12. Wu Y., Atse C. B., Tan P., Wang X., Yi H., Xu Z., Mapiirat P. Dynamic Scheduling and Adaptive Power Control for LoRaWAN-Based Waste Management: An Energy-Efficient IoT Framework. *Sensors*. 2026. Vol. 26, № 3. Article 844. DOI: <https://doi.org/10.3390/s26030844>.
13. Heeger D., Garigan M., Tsiropoulou E. E., Plusquellic J. Secure energy constrained LoRa mesh network. In: *13th International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*. Vol. 12338. Springer, Cham. 2020. P. 228–240. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61746-2_17.
14. Samsonov S., Globa L. A Protocol-Focused Overview for Constrained IoT. In: *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Vol. 1473. Springer, Cham. 2024. P. 189–216. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_9.
15. Obiri N. M., Van Laerhoven K. A survey of LoRaWAN-integrated wearable sensor networks for human activity recognition: Applications, challenges and possible solutions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024. Vol. 5, № 1. P. 6713–6735. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3484002>.

References

1. Narieda, S., Fujii, T., & Umebayashi, K. (2020). Energy constrained optimization for spreading factor allocation in lorawan. *Sensors*, 20(16), 4417. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20164417>.
2. Wu, Y., He, Y., & Shi, L. (2020). Energy-saving measurement in LoRaWAN-based wireless sensor networks by using compressed sensing. *IEEE Access*, 8(1), 49477–49486. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974879>.
3. Gava, M. A., Rocha, H. R. O., Faber, M. J., Segatto, M. E. V., Wörtche, H., & Silva, J. A. L. (2023). Optimizing resources and increasing the coverage of Internet-of-Things (IoT) networks: An approach based on LoRaWAN. *Sensors*, 23(3), Article 1239. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23031239>.
4. Loubany, A., Lahoud, S., Samhat, A. E., & El Helou, M. (2023). Improving energy efficiency in LoRaWAN networks with multiple gateways. *Sensors*, 23(11), Article 5315. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23115315>.
5. Heeger, D., Garigan, M., & Plusquellic, J. (2020). Adaptive data rate techniques for energy constrained Ad Hoc LoRa networks. In *2020 Global Internet of Things Summit (GloTS)* (pp. 1–6). Retrieved from https://ece-research.unm.edu/jimp/pubs/GIoT2020_FINAL.pdf.
6. Kufakunesu, R., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2020). A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges. *Sensors*, 20(18), Article 5044. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20185044>.
7. Milarokostas, C., Tsolkas, D., Passas, N., & Merakos, L. (2022). A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(1), 825–867. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3229846>.
8. Emará, M., Kouzayha, N., ElSawy, H., & Al-Naffouri, T. Y. (2024). Rate adaptation in delay-sensitive and energy-constrained large-scale IoT networks. *IEEE Transactions on Communications*, 73(3), 1895–1908. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2024.3453399>.

9. Alkhayyal, M., & Mostafa, A. M. (2025). Enhancing LoRaWAN Sensor Networks: A Deep Learning Approach for Performance Optimizing and Energy Efficiency. *Computers, Materials & Continua*, 83(1). DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.061836>.
10. Chen, M., Mokdad, L., Ben-Othman, J., & Fourneau, J. M. (2023). Dynamic parameter allocation with reinforcement learning for LoRaWAN. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(12), 10250–10265. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3239301>.
11. Maurya, P., Hazra, A., Kumari, P., Sørensen, T. B., & Das, S. K. (2025). A comprehensive survey of data-driven solutions for lorawan: Challenges and future directions. *ACM Transactions on Internet of Things*, 6(1), 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1145/3711953>.
12. Wu, Y., Atse, C. B., Tan, P., Wang, X., Yi, H., Xu, Z., & Mpirat, P. (2026). Dynamic Scheduling and Adaptive Power Control for LoRaWAN-Based Waste Management: An Energy-Efficient IoT Framework. *Sensors*, 26(3), 844. DOI: <https://doi.org/10.3390/s26030844>.
13. Heeger, D., Garigan, M., Tsiropoulou, E. E., & Plusquellic, J. (2020). Secure energy constrained LoRa mesh network. In *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless* (Vol. 12338, pp. 228–240). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61746-2_17.
14. Samsonov, S., & Globa, L. (2024). A Protocol-Focused Overview for Constrained IoT. In *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering* (Vol. 1473, pp. 189–216). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_9.
15. Obiri, N. M., & Van Laerhoven, K. (2024). A survey of LoRaWAN-integrated wearable sensor networks for human activity recognition: Applications, challenges and possible solutions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5(1), 6713–6735. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3484002>.

Історія статті:

Отримано: 10.02.2026 Доопрацьовано: 05.03.2026 Прийнято до друку: 23.03.2026 Опубліковано: 29.03.2026