

УДК 621.391

DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-4-901-912

## Энергосберегающий метод управления формированием передаваемых сигналов в беспроводной сенсорной сети

<sup>1</sup> Коськин А.В., <sup>2</sup> Федоров В.И., <sup>3</sup> Ясир М.Д.Я., <sup>4</sup> Алгазали С.

<sup>1</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
Россия, 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д.95

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

<sup>3</sup> Южный технический университет

Ирак, 61001, г. Басра, ул. Шоссе Зубаир

<sup>4</sup> Куфа университет

Ирак, 54001, г. Эн-Наджаф, ул. Аль-Куфа

E-mail: kav1959@rambler.ru, fedorov\_v@bsu.edu.ru,  
muhaned.yaser@stu.edu.iq, Salahm.ghazali@uokufa.edu.iq

**Аннотация.** Представлен анализ алгоритма адаптивной скорости передачи данных, который применяется в беспроводных маломощных глобальных сетях с оконечными устройствами-датчиками (далее – беспроводных сенсорных сетях), функционирующих в соответствии с протоколом LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks). Предложен энергосберегающий метод управления формированием передаваемых сигналов в беспроводной сенсорной сети. Для реализации данного метода предложена система энергосберегающего управления формированием сигналов, передаваемых в беспроводной сенсорной сети. Проведена серия имитационных экспериментов по оцениванию величины суммарного энергопотребления оконечных устройств при реализации предлагаемого метода и при реализации алгоритма адаптивной скорости передачи данных. Представлено выполнение статистической обработки результатов имитационного моделирования, которая показала, что применение предлагаемого в работе энергосберегающего метода управления формированием сигналов, передаваемых в беспроводной сенсорной сети, позволяет существенно снизить энергопотребление оконечных устройств по сравнению с применением известного алгоритма адаптивной скорости передачи данных.

**Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть, LoRaWAN, энергоэффективность, формирование сигналов, адаптивная скорость передачи данных, энергопотребление

**Для цитирования:** Коськин А.В., Федоров В.И., Ясир М.Д.Я., Алгазали С. 2023. Энергосберегающий метод управления формированием передаваемых сигналов в беспроводной

---

## Energy-Saving Method for Controlling the Formation of Transmitted Signals in a Wireless Sensor Network

<sup>1</sup> Aleksandr V. Koskin, <sup>2</sup> Vyacheslav I. Fedorov, <sup>3</sup> Muhanad J.Y. Yaser, <sup>4</sup> Salah Alghazali

<sup>1</sup> Orel State University named after I.S. Turgenev,  
95 Komsomolskaya St, Orel, 302026, Russia

<sup>2</sup> Belgorod State National Research University,  
85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

<sup>3</sup> Southern Technical University,  
Zubair Highway St, Basra, 61001, Iraq

<sup>4</sup> Kufa University,  
Al-Kufa St, Najaf, 54001, Iraq

E-mail: kav1959@rambler.ru, fedorov\_v@bsu.edu.ru,  
muhaned.yaser@stu.edu.iq, Salahm.ghazali@uokufa.edu.iq

**Abstract.** An analysis of the adaptive data rate algorithm is presented, which is used in wireless low-power global networks with terminal sensor devices (hereinafter referred to as wireless sensor networks), operating in accordance with the LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) protocol. An energy-saving method for controlling the formation of transmitted signals in a wireless sensor network is proposed. To implement this method, a system for energy-saving control of the formation of signals transmitted in a wireless sensor network is proposed. A series of simulation experiments was carried out to estimate the total energy consumption of terminal devices when implementing the proposed method and when implementing the adaptive data transfer rate algorithm. The implementation of statistical processing of the results of simulation modeling is presented, which showed that the use of the proposed energy-saving method for controlling the formation of signals transmitted in a wireless sensor network can significantly reduce the energy consumption of terminal devices compared to the use of the well-known adaptive data rate algorithm.

