

## Оценивание энергопотребления узлов беспроводной сети датчиков

М.Д.Я. Ясир<sup>1</sup>, К.А.Польщиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет

**Аннотация:** В статье предложен алгоритм обеспечения минимального энергопотребления конечных узлов в беспроводной сети датчиков. Представлена разработанная в программной среде Matlab – Simulink имитационная модель процесса информационного обмена в беспроводной сети датчиков, применение которой позволяет оценить суммарное энергопотребление при передаче сообщений всеми конечными узлами сети в течение заданного интервала времени.

**Ключевые слова:** беспроводная сеть датчиков, LoRaWAN, Интернет вещей, Internet of Things, IoT, энергопотребление, имитационная модель, Simulink, затухание сигнала, передача кадров.

### Введение

Одной из тенденций развития современной инфокоммуникационной отрасли является совершенствование программно-аппаратных средств, на основе которых функционирует инфраструктура Интернета вещей (Internet of Things, IoT) [1, 2]. Передача данных, сгенерированных многочисленными удаленными датчиками, осуществляется в соответствии со специально разработанными стандартами беспроводной связи, в частности, протоколом LoRaWAN [3, 4]. Беспроводные сети датчиков применяются для решения задач мониторинга окружающей среды [5], бытовых и промышленных объектов, а также объектов сельского хозяйства [6]. Конечные устройства таких сетей имеют батарейное питание. Экономное энергопотребление конечных сетевых узлов обеспечивает длительное время их автономной работы. Повышение времени непрерывного функционирования IoT-узлов без замены или подзарядки элементов питания является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящен ряд исследований [7, 8].

Цель данной статьи – предложить оригинальный алгоритм, позволяющий обеспечить минимизацию энергопотребления конечных узлов беспроводной сети датчиков на основе применения результатов

---

моделирования и вычислительных экспериментов, опубликованных в работах [9, 10]. Для оценивания целесообразности применения такого алгоритма потребовалась разработка имитационной модели процесса информационного обмена в беспроводной сети датчиков, представленной в данной работе.

### Алгоритм обеспечения минимального энергопотребления конечных узлов в беспроводной сенсорной сети

В целях минимизации энергопотребления в процессе функционирования беспроводной сенсорной сети предлагается на конечных узлах устанавливать значения параметров передачи сигналов в зависимости от текущего уровня величины  $A$  – затухания сигнала при его распространении в беспроводной среде. На основе результатов моделирования и вычислительных экспериментов сформирована база данных «Затухание сигнала  $A$  – мощность передатчика  $TP$  – коэффициент расширения спектра  $SF$ », фрагмент которой представлен в виде таблицы № 1.

Таблица № 1

Фрагмент базы данных «Затухание сигнала  $A$  – мощность передатчика  $TP$  – коэффициент расширения спектра  $SF$ »

Затухание сигнала, дБ	Мощность передатчика, дБм	Коэффициент расширения спектра
-131	5	8
-132	2	10
...	...	...
-137	5	10
...	...	...
-140	8	10

Разработан алгоритм обеспечения минимального энергопотребления конечных узлов в беспроводной сенсорной сети включает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Ввод исходных данных. Вводится значение  $T$  – максимальное число интервалов времени. Номер текущего интервала времени  $t$  устанавливается равным 0. Вводятся начальные значения  $TP$  и  $SF$ . Загружается предварительно сформированная база данных «Затухание сигнала – мощность передатчика – коэффициент расширения спектра».

Шаг 2. Номер интервала времени  $t$  увеличивается на 1. Если номер текущего интервала времени превышает значение  $T$ , то осуществляется переход к шагу 9.

Шаг 3. В случае принятия узлом-шлюзом сигнала осуществляется переход к шагу 4. В противном случае происходит возврат к шагу 2.

Шаг 4. На входе приемного устройства узла-шлюза измеряется мощность принимаемого сигнала  $RP$ .

Шаг 5. Считывается кадр данных, принятый узлом-шлюзом.

