

## К вопросу снижения энергопотребления беспроводных сенсорных узлов

*М.Д.Я. Ясир*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье представлены выражения, позволяющие вычислить величину энергопотребления конечных узлов при передаче сообщения в беспроводной сенсорной сети. Получены данные о значениях, которые принимает величина энергопотребления конечного узла сенсорной сети в зависимости от величины затухания сигналов при передаче по беспроводному каналу, а также от устанавливаемых значений выходной мощности и коэффициента расширения спектра передаваемых сигналов.

**Ключевые слова:** Интернет вещей, Internet of Things, сенсорная сеть, LoRaWAN, IoT-система, энергопотребление конечного узла, коэффициент расширения спектра, выходная мощность.

### Введение

В настоящее время усилия многих ученых и разработчиков направлены на совершенствование систем беспроводной связи, в частности, самоорганизующихся сетей, радиосетей на базе беспилотных летательных аппаратов, сетей для мониторинга территорий и специфических объектов. Особое внимание привлекают системы, функционирующие в рамках концепции Интернета вещей (Internet of Things, IoT) [1, 2]. Такие системы позволяют передавать данные измерений, полученные с помощью многочисленных датчиков, для их дальнейшего анализа и принятия управляющих решений.

К IoT-системам относится сеть LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), предоставляющая возможность передавать данные на значительные расстояния, покрывая большие территории сенсорными узлами с низким энергопотреблением [3, 4]. Узлы LoRaWAN предназначены для низкоскоростного обмена данными и снабжены автономными источниками электропитания, функционирующими в течение длительного времени без замены или подзарядки [5]. В связи с этим, задача экономии энергозатрат в процессе работы узлов сенсорной сети является актуальной.

Разработанные и используемые в настоящее время методы снижения энергопотребления конечных устройств в сети LoRaWAN имеют недостаточное теоретическое обоснование, основаны на использовании эвристических алгоритмов [6, 7] или базируются на применении нейросетей, требующих формирования массивной обучающей выборки [8]. Это определяет актуальность совершенствования научно-технического аппарата, позволяющего экономить энергозатраты IoT-устройств. В целях снижения энергопотребления IoT-узлов выполнено моделирование процесса передачи сообщений в сети LoRaWAN, результаты которого представлены в данной статье.

### **Выражения для оценивания энергопотребления IoT-узла**

В процессе функционирования сенсорной сети осуществляется доставка сообщений с заданной периодичностью с помощью передачи кадров из конечного узла к узлу-шлюзу. При этом, доставка каждого сообщения сопровождается энергопотреблением конечного узла. Вычислить эту величину, измеряемую в Вт·ч, можно с помощью следующего выражения:

$$EC = ANF \cdot TFRM \cdot TP_{mW} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $ANF$  – среднее количество кадров, требуемое для доставки сообщения;  $TFRM$  – длительность передачи кадра, ч;  $TP_{mW}$  – выходная мощность конечного узла, мВт.

Информация, содержащаяся в сообщении, передается из конечного узла узлу-шлюзу в виде кадра. На корректно принятый кадр узел-шлюз отправляет конечному узлу кадр-подтверждение. При получении такого подтверждения считается, что сообщение успешно доставлено. Если же в течение заданного времени конечный узел не получает подтверждение на ранее отправленный кадр, то конечным узлом осуществляется повторная

---

передача этого кадра. Во избежание перегрузок число повторных передач не должно превышать некоторого допустимого значения  $NRT$ . Среднее количество кадров, которое требуется для доставки сообщения, может быть вычислено по формуле:

$$ANF = d_1^n + 2 \cdot d_2^n + 3 \cdot d_3^n + \dots + (n+1) \cdot d_{n+1}^n, \quad (2)$$

где  $n$  – натуральное число;  $d_1^n, d_2^n, \dots, d_{n+1}^n$  – вероятность доставки сообщения с помощью 1, 2, ...,  $(n+1)$  кадров соответственно при  $NRT = n$ .

Вероятность доставки сообщения с помощью 1 кадра при  $NRT = n$  можно вычислить по формуле:

$$d_1^n = p \cdot a, \quad (3)$$

где  $p$  – вероятность доставки кадра;  $a$  – вероятность доставки подтверждения.

Вероятность доставки сообщения с помощью 2 кадров при  $NRT = n$  можно вычислить по формуле:

$$d_2^n = p \cdot a \cdot [p \cdot (1-a) + (1-p)], \quad (4)$$

Для вычисления вероятности доставки сообщения в сенсорной сети с помощью  $(n+1)$  кадров может быть использовано следующее выражение:

$$d_{n+1}^n = p \cdot a \cdot [p \cdot (1-a) + (1-p)]^n. \quad (5)$$

Вычисление величин  $p$  и  $a$ , используемых в формулах (3) – (5), следует выполнять с помощью выражений:

$$p = (1 - BER)^{LFRM}, \quad (6)$$

$$a = (1 - BER)^{LACK}, \quad (7)$$

где  $BER$  – вероятность битовой ошибки при передаче данных;  $LFRM$  – битовая длина кадра;  $LACK$  – битовая длина подтверждения.