**Keywords:** wireless sensor network, LoRaWAN, energy efficiency, signal conditioning, adaptive data rate, energy consumption

**For citation:** Koskin A.V., Fedorov V.I., Yaser M.J.Y., Alghazali S. 2023. Energy-Saving Method for Controlling the Formation of Transmitted Signals in a Wireless Sensor Network. Economics. Information technologies, 50(4): 901–912 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-4-901-912

---

### Введение

Многочисленные исследования и разработки посвящены совершенствованию беспроводных систем передачи данных [Польщикова, 2014; Konstantinov et al., 2017a; Jameel et al., 2022]. В настоящее время беспроводные сети активно применяются для сбора и последующего анализа различной телеметрической информации [Polshchikov, Zdorenko, Masesov, 2014; Konstantinov et al., 2017b;]. На базе сетей, связывающих многочисленные сенсорные узлы, строятся распределенные системы Интернета вещей, позволяющие осуществлять удаленный мониторинг и управление десятками тысяч подключенных объектов [Koohang, 2022]. Одной из новейших технологий, предназначенных для построения систем Интернета вещей, является технология беспроводной передачи на дальние расстояния небольших по объему данных, которая обозначается аббревиатурой LPWAN (англ. Low-power Wide-area Network). Её важнейшая особенность состоит в низком энергопотреблении сетевых узлов, с помощью которых обеспечивается сбор данных, поступающих от измерительных датчиков, сенсорных модулей производственного оборудования, счетчиков жилищно-коммунального хозяйства, устройств сигнализации и пр.

В настоящее время наблюдается широкое распространение технологии LPWAN для решения задач удаленного мониторинга и управления в различных прикладных сферах. Развертывание сетей LPWAN дает возможность реализации точного земледелия [Polshchukov et al., 2021; Hernández-Morales, Luna-Rivera, Perez-Jimenez, 2022; Tu, Tang, Hu, 2022], получения данных о внесении удобрений в почву, содержании влаги в растениях, осуществления удаленного мониторинга в сфере животноводства [Casas, Hermosa, Marco, 2021]. Известны разработки, использующие технологию LPWAN для учета показаний измерительных устройств о расходе газа, учета расхода электроэнергии, мониторинга систем водоснабжения, контроля и утечек воды [Pointl, Fuchs-Hanusch, 2021; Slany, Koudelka, Krcalova, 2022]. Беспроводные сети, функционирующие на базе технологии LPWAN, позволяют обеспечить энергоэффективную связь при реализации управления теми или иными технологическими процессами в промышленной сфере и в сфере управления городским хозяйством [Zhang, Zhao, Cui, 2020; Qin, Li, Wang, 2021]. Многочисленные исследования посвящены вопросам применения технологий беспроводной связи в медицинской сфере [Kang, Yang, Haskell-Dowland, 2020; Quintanar-Gomez et al., 2021; Taleb, Andrieux, Motta Cruz, 2021].

Использование беспроводных сенсорных сетей, построенных в соответствии с технологией LPWAN, имеет значительные преимущества по сравнению с применением других стандартов беспроводной связи в части энергоэффективности и дальности передачи данных. Проведенный анализ показал, что одним из наиболее распространенных стандартов LPWAN является протокол LoRaWAN [Lavric, Petrariu, 2018]. Соответствующие этому стандарту беспроводные сети предоставляют возможность передавать данные на значительные расстояния, покрывая большие территории сенсорными узлами с низким энергопотреблением. Узлы LoRaWAN предназначены для низкоскоростного обмена данными и снабжены автономными источниками электропитания, функционирующими в течение длительного времени без замены или подзарядки. Анализ показал, что предложенные разработчиками и применяемые на практике методы снижения энергетических затрат сенсорных узлов имеют ряд существенных недостатков [Ясир, Польшиков, Федоров, 2023]. В связи с вышеизложенным задача разработки энергоэффективного метода управления формированием передаваемых сигналов в беспроводной сенсорной сети представляется актуальной.

### **Анализ алгоритма адаптивной скорости передачи данных**

В сети LoRaWAN при передаче данных по физическому радиоканалу используются широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией, которая адаптирована для устройств, характеризующихся низким энергопотреблением. Одним из параметров таких сигналов является коэффициент расширения спектра  $SF$ . Повышение значения  $SF$ , с одной стороны, позволяет улучшить помехозащищенность радиоканалов за счет увеличения длительности передачи сообщения, но, с другой стороны, приводит к большему энергопотреблению сетевых узлов. В соответствии с протоколом LoRaWAN величина  $SF$  может принимать значения от 7 до 12 с шагом 1. Ещё одним параметром, от которого зависит энергопотребление узлов сети, является выходная мощность передачи сигналов  $TP$ . Увеличение значения  $TP$  позволяет снизить вероятность искажения символов, передаваемых по беспроводным каналам, однако повышает энергопотребление передающих устройств сети. Значения  $TP$  изменяются от 2 до 14 дБм с шагом 3 дБм.

