

Научная статья

УДК 004.896

DOI: <https://doi.org/10.18127/j19997493-202502-06>

# Поиск оптимальной конфигурации радиоресурсов линии вверх для снижения энергопотребления UE NB-IoT при передаче данных

С.Г. Мосин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)

<sup>1</sup> ООО «ЛабСистемс» (г. Владимир, Россия)

<sup>1</sup> smosin@ieee.org

## Аннотация

**Постановка проблемы.** К длительности автономной работы пользовательского оборудования узкополосного Интернета вещей (UE NB-IoT – User Equipment for Narrowband Internet-of-Things) предъявляют высокие требования – до 10 лет при использовании аккумуляторной батареи емкостью 5 А·ч. Стандарт предусматривает перевод UE NB-IoT в режимы пониженного энергопотребления – расширенный прерывистый прием (eDRX – Extended Discontinuous Reception) и энергосбережения (PSM – Power Saving Mode). Однако наибольшее потребление энергии приходится на передачу данных, в ходе которой обеспечивается требуемое качество обслуживания (QoS – Quality of Service) за счет механизмов многократного повторения передачи ресурсных единиц и перехода на менее эффективные схемы модуляции и кодирования. Разные конфигурации радиоресурсов линии вверх (UL – Uplink), используемые для передачи данных фиксированной длины от UE NB-IoT к базовой станции (eNB), могут приводить к потреблению приемопередатчиком разного объема энергии от аккумулятора. Поиск конфигурации радиоресурсов, обеспечивающей минимальное энергопотребление приемопередатчика (TRX – Transmitter) при передаче данных от UE NB-IoT к eNB с требуемым качеством – оптимальное планирование, является актуальной задачей развития мобильного IoT.

**Цель.** Разработать и исследовать модель поиска оптимальной конфигурации радиоресурсов, обеспечивающую снижение энергопотребления TRX при передаче данных по UL.

**Результаты.** Предложена модель оценки энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT при передаче данных по UL. Определен набор параметров, влияющий на величину энергопотребления. Сформулирована задача поиска конфигурации радиоресурсов, обеспечивающей снижение энергопотребления TRX при передаче данных по UL в виде оптимизационной задачи и предложен метод ее решения с учетом особенностей канала связи NB-IoT и процедур взаимодействия пользовательского оборудования с eNB. Проведено комплексное экспериментальное исследование, включающее верификацию предложенной модели, оценку сходимости предложенного метода решения и границ его применимости, одновариантный и многовариантный анализ энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT при оптимальном планировании радиоресурсов для передачи данных по UL и оценку эффективности предложенного решения. В результате численного моделирования продемонстрировано снижение до 50% минимального энергопотребления при использовании оптимальной конфигурации радиоресурсов по сравнению с ближайшим следующим вариантом. Определено направление дальнейших исследований, ориентированных на развитие предложенного решения для случая одновременного взаимодействия с eNB многих пользователей.

**Практическая значимость.** Предложенная математическая модель и ее программная реализация представляют интерес для использования на ранних стадиях автоматизированного проектирования сетей Интернета вещей по технологии NB-IoT для выбора оптимальных конфигураций радиоресурсов с целью повышения срока автономной работы пользовательского оборудования без снижения качества обслуживания.

## Ключевые слова

Узкополосный Интернет вещей, снижение энергопотребления, оптимальное планирование, радиоресурсы, математическая модель

## Для цитирования

Мосин С.Г. Поиск оптимальной конфигурации радиоресурсов линии вверх для снижения энергопотребления UE NB-IoT при передаче данных // Динамика сложных систем. 2025. Т. 19. № 2. С. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.18127/j19997493-202502-06>

A brief version in English is given at the end of the article

## Введение

Развитие систем беспроводной связи ориентировано на расширение спектра предоставляемых услуг от классической голосовой связи и интернет-сервисов до Интернета вещей (IoT – Internet of Things) и межмашинной связи (M2M – Machine-to-Machine) [1, 2]. Спецификация систем связи пятого поколения определяет три ключевых сценария развертывания: сверхширокополосная мобильная связь (eMBB –

enhanced Mobile Broadband), сверхнадежная связь с низкими задержками (URLLC – Ultra-Reliable Low Latency Communication) и массовая межмашинная связь (mMTC – Massive Machine-Type Communications) [3–7]. mMTC ориентирована на использование маломощных LPWA-устройств (Low Power Wide Area), т.е. массовых, простых устройств с низким энергопотреблением, обеспечивающим работоспособность от одной аккумуляторной батареи до 10 лет, и низкой стоимостью. Для приложений M2M отсутствуют требования к высокой скорости передачи информации и сверхнизким задержкам, но важны автономность и большое число подключений в сети – тысячи и десятки тысяч устройств.

Один из перспективных стандартов межмашинной связи – узкополосный Интернет вещей (NB-IoT – Narrowband Internet of Things), использующий лицензированный диапазон частот и отличающийся простотой развертывания сети IoT с использованием существующей сетевой инфраструктуры LTE (Long Term Evolution) с минимальными затратами. Автономность эксплуатации NB-IoT устройств предполагает их однократное размещение согласно топологии сети с последующим исключительно дистанционным взаимодействием. Основные факторы, влияющие на энергопотребление автономного NB-IoT устройства: режим и периодичность работы приемопередатчика (TRX – Transmitter); объем передаваемой информации; удаленность от базовой станции и качество радиосвязи; число обслуживаемых в сети устройств и, как следствие, конкуренция за выделение радиоресурсов и др. Для обеспечения требуемого качества обслуживания (QoS – Quality of Service) в NB-IoT заложен механизм многократной передачи сигналов, который приводит к дополнительному расходу энергии и снижению эффективности использования радиоресурсов многими абонентами.

Проектирование IoT-сетей сопряжено с решением классических задач, свойственных разработке беспроводных систем связи и сенсорных сетей: моделирование радиоканала и оценка его надежности [8–10], синтез и анализ структуры и топологии сети [11–13], структурный и параметрический синтез элементов сети [14–16], в том числе с выходом на реализацию в интегральном исполнении с обеспечением требуемого качества [17,18]. Проектирование IoT-сетей дополнительно предусматривает анализ энергопотребления [19–22] и прогнозирование срока автономной работы пользовательского оборудования от аккумуляторной батареи [23–25]. Рациональное использование радиоресурсов может приводить к снижению энергопотребления TRX при передаче данных по UL, тем самым продлевая срок автономной работы пользовательского оборудования.

