

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ QoS ПАРАМЕТРОВ

О. А.ЛАВШУК<sup>1</sup>, Н. И. ЛИСТОПАД<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: Lavshukoa@tut.by

**Аннотация.** С развитием полупроводниковых технологий возникли новые практические задачи и теоретические проблемы, связанные с применениями сенсорных сетей в промышленности, жилищно-коммунальном комплексе, домашних хозяйствах. В данной работе представлены результаты моделирования беспроводной сенсорной сети при различных QoS параметрах каналов и проанализировано их влияние на различные показатели производительности сети.

**Abstract.** With the development of semiconductor technologies, new practical tasks and theoretical problems have arisen related to the application of sensor networks in industry, housing and communal services, and households. In this study, a wireless sensor network was simulated with various QoS channel parameters and their impact on various network performance indicators was analyzed.

### Введение

Одной из основных технологий применяемой в беспроводных сетях является технология ZigBee, которая обладает относительно невысоким энергопотреблением поддерживает не только простые топологии беспроводной связи, по типу «звезда» или «точка-точка», но и сложные беспроводные сети с ячеистой топологией с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. Области применения данной технологии – это построение беспроводных сетей датчиков, автоматизация жилых и строящихся помещений, создание индивидуального диагностического медицинского оборудования, системы промышленного мониторинга и управления, а также при разработке бытовой электроники и персональных компьютеров.

### Моделирование сенсорной сети Промышленного Интернета вещей

Исследование выполнялось в операционной системе Contiki с открытым исходным кодом, которая используется для моделирования сенсорных сетей и других сетевых встраиваемых устройств. В параметрах симуляции выбираем модель Directed Graph Radio Medium (DGRM). В данной модели возможно добавлять однонаправленные и двунаправленные ссылки от источника к узлу назначения. Для каждой ссылки можно изменять различные параметры канала, такие как соотношение RX, RSSI, LQI и Delay. Эти параметры влияют на качество отдельного канала. Коэффициент RX — это случайная переменная, которая добавляется к приему пакета, чтобы обеспечить моделирование случайных ошибок при приеме пакета на узле назначения. Соотношение RX влияет на значения ETX. RSSI (Received Signal Strength Indicator) — это значение мощности сигнала, поступающего на антенны устройства, и включает в себя сигнал соседних базовых станций, внутренние и внешние помехи, шумы. LQI (Link Quality Indicator) индикатора качества радиоканала физического уровня. Delay — задержка прохождения пакета на канале.

Параметр ETX определяется по следующей формуле:  $ETX = 1/(D_f * D_r)$

$D_f$  — вероятность успешного получения пакетов соседним узлом;

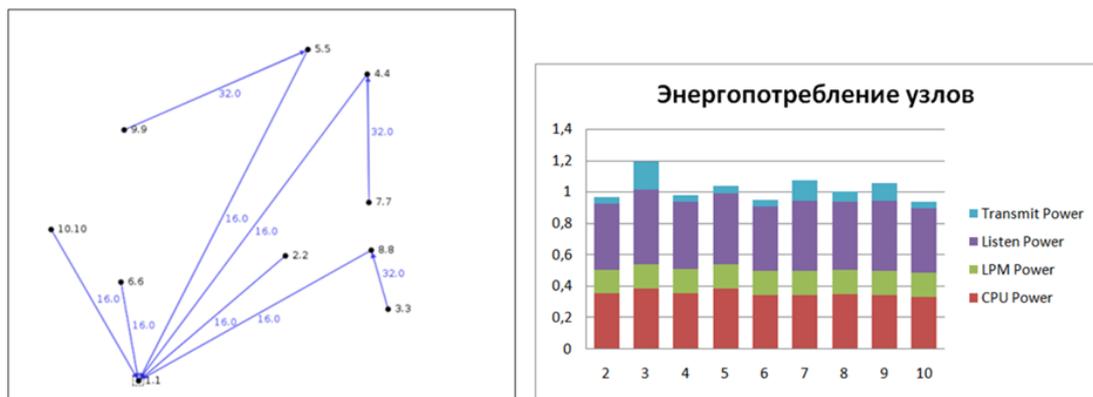
$D_r$  — вероятность успешного получения подтверждения.