Для обеспечения доставки сообщений в сети LoRaWAN применяется отправка подтверждений на принятые информационные кадры. При передаче по каналам беспроводной сенсорной сети некоторые информационные кадры и кадры-подтверждения мо-

гут быть утрачены или искажены. В этих случаях инициируется повторная передача соответствующих кадров. Число повторных передач одного и того же информационного кадра ограничивается, в том числе, в целях экономии расхода энергии конечными устройствами.

Для снижения энергопотребления конечных устройств протоколом LoRaWAN предусмотрена реализация алгоритма адаптивной скорости передачи данных [Park, Lee, Joe, 2020; Moysiadis et al., 2021]. В соответствии с этим алгоритмом при обработке принятого кадра в сетевом сервере фиксируется соответствующее значение отношения «сигнал / шум» ( $SNR$ ) и сохраняется в массиве значений  $SNR$ , относящихся к данному конечному устройству. При получении каждого двадцатого кадра от конкретного конечного устройства в сетевом сервере вычисляется некоторая величина  $SNR_{margin}$  по формуле:

$$SNR_{margin} = SNR_{max} - SNR_{req} - dBm_{margin}, \quad (1)$$

где  $SNR_{max}$  – максимальное значение отношения «сигнал / шум», зафиксированное при приеме последних 20 кадров;  $SNR_{req}$  – отношение  $SNR$ , требуемое для эффективной демодуляции сигнала при соответствующем значении  $SF$ ;  $dBm_{margin}$  – заданное пороговое значение  $SNR$ , которое по умолчанию равно 10 дБм.

Значение параметра  $SNR_{margin}$  необходимо для вычисления величины  $N_{step}$  по формуле:

$$N_{step} = round\left(\frac{SNR_{margin}}{3}\right), \quad (2)$$

где  $round(\cdot)$  – операция округления дробного числа до ближайшего целого.

Величина  $N_{step}$  служит для уменьшения или увеличения параметров  $TP$  и  $SF$ .

В случае  $N_{step} > 0$  сетевой сервер сначала уменьшает значение параметра  $SF$  в  $N_{step}$  раз. Если при этом параметр  $SF$  достигает своего минимального значения 7, то сетевой сервер снижает значение параметра  $TP$  оставшееся число раз с шагом 3 дБм. Это снижение должно прекратиться в случае, когда уровень выходной мощности передатчика достигнет своего минимального значения 2 дБм. В случае  $N_{step} < 0$  сетевой сервер значение параметра сначала увеличивает  $N_{step}$  раз с шагом 3 дБм. Если при этом параметр  $TP$  достигает своего максимального значения 14, то сетевой сервер повышает значение параметра  $SF$  оставшееся число раз. Эти действия прекращаются в случае, когда величина расширения спектра передаваемых сигналов достигнет своего максимального значения, равного 12. Данные о полученных таким образом значениях параметров  $TP$  и  $SF$  передаются с помощью кадра-подтверждения в соответствующее конечное устройство и используются для установки выходной мощности передатчика и коэффициента расширения спектра сигналов при отправке последующих кадров.

Проведенный анализ позволил выявить особенности алгоритма адаптивной скорости передачи данных, ограничивающие его применение. Они заключаются в возможно-

сти пересчета в сетевом сервере рекомендуемых значений параметров  $TP$  и  $SF$  только после получения двадцати информационных кадров из конкретного оконечного устройства. Если сообщения имеют короткую длину и значительный период передачи, то в течение времени ожидания приема 20 кадров помеховая обстановка может существенно измениться, что потребует более оперативной корректировки параметров сигналов. Для устранения этого недостатка были разработаны другие модификации этого алгоритма, например, LR-ADR (Linear Regression-Adaptive Data Rate), EMA-ADR (Exponential Moving Average-based Adaptive Data Rate), G-ADR (Gaussian filter-based Adaptive Data Rate) [Moysiadis et al., 2021]. Данные модификации позволяют снизить энергопотребление в сети, но не обеспечивают высокую вероятность доставки кадров и не нашли широкого практического применения. В целях совершенствования процесса управления формированием сигналов в беспроводной сенсорной сети требуется разработка нового теоретически обоснованного метода выбора значений параметров передаваемых в сети сигналов для снижения её энергопотребления.

### Разработка энергосберегающего метода

Разработан метод управления формированием сигналов в беспроводной сенсорной сети на основе выбора значений параметров передаваемых сигналов. Метод предполагает использование базы данных, содержащей значения выходной мощности передачи и коэффициента расширения спектра, рекомендуемые для установки в сетевых устройствах при различных уровнях затухания передаваемых сигналов [Yaser, Polshchikov, Polshchikov, 2023].