Ц е л ь р а б о т ы – разработать и исследовать модель поиска оптимальной конфигурации радиоресурсов, обеспечивающую снижение энергопотребления TRX при передаче данных по UL.

### Системные особенности сети NB-IoT

В общем случае IoT-сеть на основе технологии NB-IoT является централизованной, реализуемой по топологии «звезда», где центральный элемент – базовая станция (eNodeB, eNB), с которой взаимодействует статически расположенное пользовательское оборудование (UE NB-IoT – User Equipment). Поведение UE NB-IoT можно описать с помощью трех типов состояний:

1. Управление мобильностью развитых систем пакетной передачи (EMM – Evolved Packet Systems (EPS) Mobility Management) – часть функционального уровня слоя без доступа (NAS – Non-Access Stratum). EMM включает в себя процедуры, связанные с мобильностью через доступ E-UTRAN, аутентификацию и безопасность.

2. Управление соединением EPS (ECM – EPS Connection Management) определяет состояние

NAS-соединения между UE и MME, которое состоит из соединения RRC (Radio Resource Control) через радиоинтерфейс и соединения сигнализации S1 через интерфейс S1-MME.

3. RRC указывает, имеет ли UE NB-IoT активное RRC-соединение с eNB. Переходы между состояниями RRC определяются сообщениями протокола RRC (рис. 1).

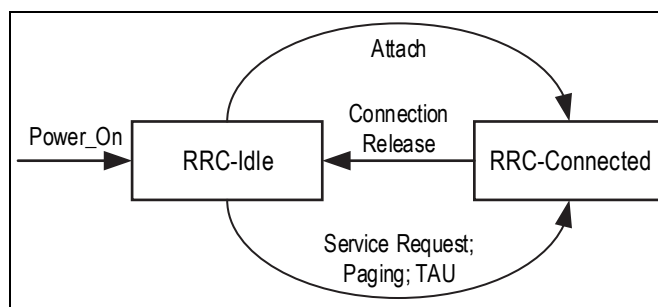


Рис. 1. Схема переходов между RRC-состояниями для UE NB-IoT

Fig. 1. RRC-state transition diagram for UE NB-IoT

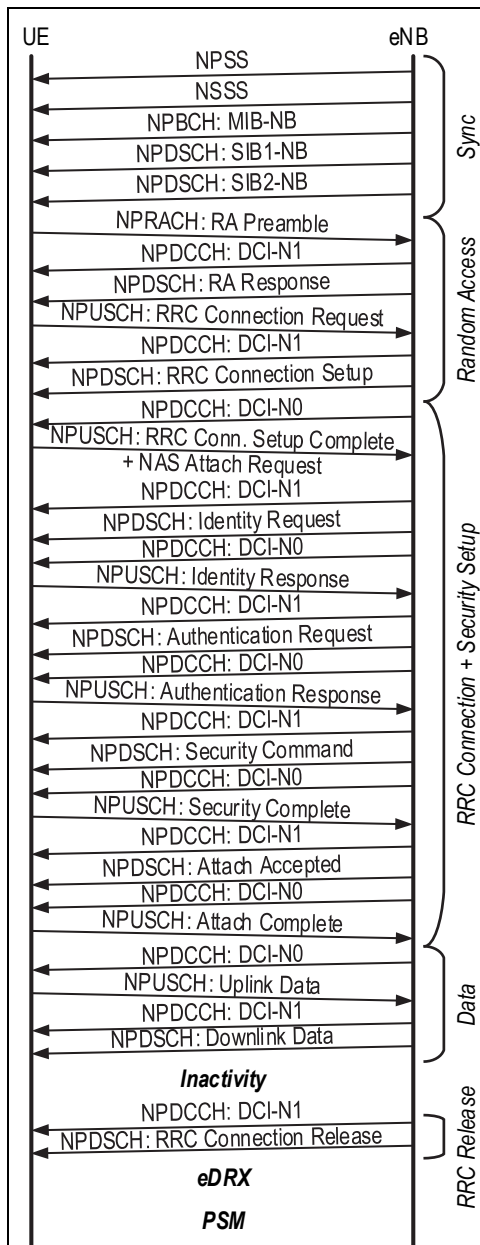


Рис. 2. Диаграмма взаимодействия для процедуры Attach

Fig. 2. Interaction diagram for the Attach procedure

Таблица 1. Характеристики ресурсной единицы

| Интервал поднесущих, кГц | Число поднесущих | Число слотов | Длительность RU, мс |
|--------------------------|------------------|--------------|---------------------|
| 15                       | 1                | 16           | 8                   |
|                          | 3                | 8            | 4                   |
|                          | 6                | 4            | 2                   |
|                          | 12               | 2            | 1                   |
| 3,75                     | 1                | 16           | 32                  |

четыре типа RU: однотональный (1-тональный) или многотональные (3-, 6- и 12-тональный). Для ScS 3,75 кГц (опциональный [27]) используют только 1-тональный тип RU. Каждый тип RU имеет определенное число поднесущих и временных слотов, как показано на рис. 3 для ScS 15кГц.

Взаимодействие UE NB-IoT с eNB носит событийный характер и включает несколько стадий: синхронизация (Sync), произвольный доступ (Random Access), установление RRC-соединения и аутентификация (RRC Connection + Security Setup), передача данных (Data), освобождение RRC-соединения (RRC Release), расширенный прерывистый прием (eDRX – Extended Discontinuous Reception) и режим энергосбережения (PSM – Power Saving Mode). Диаграмма взаимодействия для процедуры Attach представлена на рис. 2.

В ходе обмена сообщениями приемопередатчик UE NB-IoT функционирует в четырех базовых режимах: 1) передачи (Tx); 2) приема (Rx); 3) пониженного энергопотребления (Idle); 4) энергосбережения (PSM).