Величину вероятности битовой ошибки при передаче данных можно вычислить с использованием Q-функции по эмпирической формуле [9]:

$$BER = 0,5 \cdot Q \left[ \sqrt{SNR \cdot 2^{SF+1}} - \sqrt{1,386 \cdot SF + 1,154} \right], \quad (8)$$

где  $SNR$  – уровень «сигнал / шум» на входе приемного устройства узла-шлюза.

Значение  $SNR$ , которое показывает, во сколько раз уровень сигнала превышает уровень шума на входе приемного устройства узла-шлюза, может быть вычислено по формуле:

$$SNR = \frac{RP \cdot 10^{-3}}{k \cdot TEMP \cdot W \cdot NF}, \quad (9)$$

где  $RP$  – мощность сигнала на входе приемного устройства узла-шлюза, мВт;  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $TEMP$  – температура;  $W$  – ширина полосы пропускания канала;  $NF$  – коэффициент шума приемника.

Мощность сигнала, принимаемого узлом-шлюзом, можно вычислить с помощью следующего выражения:

$$RP = 10^{\frac{TP+A}{10}}, \quad (10)$$

где  $A$  – затухание сигнала при его передаче из конечного узла к узлу-шлюзу, дБ;  $TP$  – выходная мощность конечного узла, измеряемая в дБм.

Для пересчета значений выходной мощности, измеряемых в дБм, в значения, измеряемые в мВт, следует использовать выражение:

$$TP_{mW} = 10^{TP/10}. \quad (11)$$

Значение Q-функции можно вычислить, используя следующее выражение:

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{\left(\frac{-x^2}{2 \cdot \sin^2 t}\right)} dt, \quad (12)$$

где  $x$  – аргумент Q-функции;  $t$  – параметр интегрирования.

Длительность передачи кадра в часах вычисляется по формуле:

$$TFRM = \frac{T_{ms} \cdot 10^{-3}}{3600}, \quad (13)$$

где  $T_{ms}$  – длительность передачи кадра, измеренная в мс.

Величина  $T_{ms}$  принимает значения, представленные в таблице № 1 и зависящие от установленного при передаче сигналов коэффициента расширения спектра  $SF$  [10].

Таблица № 1

Значения длительности передачи кадра в зависимости от коэффициента расширения спектра

$SF$	7	8	9	10	11	12
$T_{ms}$ , мс	53	88	177	313	627	1187

Как видно из выражений (1) – (13) величина энергопотребления конечного узла при передаче сообщения зависит от ряда величин, значения которых определяются внешними и внутренними факторами.

### **Факторы, влияющие на энергопотребление IoT-узлов**

К основным внешним факторам, влияющим на энергопотребление, следует отнести помеховую обстановку и расстояние между передающим и приемным узлами сети. В качестве показателя, учитывающего влияние внешних факторов, выступает величина затухания сигнала при передаче. Чем больше расстояние между взаимодействующими узлами и действие помех,

тем выше по модулю величина  $A$ , и более значительные энергетические затраты требуются на передачу сигналов.

Для обеспечения высокой вероятности доставки сообщений необходимо компенсировать влияние внешних факторов путем выбора и установки соответствующих значений выходной мощности конечного узла и коэффициента расширения спектра передаваемых сигналов. Кроме того, при выборе значений  $TP$  и  $SF$  следует стремиться к минимизации энергопотребления.

### Результаты вычислительных экспериментов

Выражения (1) – (13) использованы для проведения вычислительных экспериментов по оцениванию энергии, потребляемой конечным узлом в процессе передачи сообщения. В результате получены данные о значениях, которые принимает величина  $EC$  в зависимости от значений величин  $A$ ,  $TP$  и  $SF$ . Примеры таких данных представлены в таблицах №№ 2 – 4. Ячейки с прочерками в этих таблицах соответствуют случаям, при которых уровень сигнала, поступающего на вход узла-шлюза, ниже величины чувствительности приемного устройства.

Таблица № 2

Значения величины  $EC \times 10^{-7}$  (Вт·ч) при  $A = -131$  дБ

$TP$ , дБм	$SF$					
	7	8	9	10	11	12
2	-	-	0,81	1,38	2,76	5,23
5	-	0,79	1,56	2,75	5,51	10,43
8	0,94	1,54	3,10	5,49	10,99	20,80
11	1,85	3,07	6,19	10,95	21,93	41,51
14	3,70	6,14	12,35	21,84	43,75	82,82

Таблица № 3

Значения величины  $EC \times 10^{-7}$  (Вт·ч) при  $A = -132$  дБ

$TP$ , дБм	$SF$					
	7	8	9	10	11	12
2	-	-	-	1,38	2,76	5,23
5	-	-	1,55	2,75	5,51	10,43
8	-	1,54	3,10	5,49	10,99	20,80
11	1,85	3,07	6,19	10,95	21,93	41,51
14	3,70	6,14	12,35	21,84	43,75	82,82

Таблица № 4

Значения величины  $EC \times 10^{-7}$  (Вт·ч) при  $A = -137$  дБ

$TP$ , дБм	$SF$					
	7	8	9	10	11	12
2	-	-	-	-	3,05	5,23
5	-	-	-	2,95	5,51	10,43
8	-	-	3,24	5,49	10,99	20,80
11	-	3,15	6,19	10,95	21,93	41,51
14	3,74	6,14	12,35	21,84	43,75	82,82

Остальные ячейки в таблицах соответствуют таким значениям величин  $A$ ,  $TP$  и  $SF$ , при которых вероятность доставки сообщения выше 0,95.