Шаг 6. Определяется номер конечного узла, от которого поступил кадр данных.

Шаг 7. Вычисляется текущий уровень затухания сигнала при передаче кадра по формуле:

$$A = RP - TP. \quad (14)$$

Шаг 8. Из ранее сформированной базы данных выбираются значения мощности передатчика и коэффициента расширения спектра, которые соответствуют текущему уровню затухания сигнала и рекомендуются для установки в конечном узле.

Шаг 9. В узле-шлюзе формируется кадр-подтверждение, в который вносятся данные о рекомендуемых значениях  $TP$  и  $SF$ .



например, с этой целью выходной порт *SendFrame* элемента *Node 1* соединен стрелкой со входным портом *FrameRec1* элемента *Gateway Node*. В обратном направлении моделируется передача из узла-шлюза к конечным узлам подтверждений о приеме соответствующих информационных кадров. Для этого, например, выходной порт *SendAck1* элемента *Gateway Node* соединен стрелкой со входным портом *AckRec* элемента *Node 1*.

Вычисленные значения энергопотребления от каждого конечного узла поступают на сумматор *Add*. Для вывода на экран измеренных значений суммарного энергопотребления всех моделируемых конечных узлов служит виртуальный регистратор *Display EC*.

### Оценивание энергопотребления конечных узлов

Обработка сообщений, поступающих в узел-шлюз из конечного узла номер 1, моделируется с помощью элементов, представленных на рис. 2.

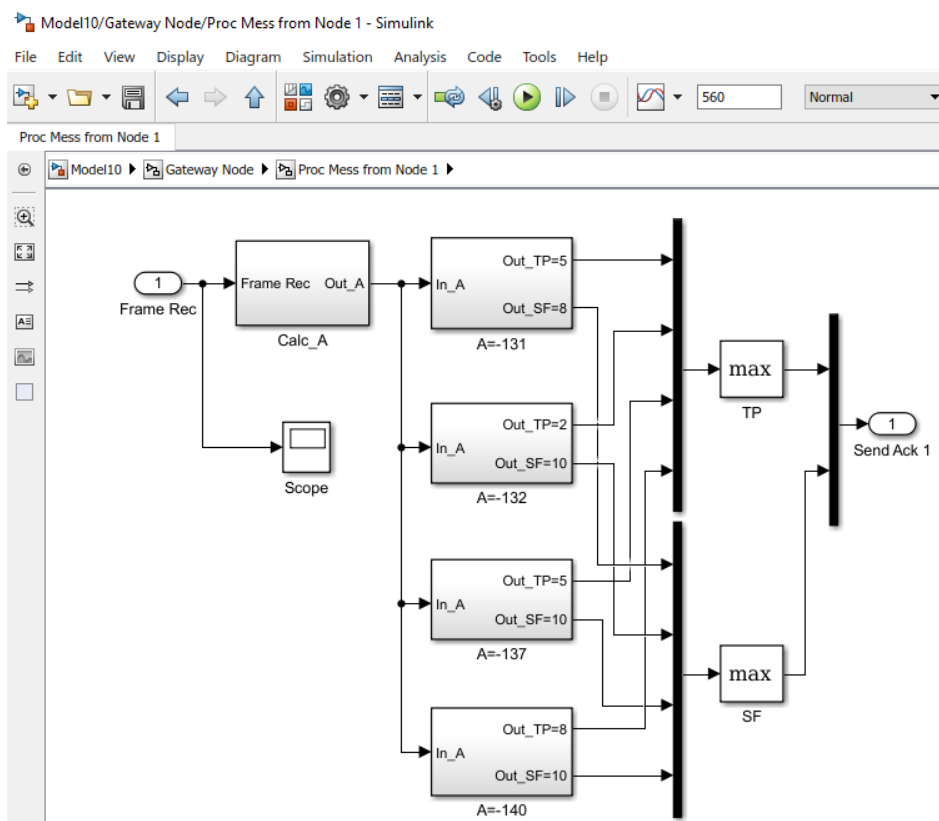


Рис. 2. – Моделирование обработки сообщений в узле-шлюзе

Прием отправленных из этого узла кадров можно наблюдать в динамике с помощью виртуального регистратора *Scope* (см. рис. 3).