Для снижения энергопотребления оконечных устройств разработан метод, включающий последовательное выполнение следующих этапов:

- 1) загрузка на сервере сети базы данных «Затухание сигнала – мощность передатчика – коэффициент расширения спектра»;
- 2) определение мощности сигналов  $RP$  на входе приемного устройства узла-шлюза при получении информационных кадров;
- 3) вычисление текущего уровня затухания сигналов  $A$  при передаче информационных кадров из оконечных устройств в узел-шлюз;
- 4) выбор из загруженной базы данных значений мощности передатчика и коэффициента расширения спектра, соответствующих текущему уровню затухания сигналов;
- 5) формирование в узле-шлюзе служебного кадра, содержащего данные о рекомендуемых значениях мощности передатчика и коэффициента расширения спектра;
- 6) передача сформированного служебного кадра из узла-шлюза в оконечное устройство, из которого ожидается прием очередного информационного кадра;
- 7) установка в оконечном устройстве рекомендуемых значений мощности передатчика и коэффициента расширения спектра перед отправкой очередного информационного кадра.

Предлагаемый метод положен в основу построения системы энергосберегающего управления формированием сигналов, передаваемых в беспроводной сенсорной сети. Схема данной системы представлена на рисунке 1.

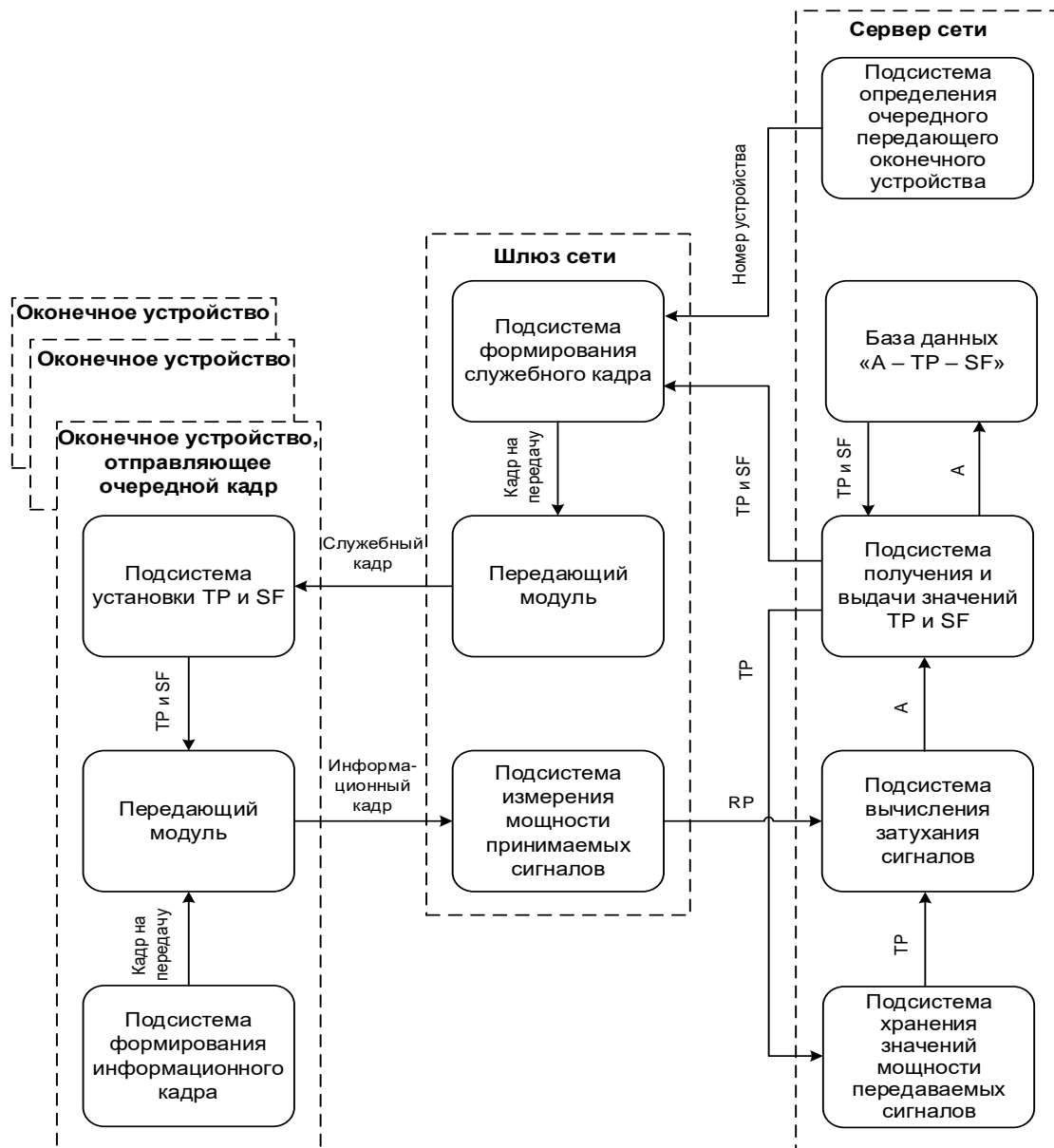


Рис. 1. Система энергосберегающего управления формированием сигналов, передаваемых в беспроводной сенсорной сети

Fig. 1. Energy-saving control system for the formation of signals transmitted in a wireless sensor network

В программной среде Matlab-Simulink разработана имитационная модель функционирования беспроводной сенсорной сети в соответствии с предлагаемым методом. Данная модель позволяет оценить суммарное энергопотребление всех оконечных устройств в процессе передачи сообщений [Ясир, Польщикова, Маматов, 2023]. Разработана также имитационная модель для исследования процесса функционирования беспроводной сенсорной сети в соответствии с алгоритмом адаптивной скорости передачи данных. С использованием вышеуказанных моделей была проведена серия имитационных экспериментов по оцениванию величины суммарного энергопотребления оконечных устройств при реализации предлагаемого метода и при реализации алгоритма адаптивной скорости передачи данных. Было проведено  $N = 50$  имитационных экспериментов. В каждом эксперименте номер  $i$  оценивалась величина  $EADR_i$  – суммарное энергопотребление в течение суток 12 оконечных устройств беспроводной сенсорной сети, функционирующей в соот-

