

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С РЕЖИМОМ СБЕРЕЖЕНИЯ ЭНЕРГИИ И СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

ТЕРЕНТЬЕВ Максим Николаевич, старший преподаватель Московского авиационного института (государственного технического университета).
Тел. (499) 158-4743, e-mail: m-te@yandex.ru

TERENTIEV Maxim N. Senior Assistant. Moscow Aviation Institute (State Technical University).
Tel. (499) 158-4743, e-mail: m-te@yandex.ru

Рассматривается проблема имитационного моделирования работы беспроводных сенсорных сетей. В дополнение к предложенной ранее аналитической модели беспроводных сенсорных сетей с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени предложена и реализована имитационная модель, позволяющая находить значения параметров работы сети, зависящих от топологии.

A problem of simulation is discussed for nodes of wireless sensor networks. In addition to previously suggested mathematical model for wireless sensor networks with energy saving and synchronization of time scales, author suggests a simulation model for estimation general parameters of network topology.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети (БСС), имитационная модель, моделирование, синхронизация, множественный доступ.

Key words: wireless sensors networks, WSN, simulation model, modeling, synchronization, multiple access.

1. Введение

Основным назначением беспроводных сенсорных сетей (БСС) является периодическое измерение физических параметров в различных точках обслуживаемого объекта и передача результатов измерений в центр сбора, хранения и обработки полученной информации.

Примерами обслуживаемых объектов могут служить сборочный цех, высотное здание, палата медицинского учреждения. Устройства БСС, называемые узлами, функционируют в автономном режиме, собирая информацию о параметрах обслуживаемого объекта. Узлы БСС могут располагаться в

труднодоступных местах, их взаимное положение может изменяться со временем, они могут подвергаться воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды.

Одной из основных проблем, сдерживающих развитие технологии БСС, является быстрое исчерпание заряда источника питания (ИП). В связи с этим актуальной является задача сбережения энергии ИП. Эта задача решается чередованием активных фаз работы и фаз сна узлов [1]. *Активной фазе* соответствует режим полного энергетического обеспечения узла, а *фазе сна* — режим сниженного потребления энергии. Такие БСС называют БСС с режимом сбережения энергии.

Особенностью БСС с режимом сбережения энергии является то, что отправленное одним узлом сообщение может быть принято другими узлами только в том случае, если они также находятся в активной фазе. Поэтому для сохранения работоспособности БСС с режимом сбережения энергии необходимо обеспечение синхронной смены фаз всех ее узлов.

Для решения задачи синхронизации работы узлов БСС был предложен и обоснован метод, обеспечивающий передачу эталонных отметок времени с исключением недетерминированных задержек и коррекцию показаний часов в промежутках между сеансами синхронизации [2]. БСС, реализующую режим сбережения энергии и синхронизацию узлов в соответствии с указанным методом, будем называть *БСС с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени* (БСС СЭ СШВ).

Для выполнения качественного и количественного анализа при проектировании БСС СЭ СШВ разработана модель, учитывающая связи между директивными требованиями, параметрами и показателями работы БСС. Показателями работы БСС СЭ СШВ в разработанной модели являются вероятность доставки сообщений и время функционирования узлов до исчерпания энергии ИП [3].

В указанной модели параметры работы БСС подразделяются на параметры метода сбережения энергии и параметры, характеризующие топологию сети. Топология, в свою очередь, зависит от числа узлов БСС, их свойств, координат узлов в пространстве, конфигурации среды размещения, а также наличия пассивных или активных помех.

Влияние разработчика БСС СЭ СШВ на топологию ограничено выбором количества узлов и мест их установки. Но на топологию БСС оказывает влияние большое количество других факторов, в том числе недетерминированных и не имеющих формульного выражения.

Из вышесказанного следует, что фактическая топология сети должна быть определена отдельно, а ее характеристики должны использоваться в модели БСС СЭ СШВ в качестве исходных данных. Топология может быть определена при помощи проведения эксперимента или в результате имитационного моделирования. Проведению эксперимента препятствуют следующие основные причины: 1) невозможность воспроизведения условий функционирования БСС в лаборатории; 2) длительный срок работы БСС; 3) высокая стоимость работ.