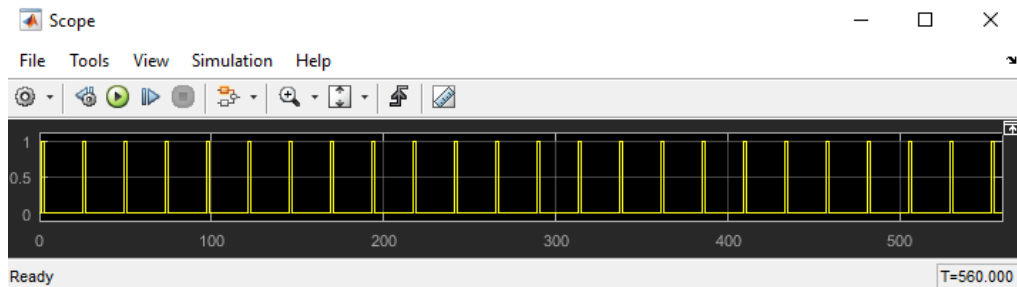


Рис. 3. – Моделирование приема кадров из конечного узла номер 1

В результате обработки сообщений, поступающих из конечных узлов в узел-шлюз, определяются такие значения параметров  $TP$  и  $SF$ , установка которых на конечных узлах при текущем уровне затухания сигнала  $A$  обеспечивает высокую вероятность доставки сообщений (не ниже 0,95) при минимальном энергопотреблении узлов.

Вычисление энергии, потребляемой конечным узлом при отправке информационных кадров узлу-шлюзу, выполняется с помощью элементов модели, представленных на рис. 4. На рис. 5 показано изменение величины  $A$  в течение суток, зафиксированное в дБ с помощью виртуального регистратора *Scope\_A*.

В результате реакции на изменения текущей величины затухания сигнала осуществляется установка на конечных узлах наиболее энергоэффективных значений выходных характеристик передачи сигналов. При этом оценивание энергопотребления каждого конечного узла сети выполняется с использованием моделей, представленных в публикации [9].

Вычисленные значения энергопотребления из портов  $EC$  каждого конечного узла суммируются с помощью элемента *Add* и отображаются виртуальным регистратором *Display EC*.