ветствии с алгоритмом ADR. Часть полученных значений энергопотребления узлов  $EADR_i$  показана во втором столбце таблицы 1.

Таблица 1  
Table 1

Результаты имитационных экспериментов  
Results of simulation experiments

Номер эксперимента $i$	$EADR_i, \times 10^{-5}$ Вт·час	$E_i, \times 10^{-5}$ Вт·час	$\Delta E_i, \times 10^{-5}$ Вт·час
1	3,101	2,739	0,362
2	3,146	2,698	0,448
3	3,079	2,716	0,363
4	2,989	2,724	0,265
5	3,115	2,699	0,416
...	...	...	...
47	3,152	2,706	0,446
48	3,214	2,747	0,467
49	3,279	2,586	0,593
50	3,163	2,744	0,419

Аналогичные эксперименты выполнены с использованием представленной в имитационной модели функционирования беспроводной сенсорной сети в соответствии с предлагаемым алгоритмом выбора значений параметров сигналов, блок-схема которого показана на рисунке 5. В результате проведения имитационных экспериментов получены значения энергопотребления узлов  $E_i$ , часть которых показана в третьем столбце таблицы 1.

Для сравнения энергопотребления конечных устройств при реализации алгоритма адаптивной скорости передачи данных и при реализации предлагаемого метода для каждого  $i$ -го эксперимента были вычислены разности величин  $EADR_i$  и  $E_i$ :

$$\Delta E_i = EADR_i - E_i. \quad (3)$$

Полученные значения  $\Delta E_i$  частично представлены в четвертом столбце таблицы 4. Для оценивания величины снижения суммарного энергопотребления конечных устройств, получаемого при реализации предлагаемого метода вместо известного алгоритма адаптивной скорости передачи данных, проведена статистическая обработка результатов проведенных имитационных экспериментов. При этом экспериментально полученные значения  $\Delta E_i$  использовались для вычисления оценки математического ожидания случайной величины снижения энергопотребления конечных устройств:

$$\tilde{m}_{\Delta E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta E_i. \quad (4)$$

Величина  $\tilde{m}_{\Delta E}$  использовалась для вычисления оценки дисперсии случайной величины снижения энергопотребления конечных устройств:

$$\tilde{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta E_i - \tilde{m}_{\Delta E})^2. \quad (5)$$

Далее вычислялось среднеквадратическое отклонение оценки  $\tilde{m}$  по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{N}}. \quad (6)$$

Значения доверительных границ величины снижения энергопотребления оконечных устройств вычислялись по формулам:

$$\tilde{m}_1 = \tilde{m}_{\Delta E} - t_\beta \sigma, \quad (7)$$

$$\tilde{m}_2 = \tilde{m}_{\Delta E} + t_\beta \sigma, \quad (8)$$

где  $t_\beta$  – коэффициент, определяемый в зависимости от доверительной вероятности  $\beta$ .