В [26] предложена модель оценки энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT ( $E$ ), обеспечивающая поддержку многовариантного анализа срока службы аккумулятора для различных условий работы, профилей трафика и сценариев сетевого взаимодействия:

$$E = P_{Rx}t_{Rx} + P_{Tx}t_{Tx} + P_{Idle}t_{Idle} + P_{PSM}t_{PSM}, \quad (1)$$

где  $P_{Rx}$ ,  $P_{Tx}$ ,  $P_{Idle}$  и  $P_{PSM}$  – значения мощности приемопередатчика UE NB-IoT при работе в режимах Tx, Rx, Idle и PSM;  $t_{Rx}$ ,  $t_{Tx}$ ,  $t_{Idle}$  и  $t_{PSM}$  – время работы в соответствующих режимах, причем

$$P_{Tx} \gg P_{Rx} \gg P_{Idle} \gg P_{PSM}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что сокращение времени передачи и приема сообщений непосредственно влияет на снижение  $E$ , при этом важно обеспечивать обмен информацией согласно требуемому качеству обслуживания (QoS – Quality of Service).

Для передачи данных по восходящей линии связи предназначен узкополосный общий канал восходящей линии связи (NPUSCH – Narrowband Uplink Shared Channel). Передача осуществляется ресурсными единицами (RU – Resource Unit), выделяемыми в радиокадрах в полосе пропускания 180 кГц. Один радиокадр обладает длительностью 10 мс. Для случая интервала поднесущих 15 кГц радиокадр представлен десятью подкадрами, включающими 2 слота длительностью 0,5 мс. Передачи данных осуществляется одной или несколькими RU в зависимости от объема информации и выбранной схемы модуляции и кодирования (MCS – Modulation and Coding Scheme). В общем случае поддерживается несколько типов RU, которые зависят от числа используемых поднесущих (табл. 1).

Для интервала поднесущих 15 кГц (ScS – Subcarrier Spacing), который является обязательным согласно стандарту [27], существует

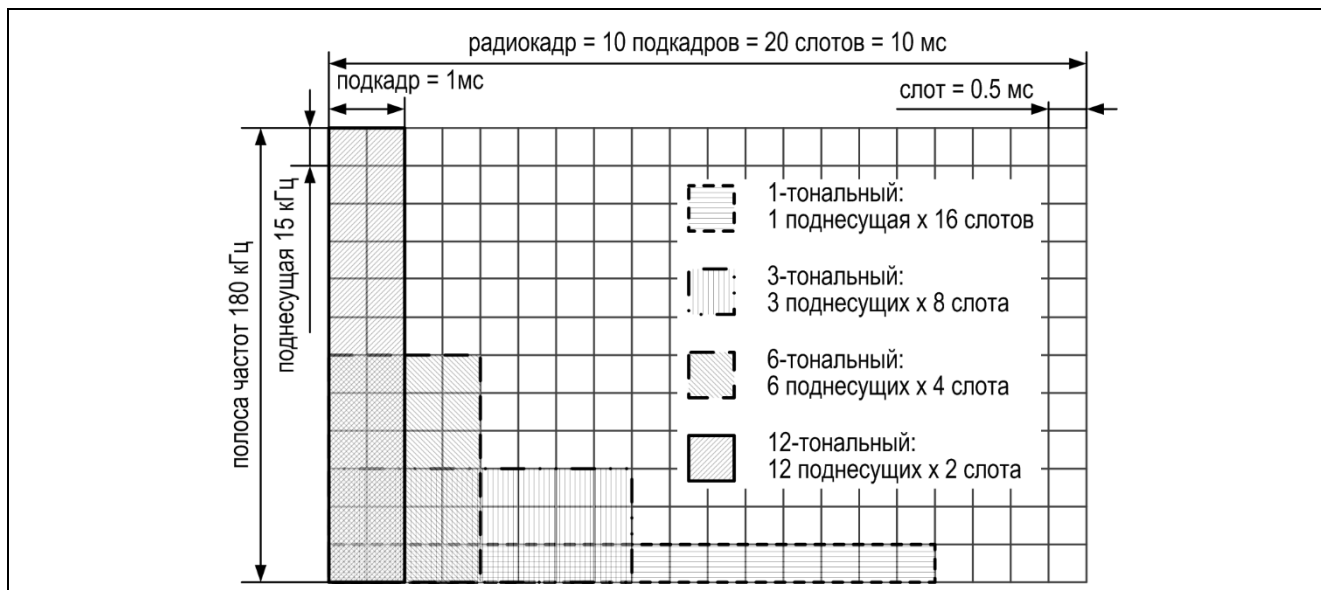


Рис. 3. Расположение разных типов RU в радиокадре для ScS = 15 кГц

Fig. 3. Layout for different types of RU in a radio frame for ScS = 15 kHz

Для обеспечения требуемой надежности передачи данных, особенно при ухудшении качества радиоканала, используют последовательную многократную передачу RU, что требует использование дополнительных радиоресурсов и влияет на увеличение энергопотребления приемопередатчика. Число повторений в восходящей линии (UL – Uplink) может принимать восемь значений:

$$N_{\text{Rep}}^{\text{UL}} = 2^k, \quad k \in 0 \dots 7.$$

Выделение радиоресурсов для UL выполняет eNB и уведомляет UE NB-IoT в управляющем сообщении DCI, которое передается по узкополосному физическому каналу управления нисходящей линии связи (NPDCCH – Narrowband Physical Downlink Control Channel). Длительность сообщения DCI составляет 1 мс. После выделения требуемых радиоресурсов eNB в одном сообщении DCI информирует UE NB-IoT о типе RU, используемом подмножестве поднесущих, числе повторений и времени начала передачи данных по UL [28] (табл. 2).

Таблица 2. Основные параметры выделяемых радиоресурсов в DCI

| Параметр                                           | Значение                         |                                                     |              |
|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|
| Индекс поднесущей ( $I_{sc}$ )                     | 0–11                             | $I_{sc}$                                            | 1-тональный  |
|                                                    | 12–15                            | $3(I_{sc} - 12) + 0, 1, 2$                          | 3-тональный  |
|                                                    | 16–17                            | $6(I_{sc} - 16) + 0, 1, 2, 3, 4, 5$                 | 6-тональный  |
|                                                    | 18                               | $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$          | 12-тональный |
|                                                    | 19–63                            | зарезервировано                                     |              |
| Индекс числа RU ( $I_{RU}$ )                       | 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7           | $N_{RU} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10$                  |              |
| Индекс схемы модуляции и кодирования ( $I_{MCS}$ ) | 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 | $I_{TBS} = 0, 2, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$        |              |
| Индекс числа повторений ( $I_{Rep}^{\text{UL}}$ )  | 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7           | $N_{Rep}^{\text{UL}} = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$ |              |

Фактический размер транспортного блока для NPUSCH зависит от числа используемых RU для передачи данных и индекса транспортного блока ( $I_{TBS}$ ).

