

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 681.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ OMNET++

К. И. Никишин, к.т.н., старший преподаватель кафедры ВТ ПГУ, Пенза, Россия;
orcid.org/0000-0001-7966-7833, e-mail: nkipnz@mail.ru

Среди сетевых технологий и в современном мире особое место занимают беспроводные технологии. Возникают потребности в развитии и построении новых алгоритмов и протоколов в беспроводных технологиях. Основным и наиболее перспективным направлением в беспроводных системах является проектирование систем контроля и сбора параметров объектов, к ним относятся беспроводные сенсорные сети (БСС). Цель работы – исследование протоколов беспроводных сенсорных сетей и их алгоритмов синхронизации с использованием современной среды имитационного моделирования OMNET++. Задачами исследования являются исследование стандартов БСС, протокола БСС, такого как IEEE 802.15.4 WPAN, и его моделирование с оценкой эффективности. Разработанная модель позволяет верифицировать алгоритмы и оценить пропускную способность сети, производительность узлов сети и эффективное энергопотребление.

Ключевые слова: беспроводные технологии, беспроводные сенсорные сети, самоорганизующиеся сети, протокол IEEE 802.15.4 WPAN, координатор, имитационное моделирование, OMNET++, Castalia.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-46-54

Введение

БСС позволяют организовывать низкоскоростные сети с ячеистой структурой, таким образом достигается возможность легкого проектирования их топологии в зависимости от необходимой конфигурации системы. Отличительная особенность БСС – возможность самоорганизации в сетях. Локальные и сгруппированные узлы образуют между собой сеть и передают информацию, как в обычных сетях с использованием шлюзов. При этом главным элементом является процесс передачи информации, алгоритмы синхронизации имеют существенное значение, когда оценивается их эффективность.

Беспроводная сеть позволяет передавать не только данные, но и речь. Самоорганизующаяся сеть – сеть, в которой количество узлов считается случайной величиной с течением времени [1]. Также случайными во времени являются взаимные связи в сети между узлами, при этом они формируются для того, чтобы сеть достигла какой-либо цели или для осуществления передачи данных.

Теоретическая часть

К преимуществам протокола IEEE 802.15.4 относятся надежность, простота реализации, низкое энергопотребление, использование множественного доступа с контролем несущей и исключением коллизий, гарантия передачи данных, поиск сигнала.

Существует несколько типов устройств в сетях 802.15.4: полнофункциональные устройства (FFD) и устройства с ограниченными функциями (RFD). Режимы работы FFD – координатор, координатор PAN, конечное устройство. Отличие RFD от FFD заключается в том, что

они могут связываться только FFD. Чтобы спроектировать сеть WPAN, необходимо подключить как минимум два устройства, одно из которых является устройством FFD в режиме координатора PAN.

Существует два вида архитектур в сети 802.15.4: каждый с каждым (одноранговый) и звезда. На рисунке 1 показаны архитектуры сетей. В звездообразной архитектуре устанавливается связь между устройствами и одним центральным контроллером (координатор PAN). Маршрутизацию сообщений по сети осуществляет координатор PAN.