Для сенсорной сети было установлено значение индикатора качества радиоканала физического уровня LQI (Link Quality Indicator), равное 80, значение мощности сигнала RSSI -20 дБм, значение задержки Delay и параметра RX в данном исследовании не учитываются. В таблице 1 приведены показатели производительности сети.

**Таблица 1.** Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	44	0	1	16	0,353	0,153	0,418	0,042	0,966
3	44	0	2	32	0,387	0,152	0,477	0,176	1,192
4	45	0	1	16	0,355	0,153	0,431	0,038	0,977
5	44	0	1	16	0,388	0,152	0,451	0,048	1,039
6	44	0	1	16	0,343	0,153	0,412	0,041	0,948
7	45	0	2	32	0,347	0,153	0,442	0,129	1,071
8	44	0	1	16	0,350	0,153	0,435	0,064	1,002
9	45	0	2	32	0,343	0,153	0,446	0,116	1,057
10	44	0	1	16	0,334	0,153	0,409	0,043	0,939
Средние показатели производительности:				21	0,356	0,153	0,436	0,077	1,021

Анализируя полученные результаты за 45 минут исследования поведения сенсорной сети, можно сделать вывод, что в сенсорной сети отсутствуют потери, энергопотребление узлов в режиме прослушивания приближено к среднему значению для всей сети. Отличается энергопотребление лишь в режиме передачи (Transmit Power) для узлов с количеством переходов до шлюза 2, это узлы 3, 7 и 9 которое в 2,29, 1,68 и 1,51 выше среднего значения. Таким образом, можно сделать вывод, что изменение значения индикатора качества радиоканала физического уровня LQI не оказывает существенного влияния на выбор оптимального пути и основные параметры сенсорной сети. Сенсорная карта и энергопотребления узлов представлены на рисунке 1.



**Рис. 1.** Сенсорная карта и энергопотребление узлов

В исследуемой сети было добавлено значение коэффициента RX для обеспечения моделирования случайных ошибок при приеме пакета на узле назначения. Значение RX было установлено в размере 50, что позволило смоделировать сенсорную сеть не с идеальными параметрами. Значения остальных параметров мощности сигнала RSSI и значение индикатора качества радиоканала физического уровня LQI остались неизменными. В таблице 2 приведены показатели производительности сети.

**Таблица 2.** Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	44	0	1	16	0,374	0,152	0,526	0,166	1,219
3	44	0	2	32	0,429	0,151	0,691	0,509	1,779
4	44	0	1	16	0,375	0,152	0,564	0,151	1,242
5	44	0	1	16	0,430	0,150	0,654	0,261	1,496
6	44	0	1	16	0,359	0,153	0,506	0,144	1,162
7	42	1	2	32	0,389	0,152	0,624	0,427	1,592
8	44	0	1	16	0,370	0,152	0,533	0,205	1,261
9	44	0	2	33	0,396	0,152	0,641	0,473	1,661
10	44	0	1	16	0,355	0,153	0,492	0,172	1,172
Средние показатели производительности:				21,3	0,386	0,152	0,581	0,279	1,398

Результаты, полученные за 45 минут исследования поведения сенсорной сети, показывают, что при данных параметрах сети появились потери пакетов, энергопотребление процессора (CPU Power) в режиме передачи (Transmit Power) и энергопотребление в режиме прослушивания (Listen Power) по сравнению с предыдущим исследованием (таблица 1) увеличилось в среднем в 1,08, 3,62 и 1,33 раза соответственно. При наличии ошибок приема для успешной передачи пакета в узел назначения имела место повторная пересылка, что увеличило энергопотребление узлов. Сенсорная карта и энергопотребления узлов представлены на рисунке 2.

