РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) призвів до масового впровадження бездротових пристроїв, що функціонують у складі мереж класу LPWAN (Low-Power Wide Area Networks). Одним із найпоширеніших рішень є технологія LoRa, яка забезпечує передавання даних на великі відстані за низького енергоспоживання. Ефективність функціонування таких систем напряму залежить від параметрів передавання даних, а саме: коефіцієнта розширення спектра (SF), потужності сигналу (TxPower) та частоти виходу в ефір. У реальних умовах експлуатації стан радіоканалу та навантаження мережі можуть швидко змінюватися, що породжує конфлікт між надійністю передачі даних та енергоефективністю системи. Стандартний механізм адаптації Adaptive Data Rate (ADR), який реалізований в протоколі LoRaWAN є прикладом спроби вирішити дану проблему. Однак через відсутність урахування комплексного стану мережі та загальну інертність він лише частково вирішує проблему. Це створює передумови для розроблення методу контекстно-залежної адаптації, який забезпечує одночасне врахування рівня сигналу, надійності доставки та стабільності каналу.

Мета роботи. Підвищення надійності передавання даних з урахуванням енергоефективності функціонування low-power IoT систем шляхом розроблення методу адаптивного керування параметрами радіопротоколу на основі багатокритеріальної оцінки якості зв'язку.

Об'єкт дослідження. Процес обміну даними між вузлами low-power IoT мережі в умовах змінного стану радіоканалу.

Предмет дослідження. Контекстно-залежні методи адаптації параметрів радіопротоколу на основі функції оцінки якості зв'язку Q(t).

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного та порівняльного аналізу для узагальнення сучасних підходів адаптації параметрів LoRa-мереж. Для формалізації багатокритеріальної функції оцінки якості зв'язку Q(t) застосовано методи математичного моделювання. Реалізацію запропонованого методу на платформі STM32WL55 виконано з використанням

модульного програмування мовою С та підходів проєктування вбудованих систем. Ефективність розроблених алгоритмів оцінено за допомогою натурних експериментів і обробки результатів за критеріями PDR та енергоефективності.

Наукова новизна. У результаті виконання роботи отримано такі наукові результати. Удосконалено метод адаптації параметрів передавання у LoRa-системах. На відміну від стандартного механізму ADR, розроблений алгоритм базується на багатокритеріальній функції оцінки якості зв'язку Q(t), що враховує одночасно рівень сигналу (RSSI, SNR), надійність доставки (PDR) та стабільність якості каналу (дисперсію SNR за вікно спостереження) з ваговими коефіцієнтами, що дозволяє ефективніше реагувати на зміну стану радіоканалу та навантаження мережі. Дістала подальшого розвитку концепція контекстно-залежної адаптації параметрів радіопротоколу, яка, на відміну від відомих рішень, забезпечує одночасну узгоджену зміну SF і TxPower на основі інтегрованої оцінки стану мережі, що скорочує кількість повторних передач і зменшує енергоспоживання вузлів за умов динамічного радіосередовища.

Практична цінність. Отримані результати мають практичну цінність завдяки можливості застосування розробленого методу при проєктуванні енергообмежених IoT-систем на базі технології LoRa. Реалізований на платформі STM32WL55 програмно-апаратний прототип методу демонструє підвищення надійності передавання даних та зниження енергоспоживання у порівнянні зі стандартним механізмом ADR за умов динамічного радіосередовища. Запропонований підхід може бути впроваджений у системах віддаленого моніторингу довкілля, промислового IoT та масштабованих сенсорних мережах, де критичним є балансування між надійністю зв'язку та строком автономної роботи пристроїв.