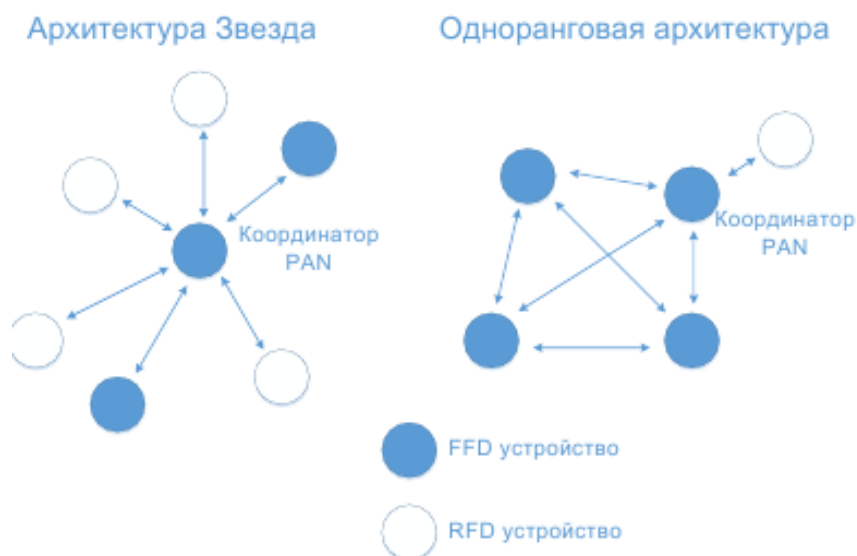


Рисунок 1 – Архитектуры сетей IEEE 802.15.4
Figure 1 – IEEE 802.15.4 network architectures

В одноранговой сети также присутствует координатор PAN, но отличие в том, что каждое устройство взаимодействует с другими устройствами, находящимися в пределах досягаемости. Одноранговая сеть позволяет создавать организации более сложных сетей, таких как ячеистая сеть.

Существует несколько типов передачи данных: передача данных от координатора к координатору и между двумя устройствами. При передаче данных по многокадровой сети устройство должно прослушивать канал, ожидая сигнальный кадр. При обнаружении сигнала устройство синхронизируется. Устройство передает кадр с данными координатору слотами, методом множественного доступа с контролем несущей [2]. Координатор должен подтвердить прием с помощью специального кадра, передача завершается (рисунок 2).

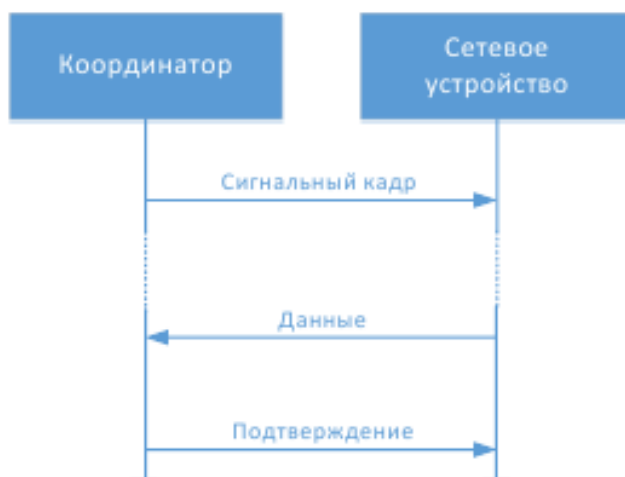


Рисунок 2 – Передача данных координатору в синхронизированной сети
Figure 2 – Transmitting data to the coordinator in a synchronized network

При передаче данных в сигнальном кадре координатор указывает, что устройство ожидает кадра. Сигнальный кадр сканируется устройством, и, если ожидаемый кадр обнаруживается, MAC-сообщение запроса данных передается с использованием метода множественного доступа без выделения временных интервалов. Запрос подтверждается координатором, и данные передаются [2]. С помощью специального кадра подтверждения устройство подтверждает успешный прием данных (рисунок 3).