Для получения значения коэффициента  $t_\beta$  использовалась формула:

$$t_\beta = \arg \Phi^* \left( \frac{1 + \beta}{2} \right), \quad (9)$$

где  $\arg \Phi^* (\dots)$  – функция, обратная нормальной функции распределения случайной величины.

С использованием выражений (3) – (9) выполнена статистическая обработка экспериментальных данных, результаты которой представлены в таблице 2.

Таблица 2  
Table 2

Результаты статистической обработки данных имитационных экспериментов  
Results of statistical processing of data from simulation experiments

$\tilde{m}_{\Delta E}, \times 10^{-5}$ Вт·час	$\sigma, \times 10^{-5}$ Вт·час	$\beta$	$t_\beta$	$\tilde{m}_1, \times 10^{-5}$ Вт·час	$\tilde{m}_2, \times 10^{-5}$ Вт·час
0,42	0,034	0,98	2,325	0,342	0,499

Для оценивания минимального и максимального процентного снижения энергопотребления оконечных устройств, достигаемого при реализации предлагаемого алгоритма, использовались формулы:

$$\tilde{m}_{\%1} = \frac{\tilde{m}_1}{\tilde{m}_E} \cdot 100\%, \quad (10)$$

$$\tilde{m}_{\%2} = \frac{\tilde{m}_2}{\tilde{m}_E} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где  $\tilde{m}_E$  – оценка математического ожидания энергопотребления узлов при реализации предлагаемого метода.

Значение величины  $\tilde{m}_E$  вычислялось с помощью выражения:

$$\tilde{m}_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i. \quad (12)$$



Результаты оценивания процентного снижения энергопотребления оконечных устройств, которое достигается при реализации предлагаемого метода, представлены в таблице 3.

Таблица 3  
Table 3

Результаты оценивания процентного снижения  
энергопотребления оконечных устройств  
Results of estimating the percentage reduction  
in power consumption of terminal devices

$\tilde{m}_E, \times 10^{-5}$ Вт·час	$\tilde{m}_{\%1}, \%$	$\tilde{m}_{\%2}, \%$
2,72	12,56	18,35

Статистическая обработка результатов имитационного моделирования показала, что применение предлагаемого в работе энергосберегающего метода управления формированием сигналов, передаваемых в беспроводной сенсорной сети, позволяет снизить энергопотребление оконечных устройств на величину от 12,56 % до 18,35 % по сравнению с применением известного алгоритма адаптивной скорости передачи данных.

### Заключение

Таким образом, разработан метод управления формированием сигналов в беспроводной сенсорной сети. Метод предполагает использование базы данных, содержащей значения выходной мощности передачи и коэффициента расширения спектра, рекомендуемые для установки в сетевых устройствах при различных уровнях затухания передаваемых сигналов. В соответствии с методом выполняются этапы загрузки на сервер сети указанной базы данных, измерения мощности сигналов на входе приемного устройства узла-шлюза при получении информационных кадров, вычисления текущего уровня затухания сигналов при передаче информационных кадров из оконечных устройств в узел-шлюз, выбора из загруженной базы данных значений мощности передатчика и коэффициента расширения спектра, соответствующих текущему уровню затухания сигналов, формирования и передачи служебного кадра, содержащего данные о рекомендуемых значениях параметров сигналов, а также установки этих значений в оконечном устройстве перед отправкой очередного информационного кадра.

Проведены вычислительные эксперименты по оцениванию величины энергопотребления устройств беспроводной сенсорной сети с использованием имитационных моделей, разработанных в программной среде Matlab-Simulink. Результаты имитационного моделирования показали, что применение предлагаемого в работе метода позволяет снизить энергопотребление оконечных устройств беспроводной сенсорной сети на величину от 12,56 % до 18,35 % по сравнению с применением известного алгоритма адаптивной скорости передачи данных, обеспечивая при этом вероятность доставки сообщений не ниже уровня 0,95.