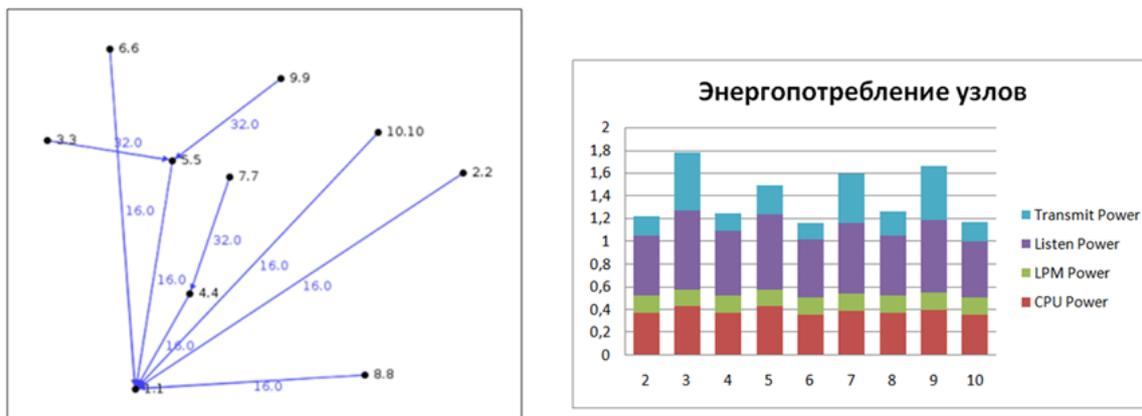


Рис. 2. Сенсорная карта и энергопотребление узлов

В сенсорной карте подключения, в которой представлены наилучшие маршруты, произошли изменения оптимальных маршрутов. Так наилучший маршрут для узла 3 проходит через сенсорные узлы 5-1. Соответственно RX, от которого зависит определение оптимального маршрута, больше других рассмотренных параметров влияет на значения ETX. Энергопотребление узлов увеличилось в трех режимах: прослушивания, пересылки и энергопотребления процессора. Все вышеизложенное стало результатом наличия ошибок приема и необходимости повторной отправки пакетов для успешной доставки.

В исследуемой сети была добавлена задержка в 1 мс, значения остальных параметров были оставлены неизменными. В таблице 3 приведены показатели производительности сети.

Таблица 3. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2									
3	3	27	2	176	0,447	0,149	0,911	0,824	2,359
4	38	11	1	24	0,468	0,149	0,949	0,852	2,418
5	5	23	2	176	0,498	0,148	1,109	0,933	2,688
6									
7	1	0	2	176	0,493	0,149	0,900	1,206	2,747
8									
9									
10	48	6	1	16	0,483	0,149	0,953	1,071	2,655
Средние показатели производительности:				113,68	0,483	0,149	0,964	0,977	2,574

Полученные результаты за 55 минут исследования поведения сенсорной сети показывают, что при добавлении задержки увеличились потери по сравнению с предыдущими показателями (таблица 2), за время исследования потеряно 67 пакетов, доставлено 95. Узлы 2, 6, 8 и 9 за исследуемое время не подключились к сенсорной сети. Увеличилось значение ETX для всех подключившихся узлов, что обусловлено потерями пакетов. Увеличилось также энергопотребление узлов.

Сенсорная карта и результаты энергопотребления представлены на рисунке 3. Из рисунка следует, что к шлюзу напрямую подключились два узла, а именно 4 и 10, три узла подключились к шлюзу через дополнительный узел, а не напрямую (узлы 3, 5 и 7). Четыре узла за время исследования не подключились (2, 6, 8 и 9). Энергопотребление узлов изменилось в трех режимах: энергопотребление процессора (CPU Power), энергопотребление в режиме передачи (Transmit Power) и энергопотребление в режиме прослушивания (Listen Power) увеличилось в 1,25, 1,66 и 3,5 раза соответственно по сравнению с предыдущими показателями, что обусловлено наличием больших потерь пакетов.