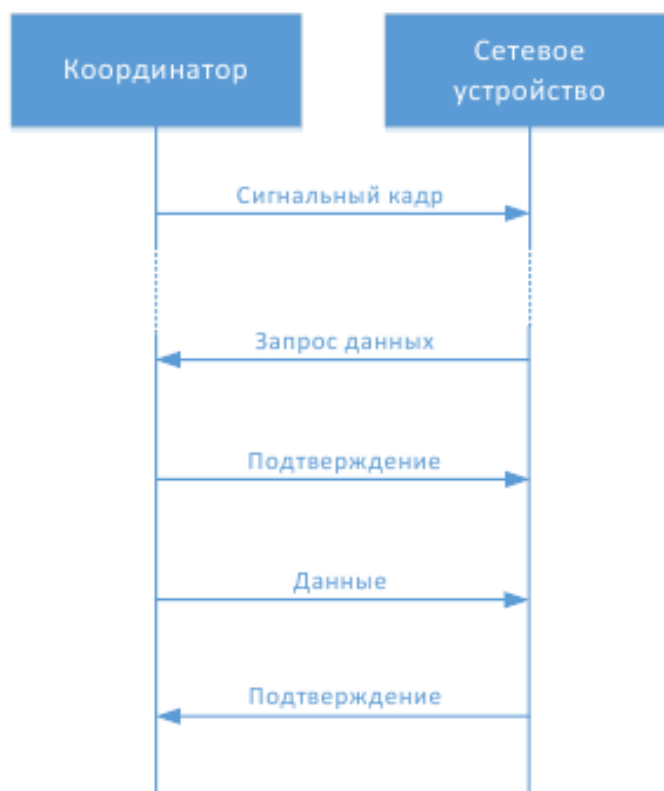


Рисунок 3 – Передача данных от координатора в синхронизированной сети
Figure 3 – Transmitting data from the coordinator in a synchronized network

Стандарт IEEE 802.15.4 выделяет следующие виды кадров:

- командный кадр MAC предназначен для управления передачей;
- кадр подтверждения предназначен для успешного приема;
- кадр с данными предназначен для самой передачи данных;
- сигнальный кадр используется координатором.

Для верификации сетевых протоколов, их оценки используется имитационное моделирование с использованием различного программного обеспечения. В статьях [3-4] рассматривались локальные сети Ethernet, моделирование проводилось в пакете CPN Tools. В данной статье предпочтение было отдано среде OMNeT++, поскольку одной из главных проблем БСС является энергопотребление, устройства питаются от аккумуляторных батарей, поэтому выбор пал на среду OMNeT++.

В статье моделируется беспроводная сенсорная сеть, а также проводится анализ энергопотребления сети при помощи библиотеки Castalia, установленной в системе имитационного программирования OMNeT++. Данная среда доступна к установке на различные платформы, в том числе: Windows, Linux, macOS и др. В процессе установки использовалась система Ubuntu версии 16.04 LTS.

Для установки первоначально необходимо загрузить архив с исходным кодом программы и установить необходимые пакеты:

```
$ sudo apt-get install build-essential gcc g++ bison flex perl \ python python3 qt5-default
```

```
libqt5opengl5-dev tcl-dev tk-dev \ libxml2-dev zlib1g-dev default-jre doxygen graphviz libweb-
kitgtk-3.0-0
```

```
$ sudo apt-get install openscenegraph-plugin-osgearth libosgearth-dev
```

```
$ sudo apt-get install libpcap-dev
```

Установить программу OMNET++ из архива:

```
$ tar xvfz omnetpp-5.6.1-src.tgz
```

Добавить папку bin программы в переменную среды:

```
$ gedit ~/.bashrc
```

```
export PATH=$HOME/omnetpp-5.6.1/bin:$PATH
```

Далее сконфигурировать и собрать образ OMNET++:

```
$ ./configure
```

```
$ make
```

И запустить систему командой:

```
$ omnetpp
```

После этого необходимо установить библиотеку Castalia, распаковав командой `$ tar -xvzf Castalia-master.tar.gz` и собрав процедурой `$ make`.

Castalia – библиотека, предназначенная для симуляции сетей с низким потреблением энергии. Библиотека позволяет реализовать не только уровни передачи данных, но и физические процессы, собирающиеся в узлах.

Структура БСС представлена на рисунке 4 и состоит из трех модулей:

- wirelessChannel – модуль беспроводного канала;
- physicalProcess – физические процессы;
- node – узлы сети.