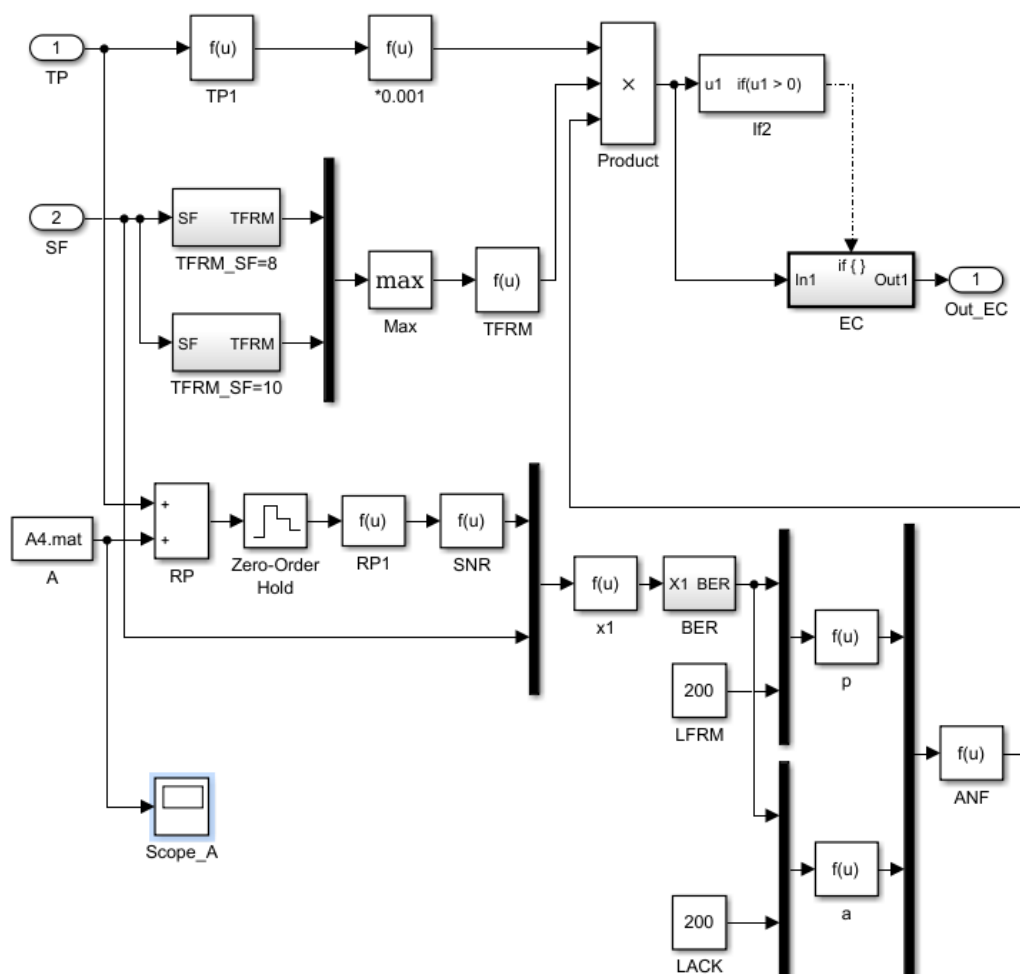


Рис. 4. – Оценивание энергопотребления конечного узла сети

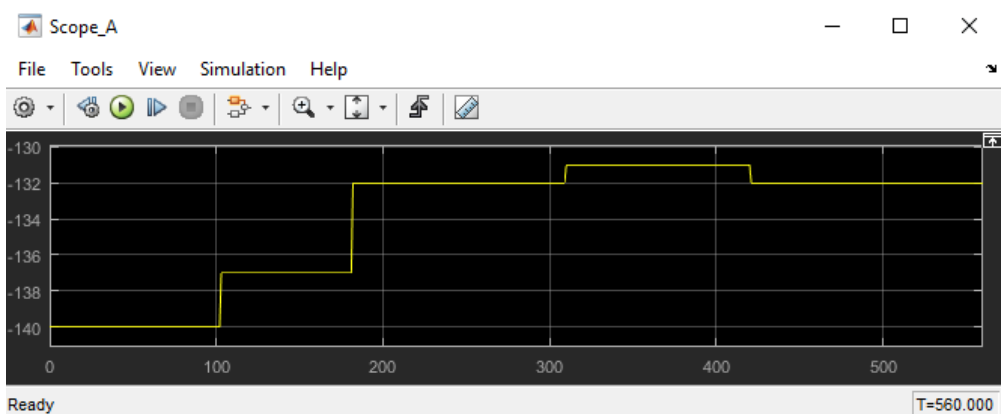


Рис. 5. – Отображение изменения величины  $A$  в течение суток

Как видно на рис.1, в результате одного из имитационных экспериментов суммарное энергопотребление при передаче сообщений

всеми конечными узлами сети в течение суток составило  $EC = 2,739 \cdot 10^{-5}$  Вт×час.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований предложен оригинальный алгоритм обеспечения минимального энергопотребления конечных узлов в беспроводной сети датчиков. В соответствии с данным алгоритмом, в зависимости от текущего уровня затухания сигнала при его распространении в беспроводной среде на конечных узлах устанавливаются такие значения мощности передачи и коэффициента расширения спектра, при которых минимизируется энергопотребление конечных узлов и достигается высокая вероятность доставки сообщений в беспроводной сети датчиков.