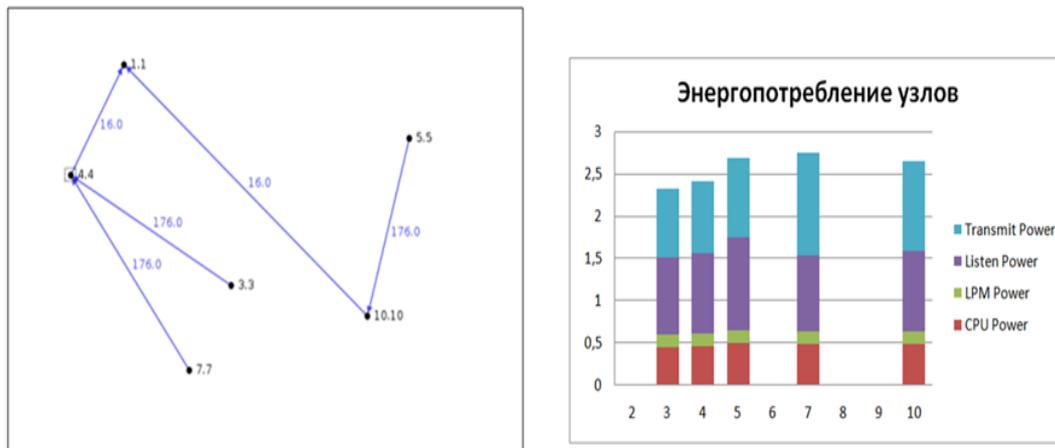


Рис. 3. Сенсорная карта и энергопотребление узлов

В исследуемой сети была установлена задержка в 2 мс для всех каналов, значения остальных параметров были неизменными неизменными. В таблице 4 приведены показатели производительности сети.

Таблица 4. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	18	1	1	16	0,422	0,151	0,838	0,864	2,275
3									
4	36	6	1	20	0,475	0,149	0,864	1,035	2,523
5	44	3	1	16	0,436	0,150	0,985	0,904	2,475
6									
7	3	18	2	176	0,456	0,150	0,906	1,040	2,551
8	44	5	1	16	0,428	0,151	0,819	0,910	2,308
9									
10	31	7	1	16	0,445	0,150	0,882	0,949	2,427
Средние показатели производительности:				43,41	0,444	0,150	0,882	0,950	2,427

Полученные результаты за 54 минуты исследования поведения сенсорной сети при увеличении задержки до 2 мс показали, что в сети уменьшились потери (таблицы 2,3), за время исследования потеряно 40 пакетов, доставлено 176. Узлы 3, 6 и 9 за исследуемое время не подключились к сенсорной сети. Уменьшились значения ETX для подключившихся узлов, что обусловлено меньшими потерями пакетов. Уменьшилось энергопотребление узлов по сравнению с предыдущими показателями (таблица 3). Сенсорная карта и график соотношения энергопотребления узлов представлены на рисунке 4.