Исходя из названных причин, приняли решение об определении параметров топологии сети при помощи имитационного моделирования. С учетом

этого структура модели БСС СЭ СШВ является двухуровневой. Первый уровень составляет имитационная модель, определяющая характеристики топологии сети. Второй уровень состоит из рассмотренной в работе [3] модели, использующей полученные в результате имитационного моделирования характеристики топологии. При имитационном моделировании процесса передачи сообщений одни пары узлов смогут осуществлять устойчивый обмен сообщениями, а другие — нет. В результате, в силу присущей БСС способности к самоорганизации, будет сформирована сеть определенной топологии.

Таким образом, имитационная модель выполняет преобразование количества узлов БСС, их координат, конфигурации среды размещения, информации о помехах в статистические характеристики топологии БСС.

2. Требуемые результаты

Количество сообщений. Характеристиками топологии, используемыми моделью БСС СЭ СШВ в качестве исходных данных, являются количество сообщений K при сборе результатов измерений и количество серверов синхронизации N_s при фиксированных значениях числа узлов N и топологии сети Ψ .

Поставим вопрос: сколько сообщений K должно быть передано сетью, чтобы собрать данные со всех узлов БСС и доставить их на узел-шлюз?

Каждому узлу БСС поставим в соответствие целочисленную величину k (которую назовем уровнем узла) по следующим правилам. Уровень шлюза равен 0. Уровни узлов, обладающих непосредственной связью со шлюзом, равны 1. Уровни узлов, обладающих непосредственной связью с узлами уровня 1, равны 2 и т.д. Заметим, что уровень любого узла показывает количество сообщений, которые должны быть переданы по радио для того, чтобы данные этого узла достигли шлюза.

Теорема. Математическое ожидание числа сообщений K , необходимых для сбора данных всех N узлов БСС, равно произведению количества узлов и математического ожидания уровня узла при заданном количестве узлов $E(k | N)$:

$$E(K | N) = NE(k | N).$$

Доказательство. Уровень узла k является случайной величиной, имеющей дискретное распределение и принимающей значение из множества $\{0, 1, \dots, N-1\}$. Обозначим вероятность того, что некоторый узел будет иметь уровень k при общем

числе узлов в сети N , как $P(k|N)$. Сеть из N узлов может содержать узлы уровня не более чем $N-1$. Рассмотрим последовательно группы узлов различных уровней. Узел уровня 0 (шлюз) при сборе информации не передает сообщений по радио. Для того чтобы доставить данные узлом уровня 1 шлюзу, нужно передать столько сообщений, сколько узлов уровня 1 содержит БСС. Эта величина равна $NP(1|N)$. Для уровня 2 эта величина будет $2NP(2|N)$, так как сначала данные должны быть переданы на узлы уровня 1. По индукции для уровня k получим $NkP(k|N)$. Для получения математического ожидания полного числа сообщений, которые должны быть переданы сетью, сложим эти величины:

$$E(K|N) = 0 + NP(1|N) + 2NP(2|N) + \dots + (N-1)NP(N-1|N) = N \sum_{k=0}^{N-1} kP(k|N).$$

Но множитель $\sum_{k=0}^{N-1} kP(k|N)$ является математическим

ожиданием дискретной случайной величины k . Теорема доказана.

Таким образом, теперь в вычислении количества сообщений, которые сеть должна передать по радио при сборе информации узлов, вместо топологии сети фигурирует ее обобщенная характеристика — математическое ожидание уровня узла.

Задержка доступа к каналу определяется используемым физическим уровнем алгоритмом доступа к каналу CSMA-CA [4], а также текущей загрузкой канала. В алгоритме используются паузы (задержки передачи) длительностью, численно равной продолжительности передачи $aUnitBackoffPeriod$ символов. В диапазоне 2450 МГц один символ соответствует одной шестнадцатеричной цифре передаваемых данных.

Каждый из узлов использует в своей работе две переменные: NB — количество неуспешных попыток передачи текущего сообщения и BE — показатель степени числа 2, определяющий продолжительность интервала (в паузах), который узел должен ждать перед оценкой состояния канала. Начальным значением BE является значение параметра $macMinBE$.