Полученные результаты моделирования и вычислений рекомендуется использовать в процессе выбора параметров сигналов в сенсорной сети. Так, например, если  $A = -137$  дБ, то на конечном узле следует установить  $TP = 5$  дБм и  $SF = 10$ , т.к. в этом случае энергопотребление узла будет минимальным ( $EC = 2,95 \times 10^{-7}$  Вт·ч).

### **Заключение**

В статье предложены расчетные выражения, которые позволяют оценить величину энергопотребления конечных узлов при передаче сообщения в сенсорной сети LoRaWAN. В ходе вычислительных экспериментов, проведенных с использованием указанных выражений, получены данные о значениях, которые принимает величина энергопотребления конечного IoT-узла в зависимости от величины затухания сигналов при передаче по беспроводному каналу, а также от устанавливаемых значений выходной мощности и коэффициента расширения спектра передаваемых сигналов.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для разработки алгоритма выбора значений параметров передачи сигналов в IoT-системе, функционирование которого направлено на снижение энергопотребления конечных узлов беспроводной сенсорной сети.

### **Литература**

1. Li S., Xu L. D. The internet of things: a survey // Information Systems Frontiers. 2015. Vol. 17. pp. 243-259.
2. Nord J.H., Koohang A., Paliszkievicz J. The Internet of Things: Review and theoretical framework // Expert Systems with Applications. 2019. Vol. 133. pp. 97-108.
3. Almuhaya M.A.M., Jabbar W.A., Sulaiman N., Abdulmalek S. A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions // Electronics. 2022. Vol. 11(1). pp. 164.
4. Ertürk M.A., Aydın M.A., Büyükakkaşlar M.T., Evirgen H. A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies // Future Internet. 2019. Vol. 11(10). pp. 216.



5. 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). pp. 5044.
6. Miles B., Bourennane E.-B., Boucherkha S., Chikhi S. A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture // Computer Communications. 2020. Vol. 164. pp. 148-157.
7. Moysiadis V., Lagkas T., Argyriou V., Sarigiannidis A., Moscholios I.D., Sarigiannidis P. Extending ADR mechanism for LoRa enabled mobile end-devices // Simulation Modelling Practice and Theory. 2021. Vol. 113. pp. 102388.
8. Zinonos Z., Chatzichristofis S.A., Gkelios S. Grape Leaf Diseases Identification System Using Convolutional Neural Networks and LoRa Technology // IEEE Access. 2022. Vol. 10. pp.122-133.
9. Леушин А. В. LORA как новый вид модуляции. Принцип работы, основные параметры, помехоустойчивость // Техника радиосвязи. 2022. № 2(53). С. 28-42.
10. Седунов Д.П., Жунусова А.С., Зырянова Ю.О. Расчет параметров системы беспроводного сбора данных сети Logawan // Техника радиосвязи. 2021. № 2(49). С. 31-41.

### References

1. Li S., Xu L. D. Information Systems Frontiers. 2015. Vol. 17. pp. 243-259.
2. Nord J.H., Koohang A., Paliszkievicz J. Expert Systems with Applications. 2019. Vol. 133. pp. 97-108.
3. Almuhaya M.A.M., Jabbar W.A., Sulaiman N., Abdulmalek S. Electronics. 2022. Vol. 11(1). pp. 164.
4. Ertürk M.A., Aydın M.A., Büyükkakkaşlar M.T., Evirgen H. Future Internet. 2019. Vol. 11(10). pp. 216.
5. Kufakunesu R., Hancke G.P., Abu-Mahfouz A.M. Sensors. 2020. Vol. 20(18). pp. 5044.



6. Miles B., Bourenane E.-B., Boucherkha S., Chikhi S. Computer Communications. 2020. Vol. 164. pp. 148-157.
7. Moysiadis V., Lagkas T., Argyriou V., Sarigiannidis A., Moscholios I.D., Sarigiannidis P. Simulation Modelling Practice and Theory. 2021. Vol. 113. pp. 102388.
8. Zinonos Z., Chatzichristofis S.A., Gkelios S. IEEE Access. 2022. Vol. 10. pp.122-133.
9. Leushin A. V. Tehnika radiosvjazi. 2022. № 2(53). pp. 28-42.
10. Sedunov D.P., Zhunusova A.S., Zyrjanova Ju.O. Tehnika radiosvjazi. 2021. № 2(49). pp. 31-41.