Особистий внесок магістранта. Усі основні наукові та практичні результати дисертації одержані автором особисто. У спільних публікаціях здобувач брав участь в аналізі сучасних методів адаптації параметрів LoRa-мережі. Також він узагальнив обмеження існуючих підходів і сформулював концепцію контекстно-залежної адаптації параметрів передавання, яка базується

на комплексній оцінці стану радіоканалу. У межах магістерської дисертації автор самостійно розробив формалізацію багатокритеріальної функції оцінки якості зв'язку Q(t) та на її основі запропонував алгоритм Q-ADR. Крім того, автор спроєктував і реалізував програмно-апаратну архітектуру цього методу на платформі STM32WL55 та провів експериментальне дослідження ефективності запропонованого методу з порівнянням із фіксованими параметрами та стандартним ADR. Науковий керівник здійснював постановку задачі, загальне керівництво дослідженням і надавав консультативну допомогу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи були представлені та обговорювались на XVIII науковій конференції магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг – ПМК'2025» (м. Київ, 19–21 листопада 2025 р.).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано дві наукові праці: одну статтю у фаховому науковому виданні категорії «Б» («Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво», 2026, № 62, с. 311–320) та одні тези доповіді на XVIII науковій конференції магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг – ПМК'2025» (м. Київ, 2025, с. 334–339).

Структура та обсяг роботи. Магістерська дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу та загальних висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків.

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність обраного напряму досліджень, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів адаптивного керування параметрами LoRa-мереж, розглянуто стандартний механізм ADR та його обмеження, проаналізовано підходи з динамічним керуванням потужністю передавання, методи на основі машинного навчання та контекстно-залежної адаптації, визначено напрям удосконалення.

У другому розділі обґрунтовано вибір метрик якості каналу зв'язку, сформульовано багатокритеріальну функцію оцінки стану зв'язку Q(t), розроблено модель контекстно-залежної адаптації параметрів передавання, визначено методику експериментального дослідження.

У третьому розділі описано програмно-апаратну реалізацію запропонованого методу на платформі STM32WL55 з використанням трьох вузлів (Master, Slave, Interferer), наведено архітектуру протоколу обміну та реалізацію трьох варіантів алгоритмів керування – фіксовані параметри (Fixed), стандартний ADR і запропонований Q-ADR.

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження ефективності запропонованого методу за критеріями PDR та енергоефективності у різних сценаріях радіоумов, представлено порівняльний аналіз з існуючими рішеннями.

У висновках підсумовано результати проведеної роботи.

Робота викладена на 97 сторінках, містить 13 рисунків, 8 таблиць, посилання на список використаних джерел із 20 найменувань.

Ключові слова: LoRa, LPWAN, IoT, адаптивне керування, Adaptive Data Rate, контекстно-залежна адаптація, багатокритеріальна оптимізація, енергоефективність, надійність зв'язку, STM32WL55.

ABSTRACT

Topic relevance. The rapid development of Internet of Things (IoT) technologies has led to mass deployment of wireless devices operating within Low-Power Wide Area Networks (LPWAN). One of the most widespread solutions is LoRa technology, which enables long-range data transmission at low energy consumption. The performance of such systems directly depends on transmission parameters, namely the spreading factor (SF), the transmitter power (TxPower), and the transmission frequency. Under real-world operating conditions the state of the radio channel and network load may change rapidly, which gives rise to a conflict between transmission reliability and energy efficiency. The standard Adaptive Data Rate (ADR) mechanism implemented in the LoRaWAN protocol is one example of an attempt to resolve this issue. However, due to the lack of awareness of the comprehensive network state and its general inertia, it solves the problem only partially. This creates the prerequisites for the development of a context-aware adaptation method that simultaneously takes into account signal level, delivery reliability and channel stability.

Aim of the work. Improving data transmission reliability while taking into account the energy efficiency of low-power IoT systems through the development of a method for adaptive control of radio protocol parameters based on a multi-criteria assessment of link quality.

Object of research. The process of data exchange between nodes of a low-power IoT network under variable radio channel conditions.

Subject of research. Context-aware methods for adaptation of radio protocol parameters based on the link quality assessment function Q(t).

Research methods. The work applies methods of systems and comparative analysis to summarise current approaches to parameter adaptation in LoRa networks. Mathematical modelling methods are applied for the formalisation of the multi-criteria link quality assessment function Q(t). The implementation of the proposed method on the STM32WL55 platform is carried out using modular programming in the C language and embedded systems design techniques. The effectiveness of the developed

algorithms is evaluated through field experiments and processing of results against the criteria of PDR and energy efficiency.