При разработке IoT-сети известны число подключенных абонентов, характер и периодичность информационного обмена между каждым из них и eNB, объем передаваемой информации, тип и характеристики используемых приемопередатчиков, которые можно использовать в качестве входных параметров.

ров модели проектируемой сети. В ходе моделирования на ранних этапах проектирования возможно осуществить поиск рациональных конфигураций радиоресурсов для каждого абонента, которые позволят минимизировать энергопотребление приемопередатчика UE NB-IoT при передаче данных.

### Оптимальная конфигурация радиоресурсов

Гарантированная доставка пакета данных длиной  $d$  бит от абонента к базовой станции в условиях возможного изменения качества радиоканала, которое может привести к появлению битовых и блоковых ошибок, – обязательное требование при организации взаимодействия UE NB-IoT и eNB в рамках IoT-сети.

Представим модель оценки энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT при передаче данных по UL:

$$E_{Tx}(d) = \begin{cases} P_{Tx} N_{RU} \frac{N_s}{2} N_{Rep}^{UL}, & \text{если } ScS = 15 \text{ кГц}, \\ P_{Tx} N_{RU} 2N_s N_{Rep}^{UL}, & \text{если } ScS = 3,75 \text{ кГц}, \end{cases} \quad N_{RU} = \begin{cases} \left\lceil \frac{d}{V(I_{MCS})} \right\rceil \cdot 16, & \text{если } 0 \leq I_{sc} \leq 11, \\ \left\lceil \frac{d}{V(I_{MCS})} \right\rceil \cdot 24, & \text{если } 12 \leq I_{sc} \leq 18, \end{cases} \quad (3)$$

где  $N_s$  – число слотов, используемых в RU, при  $ScS = 3,75$  кГц один слот длится 2 мс, а при  $ScS = 15$  кГц – 0,5 мс;  $V(I_{MCS})$  – скорость передачи данных при заданной схеме MCS, представленная числом битов на поднесущую в слоте;  $N_{Rep}^{UL}$  – число последовательных повторений RU для обеспечения требуемой надежности передачи пакета данных, представленной минимальным пороговым значением  $Rel_{Th}$ .

Выразим вероятность успешной передачи транспортного блока длиной  $d_{TB}$  бит без повторений RU:

$$P_p = (1 - BER)^{d_{TB}},$$

а также вероятность успешной передачи транспортного блока длиной  $d_{TB}$  бит при  $N_{Rep}^{UL}$  повторениях RU:

$$P_{pr} = 1 - (1 - P_p)^{N_{Rep}^{UL}}.$$

Задача поиска конфигурации радиоресурсов, обеспечивающей снижение энергопотребления приемопередатчиком при передаче данных по UL, – оптимизационная задача вида

$$E_{Tx}(d) \rightarrow \min_{I_{sc}, I_{RU}, I_{MCS}, I_{Rep}^{UL}}, \quad \text{s.t. } P_{pr} \geq Rel_{Th}. \quad (4)$$

Для решения (4) предложено:

1) сформировать подмножества потенциальных кандидатов для передаваемых данных длиной  $d$  бит

$$\mathbf{S} = \{I_{SC}^i, I_{RU}^j, I_{MCS}^k\},$$

где  $i, j, k \in \mathbb{N}0$ ,

$$\mathbf{SI}_{Rep}^{UL} = \{I_{Rep}^{UL}(j) \mid P_{pr}(N_{Rep}^{UL}(j)) \geq Rel_{Th}, \quad j \in \{0 \dots 7\}\};$$

2) выбрать оптимальный вариант из множества решений для  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{SI}_{Rep}^{UL}$

$$\{\hat{I}_{SC}, \hat{I}_{RU}, \hat{I}_{MCS}, \hat{I}_{Rep}^{UL}\} = \arg \min_{\substack{\{I_{SC}^k, I_{RU}^k, I_{MCS}^k\} \in \mathbf{S}; \\ \{I_{Rep}^{UL}(m)\} \in \mathbf{SI}_{Rep}^{UL}}} \begin{cases} P_{Tx} N_{RU}^k \frac{N_s^k}{2} N_{Rep}^{UL}(m), & \text{если } ScS = 15 \text{ кГц}, \\ P_{Tx} N_{RU}^k \cdot 2N_s^k N_{Rep}^{UL}(m), & \text{если } ScS = 3,75 \text{ кГц}, \end{cases}$$

где  $k = \mathbf{S}$ ,  $m = \mathbf{SI}_{Rep}^{UL}$ .

Полученный кортеж  $\{\hat{I}_{SC}, \hat{I}_{RU}, \hat{I}_{MCS}, \hat{I}_{Rep}^{UL}\}$  представляет оптимальный вариант конфигурации радиоресурсов UL для передачи данных длиной  $d$  бит с требуемой надежностью и с учетом текущего состояния радиоканала. Соответствующие индексы eNB должна включить в сообщение DCI и переслать UE NB-IoT перед началом информационного обмена.

### Экспериментальные исследования

Предложенная задача (4) и метод ее решения реализованы в пакете математических расчетов MATLAB. Цель экспериментов – апробация предложенного решения и получение числовых характеристик в подтверждение теоретических гипотез. План эксперимента предполагает:

- 1) верификацию предложенной модели;
- 2) оценку сходимости предложенного метода решения и границ его применимости;
- 3) одновариантный и многовариантный анализ энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT при оптимальном планировании радиоресурсов для передачи данных по UL;
- 4) оценку эффективности предложенного решения.

Верификация модели проведена в плоскости верификации программного кода и верификации вычислений. В ходе первой части выполнена проверка корректности описания математических выражений, используемых типов данных, условий ветвлений и особых случаев, вызова функций и возврата из них, отсутствие зацикливаний. В ходе второй части на подготовленных тестовых наборах оценена точность выполнения реализуемых функций и расчетов в целом. Полученные результаты продемонстрировали адекватность программной реализации математической модели.

Оценка сходимости показала достижимость результата за конечное время и позволила выявить *два особых случая*.

*Первый случай* – превышение длиной передаваемых данных фактически доступного максимального размера транспортного блока. Случай не критичный, так как предусматривает выделение дополнительного транспортного блока в рамках стандартной процедуры взаимодействия UE NB-IoT и eNB. При использовании дополнительного транспортного блока минимальное энергопотребление для передачи данных будет увеличиваться в соответствующее число раз.