При реализации имитационной модели использованы рекомендованные стандартом значения параметров $aUnitBackoffPeriod$, $macMinBE$ и $aMaxBE$.

После инициализации переменных (рис. 1) алгоритм предусматривает задержку, величина которой выбирается случайно из диапазона от 0 до $2^{BE}-1$ пауз. По окончании задержки выполняется оценка состояния канала. Канал считается свободным, если уровень принимаемого сигнала не превышает некоторого порога. В этом случае передача начинается немедленно. Если канал оказывается занят, происходит увеличение на единицу значений переменных NB и BE . При этом значение переменной BE не должно превосходить установленный параметром

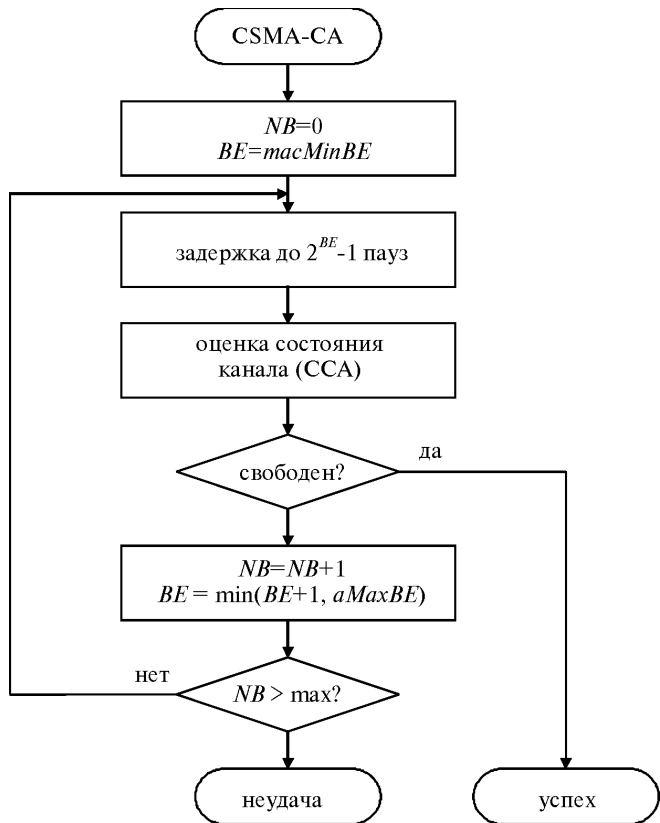


Рис. 1. Алгоритм CSMA-CA

$aMaxBE$ максимум. Если значение NB не превосходит предел, алгоритм вновь возвращается к случайной задержке. В противном случае алгоритм завершает свою работу, сообщая о неудаче.

3. Реализация имитационной модели

Имитационная модель была реализована в виде компьютерной программы. К основным исходным данным симулятора относятся количество узлов в БСС, их размещение, а также количество испытаний. Результатом симуляции является текстовый файл журнала, в котором отражаются все имитируемые события функционирования БСС, а также статистические данные.

Каждому событию в журнале предшествует информация о времени его наступления, а также о

номере узла БСС, к которому относится данное событие. Строки журнала, имеющие одинаковые отметки времени, относятся или к различным узлам, или к различным событиям одного узла.

Например, первая строка фрагмента журнала, представленного на рис. 2, соответствует моменту принятия узлом с номером 8 решения об отправке сообщения ADJUST. Вторая строка соответствует моменту начала физической трансляции этого сообщения передатчиком. В данном примере случайная величина задержки доступа к каналу оказалась равной нулю. Следующие четыре строки соответствуют приему переданного восьмым узлом широкополосного сообщения узлами с номерами 4, 7, 9 и 11. Первые три узла, принявшие сообщение, проигнорировали его по причинам, связанным с их внутренним состоянием.

Узел с номером 11 принял решение о том, что последовательность принятых байтов является адресованным ему (в данном случае не только ему)

сообщением ADJUST. На основании этих и ранее полученных данных узел с номером 11 выполнил коррекцию показания своих часов на 2804 единицы таймера. Кроме того, узел с номером 11 сменил свое состояние.