Scientific novelty. The following scientific results have been obtained in the work. The method of transmission parameter adaptation in LoRa systems has been improved. Unlike the standard ADR mechanism, the developed algorithm is based on a multi-criteria link quality assessment function Q(t), which simultaneously takes into account signal level (RSSI, SNR), delivery reliability (PDR) and channel quality stability (SNR variance over observation window) with weighting coefficients, allowing more effective response to changes in the radio channel state and network load. The concept of context-aware adaptation of radio protocol parameters has received further development which, unlike known solutions, provides a coordinated simultaneous adjustment of SF and TxPower based on an integrated assessment of the network state, which reduces the number of retransmissions and decreases node energy consumption under dynamic radio environment conditions.

Practical value. The obtained results have practical value owing to the possibility of applying the developed method in the design of energy-constrained IoT systems based on LoRa technology. The hardware-software prototype of the method implemented on the STM32WL55 platform demonstrates improved data transmission reliability and reduced energy consumption compared to the standard ADR mechanism under dynamic radio environment conditions. The proposed approach can be applied in remote environmental monitoring systems, industrial IoT and scalable sensor networks where balancing link reliability against device autonomy is critical.

Personal contribution of the master's student. All major scientific and practical results of the dissertation were obtained by the author personally. In the joint publications, the author participated in the analysis of current methods for parameter adaptation in LoRa networks. The author also generalised the limitations of existing approaches and formulated the concept of context-aware adaptation of transmission parameters based on a comprehensive assessment of the radio channel state. Within the master's dissertation, the author personally developed the formalisation of the multi-criteria link quality assessment function Q(t) and, on its basis, proposed the Q-ADR

algorithm. In addition, the author designed and implemented the hardware-software architecture of this method on the STM32WL55 platform and conducted experimental research on the effectiveness of the proposed method, comparing it against fixed parameters and the standard ADR. The supervisor performed the problem statement, provided overall research guidance and consultative assistance.

Approbation of the dissertation results. The main provisions and results of the work were presented and discussed at the 18th Scientific Conference of Master's and PhD Students "Applied Mathematics and Computing – AMC'2025" (Kyiv, 19–21 November 2025).

Publications. Two scientific works have been published on the basis of the research results: one paper in a professional scientific journal of category "B" ("Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production", 2026, No. 62, pp. 311–320) and one set of conference theses at the 18th Scientific Conference of Master's and PhD Students "Applied Mathematics and Computing – AMC'2025" (Kyiv, 2025, pp. 334–339).

Structure and scope of the work. The master's dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions to each chapter and general conclusions to the work, a list of references and appendices.

The introduction provides a general description of the work, substantiates the relevance of the chosen research direction, formulates the aim and tasks, defines the object and subject of research, and reflects the scientific novelty and practical value of the obtained results.

The first chapter analyses approaches to adaptive control of data transmission parameters in LoRa networks, examines the standard ADR mechanism and its limitations, reviews approaches with dynamic transmission power control, methods based on machine learning and context-aware adaptation, and identifies the direction for improvement.

The second chapter substantiates the choice of channel quality metrics, formulates the multi-criteria link quality assessment function Q(t), develops a model

of context-aware adaptation of transmission parameters and defines the methodology of the experimental study.

The third chapter describes the hardware-software implementation of the proposed method on the STM32WL55 platform with the use of three nodes (Master, Slave, Interferer), presents the architecture of the exchange protocol and the implementation of the three control algorithm variants – fixed parameters (Fixed), the standard ADR and the proposed Q-ADR.

The fourth chapter presents the results of the experimental study of the effectiveness of the proposed method against the criteria of PDR and energy efficiency under different radio condition scenarios, with a comparative analysis against existing solutions.

The conclusions summarise the results of the conducted work.

The work is presented on 97 pages, contains 13 figures, 8 tables and references to a list of 20 sources.

Keywords: LoRa, LPWAN, IoT, adaptive control, Adaptive Data Rate, context-aware adaptation, multi-criteria optimisation, energy efficiency, link reliability, STM32WL55.