*Второй случай* – невыполнение условия в (4) при заданных значениях  $d$ ,  $BER$  и  $Rel_{Th}$ . Случай критичный, поскольку соответствует невозможности обеспечить требуемое QoS при передаче данных. Возможно оценить верхнюю границу для  $BER$ , когда существует численное решение задачи (4):

$$BER_{Th} = 1 - \left( 1 - (1 - Rel_{Th})^{\frac{1}{N_{Rep}^{UL}}} \right)^{\frac{1}{d}}.$$

Анализ энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT при передаче данных по UL выполнен путем численного решения (4) при изменении одного или нескольких внутренних параметров в пространстве допустимых значений с учетом границ. При одновариантном анализе были рассмотрены зависимости

$$\min [E_{Tx}(BER)] \parallel d, Rel_{Th} \text{ и } P_{Tx} = \text{const}, \quad (5)$$

$$\min [E_{Tx}(d)] \parallel BER, Rel_{Th} \text{ и } P_{Tx} = \text{const}. \quad (6)$$

На рис. 4,а представлены результаты моделирования (5) для  $d = 500$ ,  $Rel_{Th} = 0,995$  и  $P_{Tx} = 545$  мВт для  $BER$ , удовлетворяющего условию  $10^{-6} \leq BER \leq 10^{-3}$ , а на рис. 5,б – результаты моделирования (6) для  $BER = 0,0001$ ,  $Rel_{Th} = 0,995$  и  $P_{Tx} = 545$  мВт для  $d$ , удовлетворяющего условию  $25 \leq d \leq 1000$ . График сплошной линией соответствует оптимальному решению, а график пунктирной линией – ближайшему следующему варианту.

Многовариантный анализ выполнен для

$$\min [E_{Tx}(d, BER)] \parallel Rel_{Th} \text{ и } P_{Tx} = \text{const}, \quad (7)$$

$$\min [E_{Tx}(d, Rel_{Th})] \parallel BER \text{ и } P_{Tx} = \text{const}. \quad (8)$$

На рис. 5,а представлены результаты моделирования (7) для  $Rel_{Th} = 0,995$  и  $P_{Tx} = 545$  мВт для  $d$  и  $BER$ , удовлетворяющих условиям  $25 \leq d \leq 1000$ ,  $10^{-6} \leq BER \leq 10^{-3}$ , а на рис. 5,б – результаты моделирования (8) для  $BER = 10^{-4}$  и  $P_{Tx} = 545$  мВт для  $d$  и  $Rel_{Th}$ , удовлетворяющих условиям  $25 \leq d \leq 1000$ ,  $0,9 \leq Rel_{Th} \leq 0,9995$ . Значению  $d=1000$  на рис. 5,а соответствует самый верхний график.

Анализ полученных результатов позволяет качественно и количественно оценить влияние различных внутренних параметров, отражающих IoT-сети и сценария взаимодействия UE NB-IoT с eNB, на величину  $\min(E_{Tx})$ . Результаты численного моделирования продемонстрировали снижение до 50% минимального энергопотребления при оптимальном планировании радиоресурсов по сравнению с ближайшим следующим вариантом. На увеличение  $\min(E_{Tx})$  влияют: ухудшение качества радиоканала, которое приводит к росту  $BER$ ; увеличение длины передаваемых данных, причем, как видно на рис. 5,а, эта зависимость носит нелинейный характер; повышение требований к качеству обслуживания.

Экспериментальные исследования, выполненные в соответствии с планом, подтвердили адекватность предложенной модели и продемонстрировали ее эффективность.

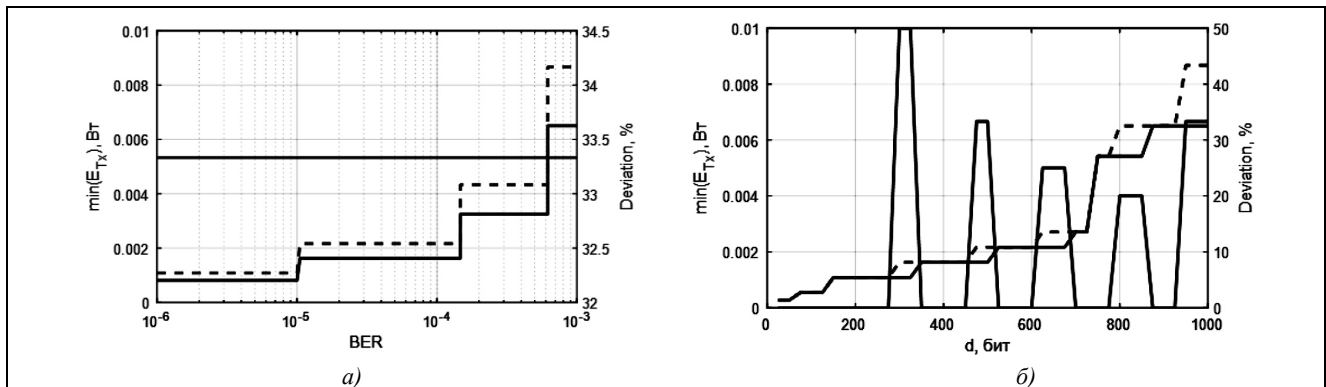


Рис. 4. Графическое представление результатов одновариантного анализа: а –  $\min[E_{Tx}(BER)]$ ; б –  $\min[E_{Tx}(d)]$

Fig. 4. Results of univariate analysis: curve for  $\min[E_{Tx}(BER)]$  (a), curve for  $\min[E_{Tx}(d)]$  (b)