Статистические данные симуляции (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, гистограмма) формируются для случайных величин, как полученных в результате выполнения нескольких испытаний, так и соответствующих различным узлам в одном испытании. В число таких величин входят количество серверов синхронизации, уровень сервера и т.д.

4. Результаты имитационного моделирования

Количество серверов синхронизации. Графики зависимости математического ожидания количества серверов от общего количества узлов БСС для разной площади размещения представлены на рис. 3.

```

9.993852 Node 8: Send ADJUST
9.993852 Node 8: TX (NB=0): 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 4: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 7: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 9: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 11: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 11: Receive ADJUST
9.995100 Node 11: Adjust time: 2804
9.995100 Node 11: INITSYNC2 --> SYNC
9.995100 Node 12: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 15: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 17: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 19: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.995100 Node 19: Receive ADJUST
9.995100 Node 19: Adjust time: 2795
9.995100 Node 19: INITSYNC2 --> SYNC
9.995100 Node 20: RX: 08 00 FF FF 04 01 FF 03 00 00 00 00 00 00
9.997314 Node 9: Send ADJUST
9.997826 Node 9: TX (NB=0): 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 4: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 4: Receive ADJUST
9.999074 Node 4: Adjust time: 235
9.999074 Node 4: INITSYNC2 --> SYNC
9.999074 Node 7: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 7: Receive ADJUST
9.999074 Node 7: Adjust time: 229
9.999074 Node 7: INITSYNC2 --> SYNC
9.999074 Node 8: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 12: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 15: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 17: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 18: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 20: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00
9.999074 Node 28: RX: 09 00 FF FF 04 01 FF 00 00 00 00 00 00 00

```

Рис. 2. Фрагмент журнала

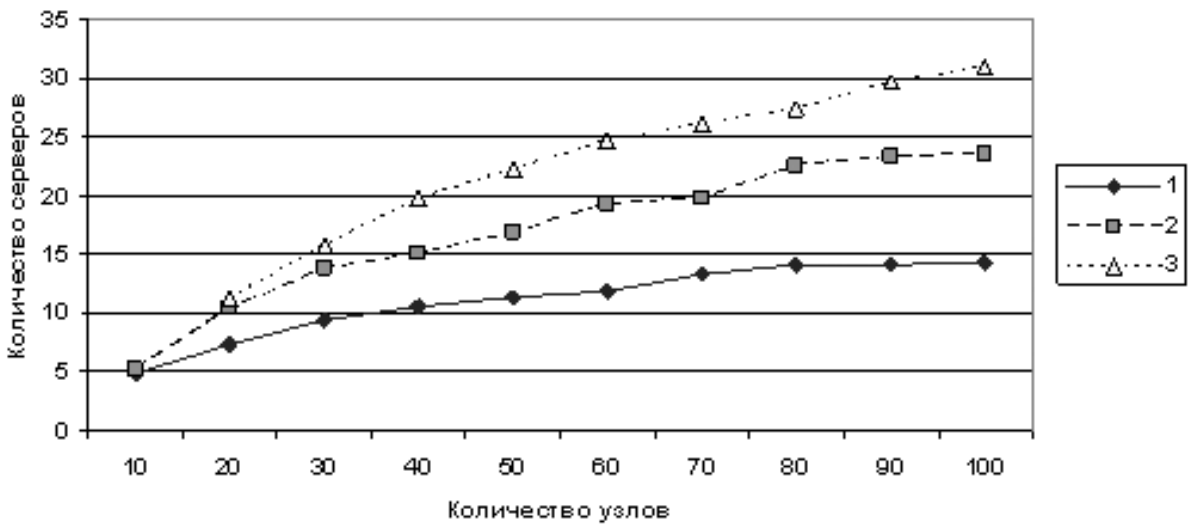


Рис. 3. Графики зависимости количества серверов синхронизации от количества узлов: 1 — площадь размещения узлов 1000×2000 м; 2 — площадь размещения узлов 2000×2000 м; 3 — площадь размещения узлов 2500×2500 м. Для площади 2500×2500 м создать связную сеть из 10 узлов не удалось

Отметим, что в соответствии с реализованным в имитационной модели алгоритмом не все узлы, сообщающие о себе, что они являются серверами синхронизации, на самом деле синхронизируют другие узлы. Это связано с тем, что при потере синхронизации узел не оповещает об этом свой сервер синхронизации. Впоследствии узел должен восстановить синхронизацию, но для этого может быть выбран другой сервер.