В программной среде Matlab – Simulink разработана имитационная модель процесса информационного обмена в беспроводной сети датчиков, применение которой позволяет оценить суммарное энергопотребление при передаче сообщений всеми конечными узлами сети в течение заданного интервала времени.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для обоснования целесообразности практического использования предложенного алгоритма в целях минимизации энергопотребления конечных IoT-узлов.

### Литература

1. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A Literature Review // Journal of Computer and Communications. 2015. Vol. 03. pp. 164-173.
2. Koohang A., Sargent C.S., Nord J.H., Paliszkievicz J. Internet of Things (IoT): From awareness to continued use // International Journal of Information Management. 2022. Vol. 62. p. 102442.



3. Cotrim J.R., Kleinschmidt J.H. LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication // *Sensors*. 2020. Vol. 20(15). p. 4273.

4. Basford P.J., Bulot F.M.J., Apetroaie-Cristea M., Cox S.J., Ossont S.J. LoRaWAN for Smart City IoT Deployments: A Long Term Evaluation // *Sensors*. 2020. Vol. 20(3). p. 648.

5. Jabbar W.A., Subramaniam T., Ong A.E., Shu'ib M.I., Wu W., de Oliveira M.A. LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring // *Internet of Things*. 2022. Vol. 19. p. 100540.

6. Bristow N., Rengaraj S., Chadwick D.R., Kettle J., Jones D.L. Development of a LoRaWAN IoT Node with Ion-Selective Electrode Soil Nitrate Sensors for Precision Agriculture // *Sensors*. 2022. Vol. 22. p. 9100.

7. Gava M.A., Rocha H.R.O., Faber M.J., Segatto M.E.V., Wörtche H., Silva J.A.L. Optimizing Resources and Increasing the Coverage of Internet-of-Things (IoT) Networks: An Approach Based on LoRaWAN // *Sensors*. 2023. Vol. 23. p. 1239.

8. Gonzalez-Palacio M., Tobon-Vallejo D., Sepulveda-Cano L.M., Rua S., Le L.B. Machine-Learning-Based Combined Path Loss and Shadowing Model in LoRaWAN for Energy Efficiency Enhancement // *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. Vol. 10(12). pp. 10725-10739.

9. Ясир М.Д.Я. К вопросу снижения энергопотребления беспроводных сенсорных узлов // *Инженерный вестник Дона*, 2023, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526).

10. Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Федоров В.И. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением // *Экономика. Информатика*. 2023. № 50(2). С. 439-447.

### References

1. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. *Journal of Computer and Communications*. 2015. Vol. 03. pp. 164-173.



2. Koohang A., Sargent C.S., Nord J.H., Paliszkiwicz J. International Journal of Information Management. 2022. Vol. 62. p. 102442.
3. Cotrim J.R., Kleinschmidt J.H. Sensors. 2020. Vol. 20(15). p. 4273.
4. Basford P.J., Bulot F.M.J., Apetroaie-Cristea M., Cox S.J., Ossont S.J. Sensors. 2020. Vol. 20(3). p. 648.
5. Jabbar W.A., Subramaniam T., Ong A.E., Shu'Ib M.I., Wu W., de Oliveira M.A. Internet of Things. 2022. Vol. 19. p. 100540.
6. Bristow N., Rengaraj S., Chadwick D.R., Kettle J., Jones D.L. Sensors. 2022. Vol. 22. p. 9100.
7. Gava M.A., Rocha H.R.O., Faber M.J., Segatto M.E.V., Wörtche H., Silva J.A.L. Sensors. 2023. Vol. 23. pp. 1239.
8. Gonzalez-Palacio M., Tobon-Vallejo D., Sepulveda-Cano L.M., Rua S., Le L.B. IEEE Internet of Things Journal. 2023. Vol. 10(12). pp. 10725-10739.
9. Jasir M.D.Ja. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526).
10. Jasir M.D.Ja., Pol'shnikov K.A., Fedorov V.I. Jekonomika. Informatika. 2023. № 50(2). pp. 439-447.