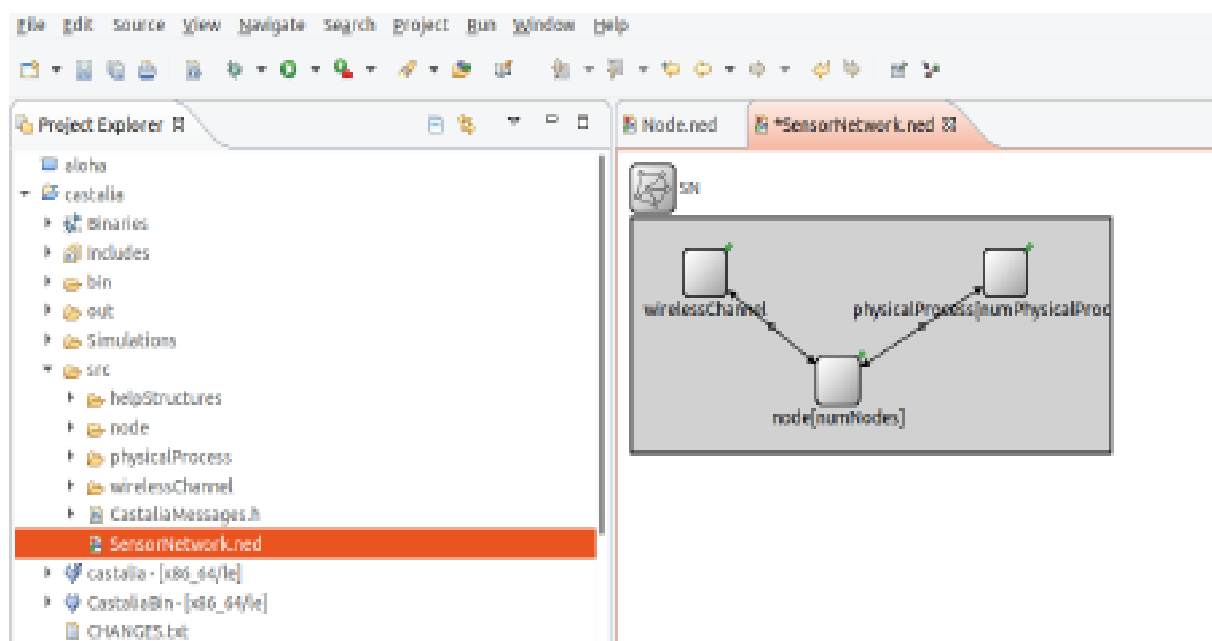


Рисунок 4 – Структура беспроводной сенсорной сети

Figure 4 – Structure of wireless sensor network

Количество рабочих станций в сети настраивается параметром numNodes в модуле node. Структура модуля node представлена на рисунке 5 и включает 5 элементов: модуль беспроводной связи, модуль состояния датчиков, модуль учета ресурсов, модуль приложения, модуль перемещения узла.

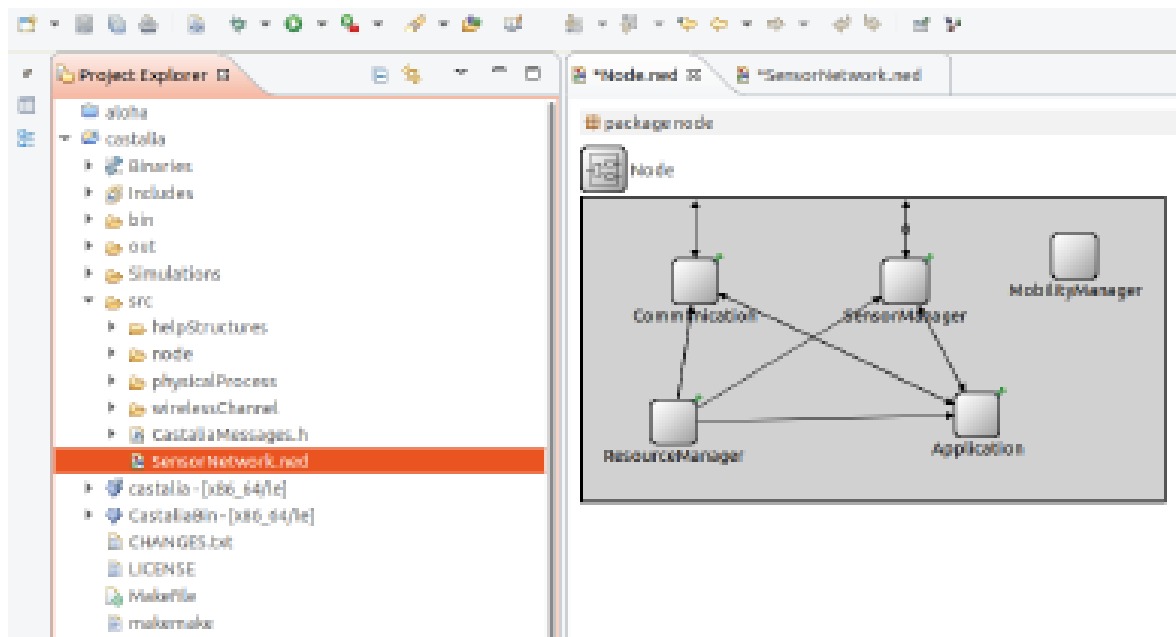


Рисунок 5 – Структура модуля node
Figure 5 – Node module structure

Структура модуля связи (Communication) представлена на рисунке 6 и содержит три элемента:

- Radio – доступ к радиоканалу;
- MAC – канальный уровень;
- Routing – маршрутизация.

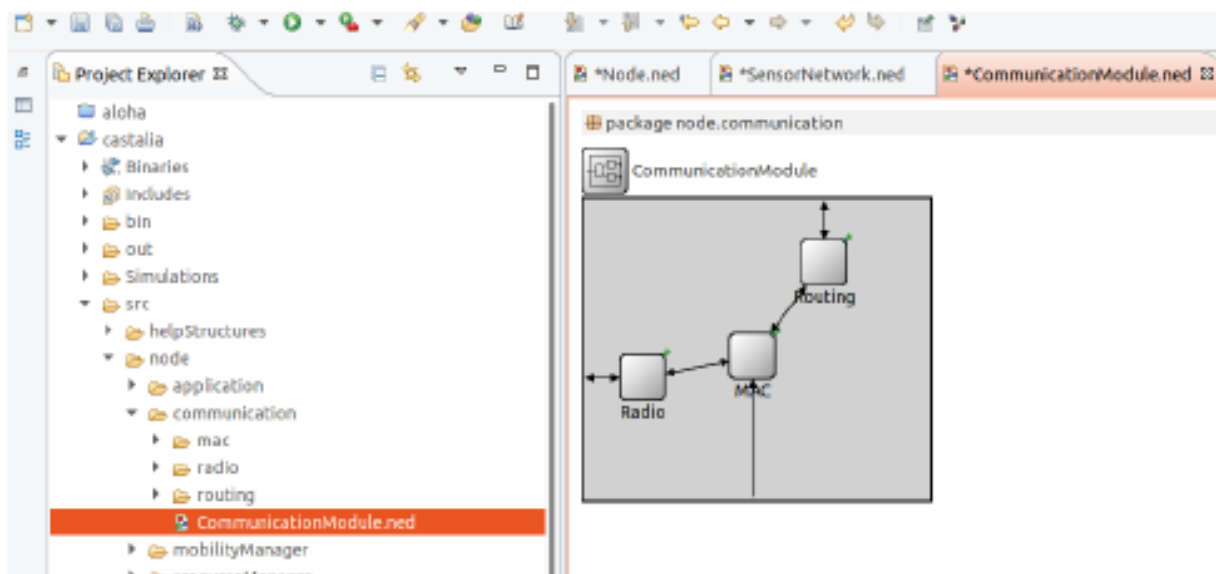


Рисунок 6 – Структура модуля Communication
Figure 6 – Communication module structure

Для моделирования в папке Simulations необходимо создать папку с конфигурационным файлом – `omnetpp.ini`, в котором задаются параметры модели. В разделе [General] конфигурации устанавливаются общие настройки для сценариев. Для моделирования были установлены следующие параметры:

- `SN.numNodes = 30` (кол-во рабочих станций);
- `sim-time-limit = 7200s` (продолжительность симуляции в секундах).

Была осуществлена настройка канального уровня MAC:

- *MAC.ProtocolName* = "Basic802154" (используется протокол IEEE 802.15.4);
- *MAC.isPANCoordinator* = true (PAN-координатор – 1 станция);
- *MAC.phyDataRate* = 1024 (скорость передачи данных равна 1024 символов в секунду).

После создания модели в среде OMNET++ выполняется сборка проекта, выбирается созданная конфигурация модели *omnetpp.ini* и запускается симуляция модели. Полученная беспроводная сенсорная сеть с топологией «звезда» представлена на рисунке 7.