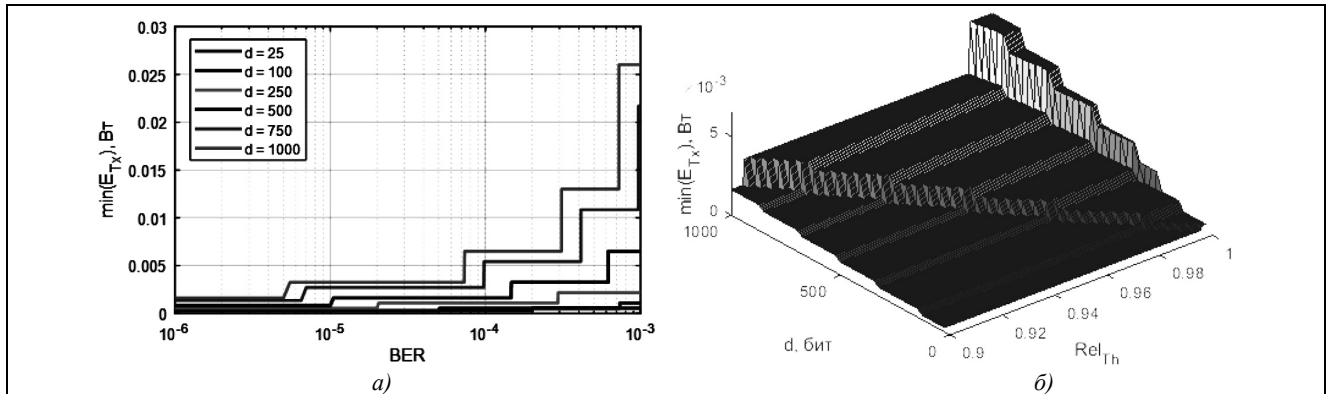


Рис. 5. Графическое представление результатов многовариантного анализа: а – семейство графиков; б – поверхность решений

Fig. 5. Results of multivariate analysis: family of curves (a), surface of solutions (b)

### Заключение

Оптимальное планирование радиоресурсов позволяет снижать энергопотребление приемопередатчика UE NB-IoT, увеличивая срок работы от аккумулятора. Предложена и реализована модель поиска оптимальной конфигурации радиоресурсов UL, обеспечивающей снижение энергопотребления приемопередатчика UE NB-IoT при передаче данных. Численное решение на подмножестве конфигураций продемонстрировали высокую эффективность снижения  $\min(E_{Tx})$  по сравнению с ближайшим альтернативным вариантом – до 50%.

Дальнейшее развитие модели видится в рассмотрении и учете дополнительных ограничивающих условий, например, на время доставки данных до  $eNB$  и тип используемой ресурсной единицы с учетом фактически доступных (свободных) поднесущих при использовании выделяемой полосы частот многими пользователями.

### Список источников

1. Данешманд Б.М. Анализ и оценка эффективности методов обеспечения качества обслуживания программно-конфигурируемых сетей стандарта 5G/IMT-2020 // Russian Technological Journal. 2021. Т. 9. № 5. С. 14–25.
2. Kadatskaya O., Saburova S. Support of resources redistribution in NB-IoT LTE networks // Radiotekhnika. 2024. V. 2. № 217. P. 110–116.
3. Popovski P., Trillingsgaard K.F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 55765–55779.
4. Elgarhy O., Reggiani L., Alam M. M., Zoha A., Ahmad R., Kuusik A. Energy efficiency and latency optimization for IoT URLLC and mMTC use cases // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 23132–23148.
5. Valentini L., Bernardi E., Saggese F., Chiani M., Paolini E., Popovski P. Contention-Based mMTC/URLLC Coexistence Through Coded Random Access and Massive MIMO // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2024. V. 18. № 7. P. 1265–1280.
6. Novanana S., Kliks A., Arifin A.S., Wibisono G. Performance of 5G Slicing With Access Technologies and Diversity: A Review and Challenges // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 170780–170802.
7. Goshi E., Mehmeti F., La Porta T.F., Kellerer W. Modeling and Analysis of mMTC Traffic in 5G Core Networks // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2025. V. 22. № 1. P. 409–425.
8. Крутин Д.В., Кисляков М.А., Мосин С.Г. Методы оценки качества канала связи. Технология WCDMA // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 5. С. 12–15.
9. Кисляков М.А., Мосин С.Г., Савенкова В.С. Проектирование беспроводных сенсорных сетей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 5. С. 15–19.
10. Zhang S., Xue Y., Shi Q., Chang T. Statistical channel modeling methods in wireless network twinning: current status and frontiers // ZTE technology journal. 2023. V. 29. № 3. P. 26–31.
11. Mosin S.G., Efremov I.A. A Wireless System of Data Acquisition // Proc. of IEEE Int. Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON-2010). P. 306–309.
12. Артвел Р.М., Степанов М.С. Разработка функциональной модели сети Интернета вещей на основе технологии Nnarrow Band Internet of Things (NB-IoT) // Телекоммуникации и информационные технологии. 2020. Т. 7. № 2. С. 39–44.
13. Li Y., Zhang S., Ren X., Zhu J. et al. Real-world wireless network modeling and optimization: From model/data-driven perspective // Chinese Journal of Electronics. 2022. V. 31. № 6. P. 991–1012.
14. Ланцов В.Н., Меркутов А.С. Алгоритм расчета квазипериодических процессов в нелинейных радиотехнических устройствах // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 6. С. 12–17.
15. Меркутов А.С. Исследование возможностей повышения эффективности радиосистем УКВ-диапазона с использованием САПР // Динамика сложных систем – XXI век. 2018. Т. 12. № 2. С. 69–74.
16. Бахтин А.А., Тимошенко А.Г., Соколов М.А. Разработка и исследование энергоэффективного усилителя мощности для NB-IoT и LoRaWAN // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. 2019. № 4 (176). С. 27–35.
17. Ланцов В.Н., Мосин С.Г. Современные подходы к проектированию и тестированию интегральных микросхем: Монография. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 2010.
18. Котляров Е.Ю., Путря М.Г., Михайлов В.Ю., Зубов И.А., Васильев Е.С. Разработка прототипа микросхемы малошумящего усилителя для приемного тракта NB-IoT-системы // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 740–752.
19. Abbas M.T., Grinnemo K.-J., Eklund J., Alfredsson S., Raziullah M., Brunstrom A. et al. Energy-saving solutions for cellular Internet of Things—A survey // IEEE Access, vol. 10, pp. 62073–62096, 2022.
20. Manzar S.A., Verma S., Gupta S.H. Analysis and optimization of downlink energy in NB-IoT // Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2022. V. 35. № 9. ID 100757.
21. Al-Sammak K.A., Al-Gburi S.H., Marghescu I. et al. Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart Meters with LoRaWAN and NB-IoT // Energies. 2025. V. 18. № 4. ID 987.
22. Bortnik D., Nikic V., Sobot S., Vukobratovic D., Mezei I., Lukic M. Evaluation of Machine Learning Algorithms for NB-IoT Module Energy Consumption Estimation Based on Radio Channel Quality // IEEE Access. 2025. V. 13. P. 2389–2408.
23. Mosin S. A Model of LoRaWAN Communication in Class A for Design Automation of Wireless Sensor Networks Based on the IoT Paradigm // Proc. 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Kazan, Russia. 2018. P. 1–6.
24. Evangelakos E.A., Kandris D., Rountos D., Tselikis G., Anastasiadis E. Energy Sustainability in Wireless Sensor Networks: An Analytical Survey // Journal of Low Power Electronics and Applications. 2022. V. 12. № 4. Paper ID 65.
25. Sørensen A., Wang H., Remy M.J., Kjettrup N., Sørensen R.B., Nielsen J.J. et al. Modeling and experimental validation for battery lifetime estimation in NB-IoT and LTE-M // IEEE Internet Things J. 2022. V. 9. № 12. P. 9804–9819.
26. Mosin S. A Model for Univariate and Multivariate Simulating the Battery Lifetime of UE NB-IoT // Proc. International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia. 2024. P. 13–18.
27. 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Channels and Modulation. 2017. V. 14.4.0. P. 1–6.
28. 3GPP. 3GPP TS 36.213, Physical layer procedures (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP. April 2018.