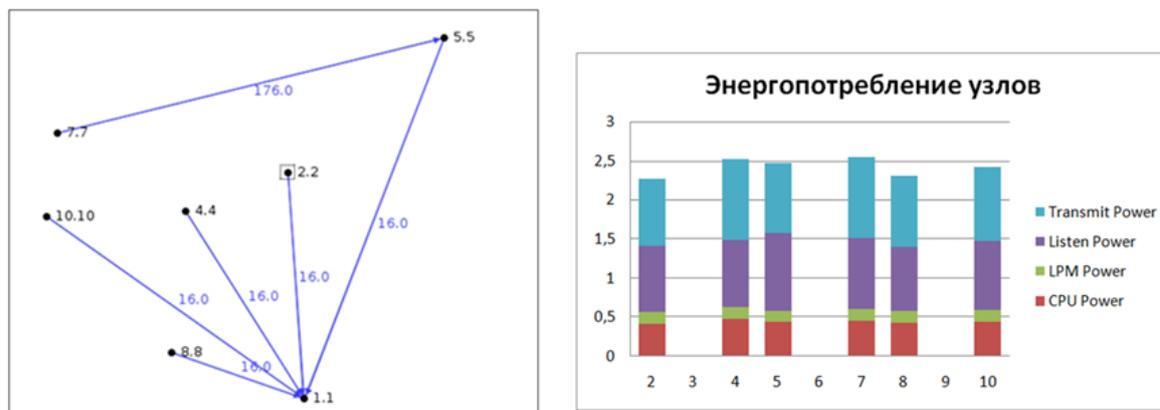


Рис. 4. Сенсорная карта и энергопотребление узлов

Анализ рисунка 4 показывает, что к шлюзу напрямую подключились пять узлов, а именно 2, 4, 5, 8 и 10. Узел 7 подключился к шлюзу через дополнительный узел, а не напрямую. Узлы 3, 6 и 9 за исследуемое время не подключились к сенсорной сети.

Исследование для сравнения результатов выполнялось также для параметра RX 70 %. Исследование показало, что наилучшие показатели производительности были получены в сети с задержкой 2 мс, так как при этих параметрах большее количество узлов подключилось к шлюзу напрямую.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что параметры мощности сигнала RSSI в диапазоне от -10 до -75 дБм и индикатора качества радиоканала физического уровня LQI от 60 до 105 практически не влияют на показатели производительности сенсорной сети: это означает, что в сенсорной сети отсутствуют потери, энергопотребление в среднем ниже в режиме передачи Transmit Power на 47%, энергопотребление в режиме прослушивания ListenPower ниже на 11% и энергопотребление процессора ниже на 3% по сравнению с другими моделями, которые учитывают случайные ошибки при приеме пакета на узле назначения и установленным коэффициентом RX=70%.

Коэффициент RX, моделирующий случайные ошибки при приеме пакета на узле назначения значительно увеличивает энергопотребление узлов в среднем на 53 %, что обусловлено необходимостью повторной пересылки пакетов. Экспериментально установлено, что значение коэффициента не должно быть меньше, чем 70%.

Задержки на каналах влияют на количество потерянных пакетов и время подключения узлов к сети, причем показатели производительности лучше для задержки в 2 мс, чем в 1 мс. При задержке в 2 мс к шлюзу напрямую подключились 56 % узлов для разных значений коэффициента RX (50% и 70%). При задержке в 1 мс к шлюзу подключились только 30 % от всех узлов, остальные узлы подключились к шлюзу через промежуточные, что намного ухудшает параметры производительности сети. При задержке 3 мс подключилось к сенсорной сети только 44% узлов, что недопустимо при использовании в сетях Промышленном Интернете вещей.

При наличии в сети задержек и необходимости передачи данных, чувствительных к задержке, необходимо использовать методы оптимального размещения узлов и кластеризации, рассмотренные в статье [3], что подтверждают проведенные исследования.

Материал публикации подготовлен при финансовой поддержке Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований.

### **Список использованных источников**

1. A. Kouicem, A. Chibani, A. Tari, Y. Amirat, and Z. Tari, Dynamic services selection approach for the composition of complex services in the web of objects, in 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2014, pp. 298-303.
2. A. Yachir, Y. Amirat, A. Chibani, and N. Badache, Event-Aware Framework for Dynamic Services Discovery and Selection in the Context of Ambient Intelligence and Internet of Things, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 85-102, 2016.
3. Лавшук О.А. Метод маршрутизации в сетях PoT с использованием кластеризации для протокола RPL/ О. А. Лавшук, Н. И. Листопад // Проблемы физики, математики и техники. – Гомель: «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», 2023, 4(57): 74– 80. (DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_4\\_57\\_74](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_74))