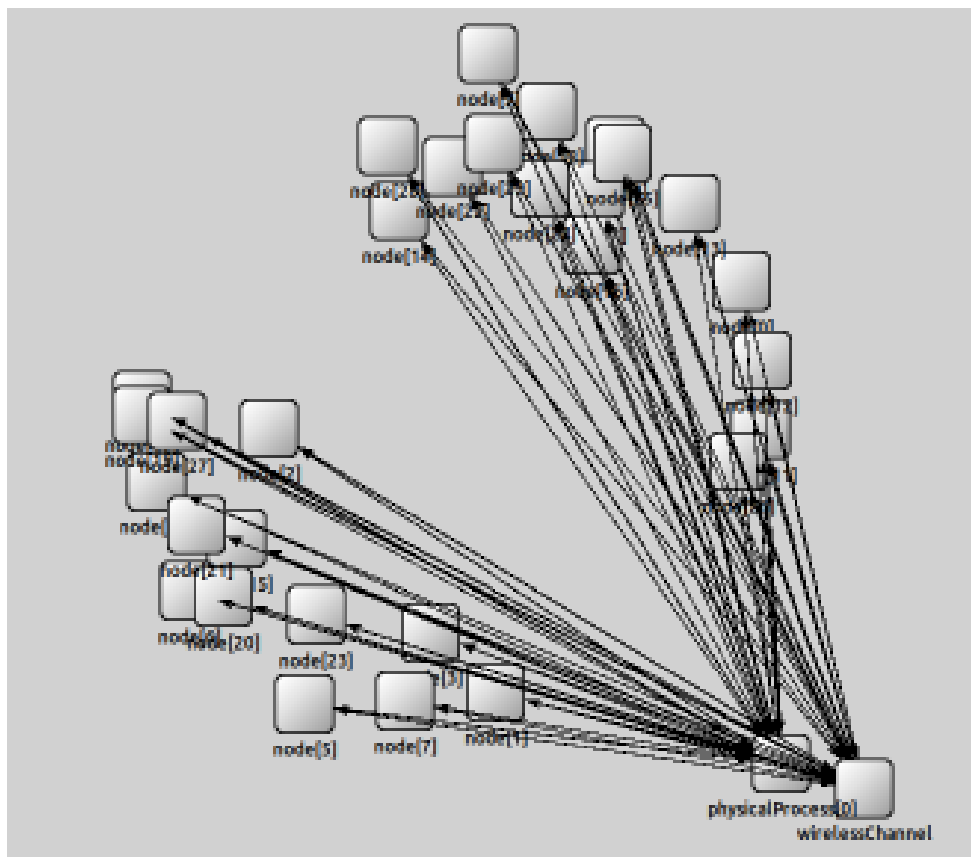


Рисунок 7 – Беспроводная сенсорная сеть в виде звездной топологии
Figure 7 – Wireless sensor network in a star topology

Также возможно осуществить симуляцию и получить результаты моделирования при помощи консоли, для чего:

- 1) необходимо перейти в папку конфигураций, с помощью скрипта Castalia вывести список доступных сценариев и выбрать нужный (General):

```
$ cd Simulations/nir
$ Castalia
$ Castalia -c [General] -o gen.txt
```

- 2) при помощи скрипта CastaliaResults собрать результат в файл *gen.txt*:

```
$ CastaliaResults -i gen.txt
```

Экспериментальные исследования

Имитационная модель БСС подтвердила свою эффективность. Была проведена серия экспериментов с моделью на предмет анализа энергопотребления узлов сети, максимального времени работы узлов при различной скорости передачи данных.

Энергопотребление каждого узла сети было получено с использованием команды – *\$ CastaliaResults -i gen.txt -s energy -n*. Полученные данные представлены в таблице 1 и на рисунке 8.