### Список литературы

- Польщиков К.А. 2014. Об управлении интенсивностью потоков данных в мобильной радиосети специального назначения. Научные ведомости БелГУ. История. Политология. Экономика. Информатика, 32(1): 196–201.
- Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Маматов Е.М. 2023. Имитационная модель функционирования беспроводной сети с низким энергопотреблением. Экономика. Информатика, 50(3): 645–654.
- Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Федоров В.И. 2023. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением. Экономика. Информатика, 50(2): 439–447. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.

- Casas R., Hermosa A., Marco Á. 2021. Real-time extensive livestock monitoring using Ipwon smart wearable and infrastructure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3): P. 1–18.
- Hernández-Morales C.A., Luna-Rivera J.M., Perez-Jimenez R. 2022. Design and deployment of a practical IoT-based monitoring system for protected cultivations. *Computer Communications*, 186: 51–64.
- Kang J.J., Yang W., Haskell-Dowland P. 2020. No Soldiers Left Behind: An IoT-Based Low-Power Military Mobile Health System Design. *IEEE Access*, 8: 201498–201515.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2017. Mathematical Model of Message Delivery in a Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings of the 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 10–13.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2017. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*, 1839: 174–186.
- Koohang A., Sargent C.S., Nord J.H., Paliszkiwicz J. 2022. Internet of Things (IoT): From awareness to continued use. *International Journal of Information Management*, 62: 102442.
- Lavric A., Petrariu A.I. 2018. LoRaWAN communication protocol: The new era of IoT. 2018 *International Conference on Development and Application Systems (DAS)*: 74–77.
- Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhoshesterov R.V., Kiselev V.E. 2022. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6): 84–95.
- Moysiadis V., Lagkas T., Argyriou V., Sarigiannidis A., Moscholios I.D., Sarigiannidis P. 2021. Extending ADR mechanism for LoRa enabled mobile end-devices. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 113: 102388.
- Park G., Lee W., Joe I. 2020. Network resource optimization with reinforcement learning for low power wide area networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020: 176.
- Pointl M., Fuchs-Hanusch D. 2021. Assessing the potential of LPWAN communication technologies for near real-time leak detection in water distribution systems. *Sensors*, 21(1): 1–22.
- Polshchikov K.O., Zdorenko Y.M., Masesov M.O. 2014. Method of telecommunications channel throughput distribution based on linear programming and neuro fuzzy predicting. *Elixir International Journal. Network Engineering*, 75: 27327–27334.
- Polshchikov K., Shabeeb A.H.T., Lazarev S., Kiselev V. 2021. Justification for the decision on loading channels of the network of geocological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3): 781–787.
- Qin J., Li Zh., Wang R. 2021. Industrial Internet of Learning (IIoL): IIoT based pervasive knowledge network for LPWAN-concept, framework and case studies. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 3(1): 25–39.
- Quintanar-Gomez J., Robles-Camarillo D., Trejo-Macotela F.R., Campero-Jurado I. 2021. Telemonitoring Device of Blood Pressure and Heart Rate through Multilayer Perceptrons and Pulse Rate Variability. *IEEE Latin America Transactions*, 19(7): 1233–1241.
- Slany V., Koudelka P., Krcalova E. 2022. New Hybrid IoT LoRaWAN/IRC Sensors: SMART Water Metering System. *Computers, Materials and Continua*, 71(2): 5201–5217.
- Taleb H., Andrieux G., Motta Cruz E. 2021. Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey. *Wireless Networks*. DOI: 10.1007/s11276-021-02780-2.
- Tu Y., Tang H., Hu W. 2022. An Application of a LPWAN for Upgrading Proximal Soil Sensing Systems. *Sensors*, 22(12).
- Yaser M.J., Polshchikov K.A., Polshchikov I.K. 2023. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(4): 168–174.
- Zhang R., Zhao C., Cui S. 2020. Design of a data acquisition and transmission system for smart factory based on NB-IoT. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 517: 875–880.

## References

- Polshchikov K.A. 2014. About Control of Data Flows Intensity in the Mobile Radio Network for Special Purpose. *Belgorod State University Scientific Bulletin. History. Political Science. Economics. Information technologies*, 32(1): 196–201 (in Russian).