### Информация об авторе

**Сергей Геннадьевич Мосин** – д.т.н., доцент, профессор  
ORCID: 0000-0003-1389-2602; SPIN-код: 6875-5930

Поступила в редакцию 25.04.2025

Одобрена после рецензирования 14.05.2025

Принята к публикации 26.05.2025



Original article

# Search of optimal uplink radio resources configuration for reducing power consumption of UE NB-IoT at data transmission

S.G. Mosin<sup>1</sup><sup>1</sup> Kazan Federal University (Kazan, Russia)<sup>1</sup> LLC LabSystems (Vladimir, Russia)<sup>1</sup> smosin@ieee.org

## Abstract

High requirements are imposed on the duration of autonomous operation of user equipment for narrowband Internet-of-Things (UE NB-IoT) up to 10 years when using a 5 Ah battery. The standard provides the low-power consumption operation modes for UE NB-IoT such as Extended Discontinuous Reception (eDRX) and Power Saving Mode (PSM). However, the greatest energy consumption occurs at data transmission, during which the required quality of service (QoS) is ensured due to mechanisms of multiple repetition of resource unit transmission and the transition to less efficient modulation and coding schemes (MCS). Different configurations of uplink (UL) radio resources applying to transmit the same data of a given length from UE NB-IoT to the base station (eNB) can lead to the transceiver consuming different amounts of energy from the battery. Search for a radio resource configuration that ensures minimum power consumption of the transceiver (TRX) when transmitting data from UE NB-IoT to eNB with the required quality, i.e. optimal scheduling of radio resources is an urgent task of widening the application of Cellular IoT.

The main goal of carried out study is development and estimation of a model for searching for an optimal radio resource configuration that reduces the power consumption of TRX when transmitting data over UL.

A model for estimating the power consumption of the UE NB-IoT transceiver when transmitting data over UL is proposed. A set of parameters affecting the amount of power consumption is determined. The problem of searching for a radio resource configuration that reduces the power consumption of the TRX at transmitting data over UL is formulated as an optimization problem and a method for solving it is proposed taking into account the features of the NB-IoT communication channel and the procedures for interaction of user equipment with the eNB. A comprehensive experimental study was conducted, including verification of the proposed model, assessment of the convergence of the proposed solution and the limits of its applicability, uni-variant and multi-variant analysis of the energy consumption of the UE NB-IoT transceiver with optimal scheduling of radio resources for data transmission over UL and assessment of the effectiveness of the proposed solution. The results of numerical simulation demonstrated a decrease of up to 50% of the minimum energy consumption when using the optimal configuration of radio resources compared to the next closest option. The direction of further research aimed at developing the proposed solution for the case of simultaneous interaction with the eNB of many users was determined. The proposed mathematical model and its software implementation are of interest for use in the early stages of automated design of Internet-of-Things networks using NB-IoT technology to select optimal configurations of radio resources in order to increase the battery life of user equipment without reducing the quality of service.

## Keywords

NB-IoT, Energy-Efficiency, Optimal Scheduling, Radio Resources, Mathematical Model

## For citation

Mosin S.G. Search of optimal uplink radio resources configuration for reducing power consumption of UE NB-IoT at data transmission. Dynamics of complex systems. 2025. V. 19. № 2. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.18127/j19997493-202502-06> [in Russian]

## References

1. Daneshmand B.M. Analiz i otsenka effektivnosti metodov obespecheniya kachestva obsluzhivaniya programmno-konfiguriruemyykh setey standart 5G/IMT-2020. Russian Technological Journal. 2021. T. 9. № 5. S. 14–25. [in Russian]
2. Kadatskaya O., Saburova S. Support of resources redistribution in NB-IoT LTE networks. Radiotekhnika. 2024. V. 2. № 217. P. 110–116.
3. Popovski P., Trillingsgaard K.F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. IEEE Access. 2018. V. 6. P. 55765–55779.
4. Elgarhy O., Reggiani L., Alam M. M., Zoha A., Ahmad R., Kuusik A. Energy efficiency and latency optimization for IoT URLLC and mMTC use cases. IEEE Access. 2024. V. 12. P. 23132–23148.
5. Valentini L., Bernardi E., Saggese F., Chiani M., Paolini E., Popovski P. Contention-Based mMTC/URLLC Coexistence Through Coded Random Access and Massive MIMO. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2024. V. 18. № 7. P. 1265–1280.
6. Novanana S., Kliks A., Arifin A.S., Wibisono G. Performance of 5G Slicing With Access Technologies and Diversity: A Review and Challenges. IEEE Access. 2024. V. 12. P. 170780–170802.
7. Goshi E., Mehmeti F., La Porta T.F., Kellerer W. Modeling and Analysis of mMTC Traffic in 5G Core Networks. IEEE Transactions on Network and Service Management. 2025. V. 22. № 1. P. 409–425.
8. Krutin D.V., Kislyakov M.A., Mosin S.G. Metody otsenki kachestva kanala svyazi. Tekhnologiya WCDMA. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2012. T. 55. № 5. S. 12–15. [in Russian]
9. Kislyakov M.A., Mosin S.G., Savenkova V.S. Proektirovaniye besprovodnykh sensorykh setey. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2012. T. 55. № 5. S. 15–19. [in Russian]
10. Zhang S., Xue Y., Shi Q., Chang T. Statistical channel modeling methods in wireless network twinning: current status and frontiers. ZTE technology journal. 2023. V. 29. № 3. P. 26–31.
11. Mosin S.G., Efremov I.A. A Wireless System of Data Acquisition. Proc. of IEEE Int. Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON-2010). P. 306–309.