Таблица 1 – Результаты энергопотребления узлов сети

Table 1 – Results of network nodes power consumption

Node	Energy (mAh)	Node	Energy (mAh)
1	65,5159	16	42.422
2	51,821	17	49.4244
3	49,2995	18	49.4235
4	55,3466	19	49.4237
5	50,3509	20	49.4242
6	53,9501	21	49.4242
7	49,4235	22	49.4229
8	49,424	23	49.4238
9	49,4238	24	49.4238
10	49,4233	25	49.4242
11	49,423	26	49.4242
12	49,4241	27	49.4233
13	49,4238	28	49.4234
14	49.4235	29	49.4231
15	49.4237	30	49.4232

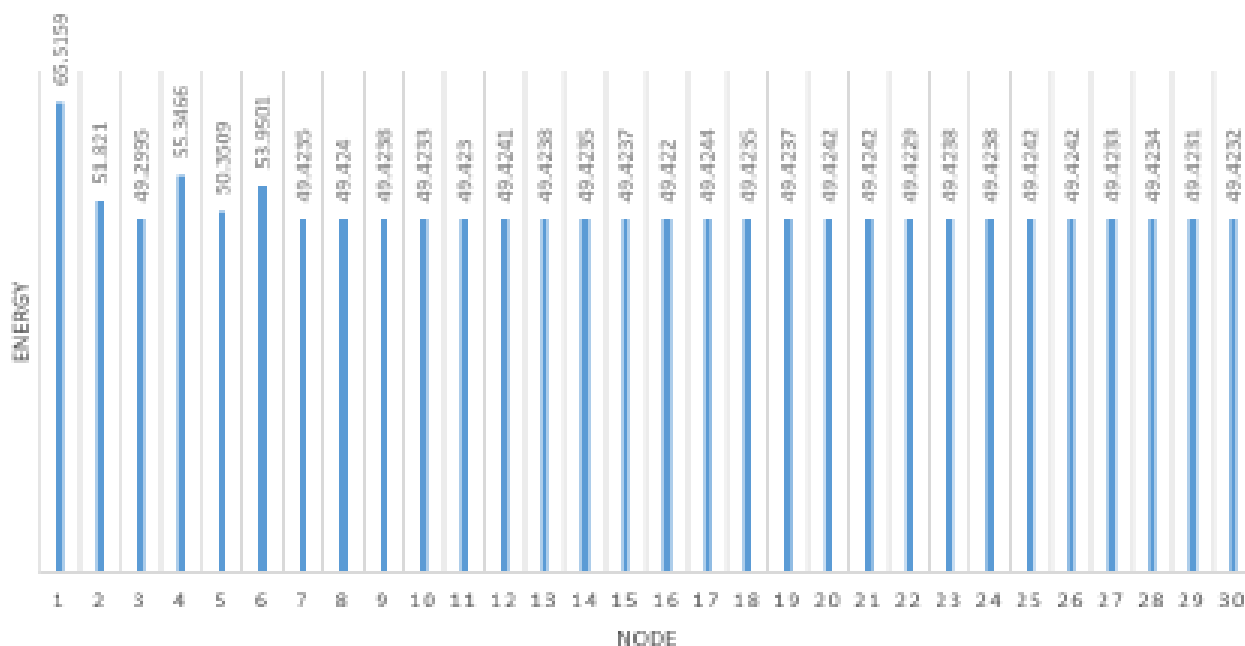


Рисунок 8 – График энергопотребления узлов сети

Figure 8 – Graph of network nodes power consumption

Для того, чтобы рассчитать максимальное время работы, было принято во внимание, что к каждому устройству подключено по две батареи емкостью по 2122 мАч, максимальное время работы каждого устройства представлено в таблице 2.

Расчет производился по формуле 1:

$$t = \frac{2 \cdot 2122}{E}, \quad (1)$$

где E – затраченная энергия в течение часа.

Согласно полученным данным минимальное время работы устройства равно 129 часов, а наибольшее равно 171 час, а время работы РАН-координатора равно 129 часов, после окончания работы данного узла работа сети будет прекращена, поэтому для сохранения работоспособности всей сети аккумуляторные батареи должны заменяться каждые 129 часов в каждом устройстве.

Таблица 2 – Максимальное время работы узлов сети
Table 2 – Maximum operating time of network nodes

Node	Время работы (ч)	Node	Время работы (ч)
1	129	16	171
2	163	17	171
3	172	18	171
4	153	19	171
5	168	20	171
6	157	21	171
7	171	22	171
8	171	23	171
9	171	24	171
10	171	25	171
11	171	26	171
12	171	27	171
13	171	28	171
14	171	29	171
15	171	30	171

После этого была изменена скорость передачи данных для каждого узла. Установив 1024 символа в секунду с помощью команды *SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 1024*, повторили моделирование (таблица 3).