- Yaser M., Polshchikov K.A., Mamatov E.M. 2023. Simulation Model of Functioning of a Low-Power Wireless Network. *Economics. Information technologies*, 50(3): 645–654 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-3-645-654.
- Yaser M.J.Y., Polshchikov K.A., Fedorov V.I. 2023. Message Delivery Model in a Low-Power Sensor Network. *Economics. Information technologies*, 50(2): 439–447 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.
- Casas R., Hermosa A., Marco Á. 2021. Real-time extensive livestock monitoring using lpwan smart wearable and infrastructure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3): P. 1–18.
- Hernández-Morales C.A., Luna-Rivera J.M., Perez-Jimenez R. 2022. Design and deployment of a practical IoT-based monitoring system for protected cultivations. *Computer Communications*, 186: 51–64.
- Kang J.J., Yang W., Haskell-Dowland P. 2020. No Soldiers Left Behind: An IoT-Based Low-Power Military Mobile Health System Design. *IEEE Access*, 8: 201498–201515.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2017. Mathematical Model of Message Delivery in a Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings of the 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 10–13.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2017. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*, 1839: 174–186.
- Koohang A., Sargent C.S., Nord J.H., Paliszkievicz J. 2022. Internet of Things (IoT): From awareness to continued use. *International Journal of Information Management*, 62: 102442.
- Lavric A., Petrariu A.I. 2018. LoRaWAN communication protocol: The new era of IoT. 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS): 74–77.
- Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhoshesterov R.V., Kiselev V.E. 2022. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6): 84–95.
- Moysiadis V., Lagkas T., Argyriou V., Sarigiannidis A., Moscholios I.D., Sarigiannidis P. 2021. Extending ADR mechanism for LoRa enabled mobile end-devices. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 113: 102388.
- Park G., Lee W., Joe I. 2020. Network resource optimization with reinforcement learning for low power wide area networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020: 176.
- Pointl M., Fuchs-Hanusch D. 2021. Assessing the potential of LPWAN communication technologies for near real-time leak detection in water distribution systems. *Sensors*, 21(1): 1–22.
- Polshchikov K.O., Zdorenko Y.M., Masesov M.O. 2014. Method of telecommunications channel throughput distribution based on linear programming and neuro fuzzy predicting. *Elixir International Journal. Network Engineering*, 75: 27327–27334.
- Polshchikov K., Shabeeb A.H.T., Lazarev S., Kiselev V. 2021. Justification for the decision on loading channels of the network of geoeological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3): 781–787.
- Qin J., Li Zh., Wang R. 2021. Industrial Internet of Learning (IIoL): IIoT based pervasive knowledge network for LPWAN-concept, framework and case studies. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 3(1): 25–39.
- Quintanar-Gomez J., Robles-Camarillo D., Trejo-Macotela F.R., Campero-Jurado I. 2021. Telemonitoring Device of Blood Pressure and Heart Rate through Multilayer Perceptrons and Pulse Rate Variability. *IEEE Latin America Transactions*, 19(7): 1233–1241.
- Slany V., Koudelka P., Krcalova E. 2022. New Hybrid IoT LoRaWAN/IRC Sensors: SMART Water Metering System. *Computers, Materials and Continua*, 71(2): 5201–5217.
- Taleb H., Andrieux G., Motta Cruz E. 2021. Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey. *Wireless Networks*. DOI: 10.1007/s11276-021-02780-2.
- Tu Y., Tang H., Hu W. 2022. An Application of a LPWAN for Upgrading Proximal Soil Sensing Systems. *Sensors*, 22(12).
- Yaser M.J., Polshchikov K.A., Polshchikov I.K. 2023. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(4): 168–174.

Zhang R., Zhao C., Cui S. 2020. Design of a data acquisition and transmission system for smart factory based on NB-IoT. Lecture Notes in Electrical Engineering, 517: 875–880.

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 01.11.2023

Поступила после рецензирования 26.11.2023

Принята к публикации 01.12.2023

Received November 01, 2023

Revised November 26, 2023

Accepted December 01, 2023

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Коськин Александр Васильевич**, доктор технических наук, профессор, директор Департамента информатизации и перспективного развития, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

**Федоров Вячеслав Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

**Ясир Муханад Джаббар Ясир**, магистр наук, ассистент преподавателя, Южный технический университет, г. Басра, Ирак.

**Алгазали Салах**, кандидат технических наук, преподаватель, Куфа университет, г. Эн-Наджаф, Ирак

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksandr V. Koskin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Department of Informatization and Perspective Development, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

**Vyacheslav I. Fedorov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

**Yaser Muhanad Jabar Yaser**, MSc, Assistant lecturer of Southern Technical University, Basra, Iraq.

**Alghazali Salach**, Candidate of Technical Sciences, lecturer, Kufa University, Najaf, Iraq