12. Artvel R.M., Stepanov M.S. Razrabotka funktsional'noy modeli seti Interneta veshchey na osnove tekhnologii Nnarrow Band Internet of Things (NB-IoT). Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii. 2020. T. 7. № 2. S. 39–44. [in Russian]
13. Li Y., Zhang S., Ren X., Zhu J. et al. Real-world wireless network modeling and optimization: From model/data-driven perspective. Chinese Journal of Electronics. 2022. V. 31. № 6. P. 991–1012.
14. Lantsov V.N., Merkutov A.S. Algoritm rascheta kvaziperiodicheskikh protsessov v nelineynykh radiotekhnicheskikh ustroystvakh. Izvestiya VUZov. Radioelektronika. 1990. T. 33. № 6. S. 12–17. [in Russian]
15. Merkutov A.S. Issledovanie vozmozhnostey povysheniya effektivnosti radiosistem UKV-diapazona s ispol'zovaniem SAPR. Dinamika slozhnykh sistem - XXI vek. 2018. T. 12. № 2. S. 69–74. [in Russian]
16. Bakhtin A.A., Timoshenko A.G., Sokolov M.A. Razrabotka i issledovanie energoeffektivnogo usilitelya moshchnosti dlya NB-IoT i LoRaWAN. Elektronnaya tekhnika. Ser. 3: Mikroelektronika. 2019. № 4 (176). S. 27–35. [in Russian]
17. Lantsov V.N., Mosin S.G. Sovremennye podkhody k proektirovaniyu i testirovaniyu integral'nykh mikroskhem: Monografiya. Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta. 2010. [in Russian]
18. Kotlyarov E.Yu., Putrya M.G., Mikhaylov V.Yu., Zubov I.A., Vasil'ev E.S. Razrabotka prototipa mikroskhemy maloshumyashchego usilitelya dlya priemnogo trakta NB-IoT-sistemy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika. 2022. T. 27. № 6. S. 740–752. [in Russian]
19. Abbas M.T., Grinnemo K.-J., Eklund J., Alfredsson S., Rajiullah M., Brunstrom A. et al. Energy-saving solutions for cellular Internet of Things—A survey. IEEE Access, vol. 10, pp. 62073–62096, 2022.
20. Manzar S.A., Verma S., Gupta S.H. Analysis and optimization of downlink energy in NB-IoT. Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2022. V. 35. № 9. ID 100757.
21. Al-Sammak K.A., Al-Ghuri S.H., Marghescu I. et al. Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart Meters with LoRaWAN and NB-IoT. Energies. 2025. V. 18. № 4. ID 987.
22. Bortnik D., Nikic V., Sobot S., Vukobratovic D., Mezei I., Lukic M. Evaluation of Machine Learning Algorithms for NB-IoT Module Energy Consumption Estimation Based on Radio Channel Quality. IEEE Access. 2025. V. 13. P. 2389–2408.
23. Mosin S. A Model of LoRaWAN Communication in Class A for Design Automation of Wireless Sensor Networks Based on the IoT Paradigm. Proc. 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Kazan, Russia. 2018. P. 1–6.
24. Evangelakos E.A., Kandris D., Rountos D., Tselikis G., Anastasiadis E. Energy Sustainability in Wireless Sensor Networks: An Analytical Survey. Journal of Low Power Electronics and Applications. 2022. V. 12. № 4. Paper ID 65.
25. Sørensen A., Wang H., Remy M.J., Kjettrup N., Sørensen R.B., Nielsen J.J. et al. Modeling and experimental validation for battery life-time estimation in NB-IoT and LTE-M. IEEE Internet Things J. 2022. V. 9. № 12. P. 9804–9819.
26. Mosin S. A Model for Univariate and Multivariate Simulating the Battery Lifetime of UE NB-IoT. Proc. International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia. 2024. P. 13–18.
27. 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Channels and Modulation. 2017. V. 14.4.0. P. 1–6.
28. 3GPP. 3GPP TS 36.213, Physical layer procedures (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP. April 2018.

#### Information about the author

**Sergey G. Mosin** – Dr.Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor

The article was submitted 25.04.2025

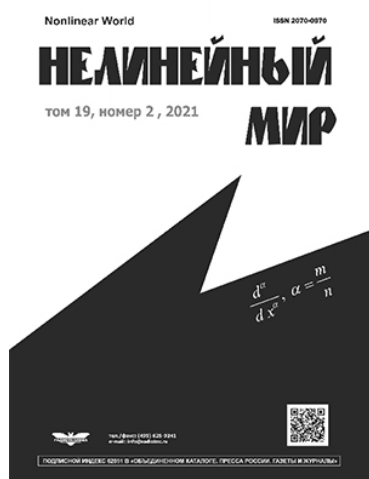
Approved after reviewing 14.05.2025

Accepted for publication 26.05.2025

## ЖУРНАЛ «НЕЛИНЕЙНЫЙ МИР»

Главный редактор: докт. физ.-мат. наук, профессор **Ольга Валентиновна Дружинина**

Международный научно-технический журнал, отражающий фундаментальные направления физики, математики, других естественных и гуманитарных наук с междисциплинарных позиций синергетики и нелинейной динамики.



**Включен в Перечень ВАК**

**Издаётся с 2003 г.**

**ISSN 2070-0970**

**Периодичность – 4 номера в год**

**«Пресса России» – индекс 82651**

**Научные специальности ВАК**

- 1.1.4. Теория вероятностей и математическая статистика
- 1.1.6. Вычислительная математика
- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика
- 1.3.3. Теоретическая физика
- 1.3.4. Радиофизика
- 1.3.5. Физическая электроника
- 1.3.6. Оптика
- 1.3.7. Акустика
- 1.3.8. Физика конденсированного состояния
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.4. Управление в организационных системах

Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством Радиотехника, размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Адрес Издательства: 101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41  
<http://www.radiotec.ru>, e-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)