Таблица 3 – Энергопотребление узлов сети при меньшей скорости передачи данных
Table 3 – Power consumption of network nodes at a lower data transfer rate

Node	Energy (mAh)	Node	Energy (mAh)
1	65,5177	16	49,2357
2	50,1542	17	49,2381
3	49,1023	18	49,2375
4	53,4418	19	49,2368
5	49,1979	20	49,2382
6	52,0205	21	49,2371
7	49,2374	22	49,2367
8	49,2373	23	49,2376
9	49,2375	24	49,2378
10	49,2364	25	49,2384
11	49,2373	26	49,2376
12	49,2381	27	49,2368
13	49,2374	28	49,2367
14	49,237	29	49,2373
15	49,2373	30	49,2369

Из таблицы 3 следует следующий вывод, что при уменьшении скорости передачи данных в 2 раза, энергопотребление большинства узлов снизилось незначительно, а потребление энергии первого узла, являющегося PAN-координатором сети, напротив, увеличилось на 0.0018 мАч, при этом время работы всей сети практически не изменится.

Заключение

Модель беспроводной сенсорной сети на основе протокола IEEE 802.15.4 WPAN в среде моделирования OMNET++ и библиотеки Castalia подтвердила свою эффективность в ходе экспериментов. Позволила верифицировать алгоритмы сети, оценить энергопотребления узлов сети, максимальное время работы узлов при различной скорости передачи данных.

Библиографический список

1. **Иванов В. Э., Левенец А. В., Чье Ен Ун.** Проблемно-ориентированные сенсорные сети: практический подход. // Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2015. С. 219.
2. **Марчуков А. В.** Беспроводные информационные сети. Учебное пособие // Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2009. С. 84.
3. **Никишин К. И., Коннов Н. Н., Гурин Е. И.** Усовершенствованный механизм передачи трафика жесткого реального времени в сети ETHERNET // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 4. С. 28-38.
4. **Nikishin K., Konnov N.** Schedule Time-Triggered Ethernet. International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.

UDC 681.31

MODELING OF WIRELESS SENSOR NETWORK USING OMNET++

K. I. Nikishin, Ph.D. (Tech.), senior lecturer, department of computer science, PSU, Penza, Russia; orcid.org/0000-0001-7966-7833, e-mail: nkipnz@mail.ru

*In the modern world among all network technologies the wireless technologies occupy a special place. We have the necessity to develop and implement new algorithms and protocols in wireless technologies. The main and most perspective direction in wireless systems is the design of systems for monitoring and control of object parameters. Special place in this direction is occupied by wireless sensor networks (WSN). **The aim of the research** is to study the protocols of wireless sensor networks and their synchronization algorithms using modern modeling environment OMNET++. The main tasks of the research are to study WSN standards, WSN protocol such as IEEE 802.15.4 WPAN and its modeling with efficiency assessment. The developed model made it possible to verify algorithms and evaluate the performance of network nodes, network bandwidth and efficient power consumption.*

Key words: wireless technologies, wireless sensor networks, self-organizing networks, IEEE 802.15.4 WPAN protocol, coordinator, modeling, OMNET++, Castalia.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-46-54

References

1. **Ivanov V. Je., Levenec A. V., Ch'e En Un.** *Problemno-orientirovannye sensornye seti: prakticheskij podhod.* Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta. 2015. 219 p. (in Russian).
2. **Marchukov A. V.** *Besprovodnye informacionnye seti. Uchebnoe posobie.* Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2009. 84 p. (in Russian).
3. **Nikishin K. I., Konnov N. N., Gurin E. I.** Usovershenstvovannyj mehanizm peredachi trafika zhestkogo real'nogo vremeni v seti ETHERNET. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki.* 2018, no. 4, pp. 28-38. (in Russian).
4. **Nikishin K., Konnov N.** Schedule Time-Triggered Ethernet. *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020.* DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.