Уровень сервера синхронизации. График зависимости среднего значения уровня сервера от размера стороны квадратной площади размещения узлов приведен на рис. 4. Данный график получен по результатам 30 реализаций БСС, состоящей из 30 узлов.

Гистограмма среднего уровня узла для БСС из 30 узлов, размещенных на квадратной площади 2000×2000 м, приведена на рис. 5. Математическое ожидание уровня узла равно 3,676, среднеквадратическое отклонение равно 2,257.

Задержка доступа к каналу. Гистограмма задержки доступа к каналу представлена на рис. 6. Данные соответствуют 900 сообщениям. Случаи, в которых сообщение так и не было отправлено, не учитывались. Абсолютные величины задержек на данной гистограмме показывают весьма значительную загрузку сети, так как при невысокой загрузке задержка не превышает 2,24 мс, что следует из алгоритма CSMA-CA.

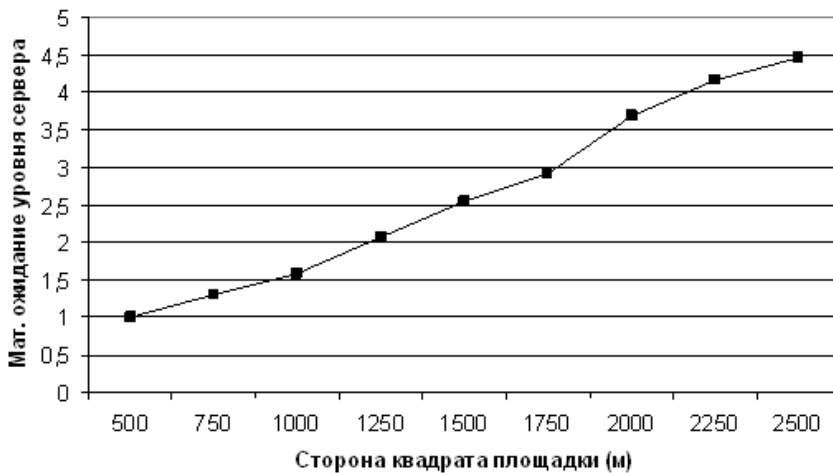


Рис. 4. График зависимости математического ожидания уровня сервера от физического размера площади размещения узлов

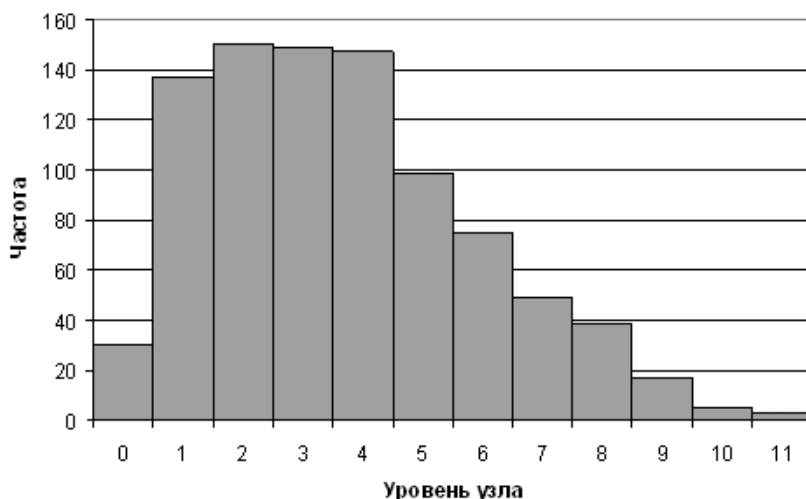


Рис. 5. Распределение уровня узла

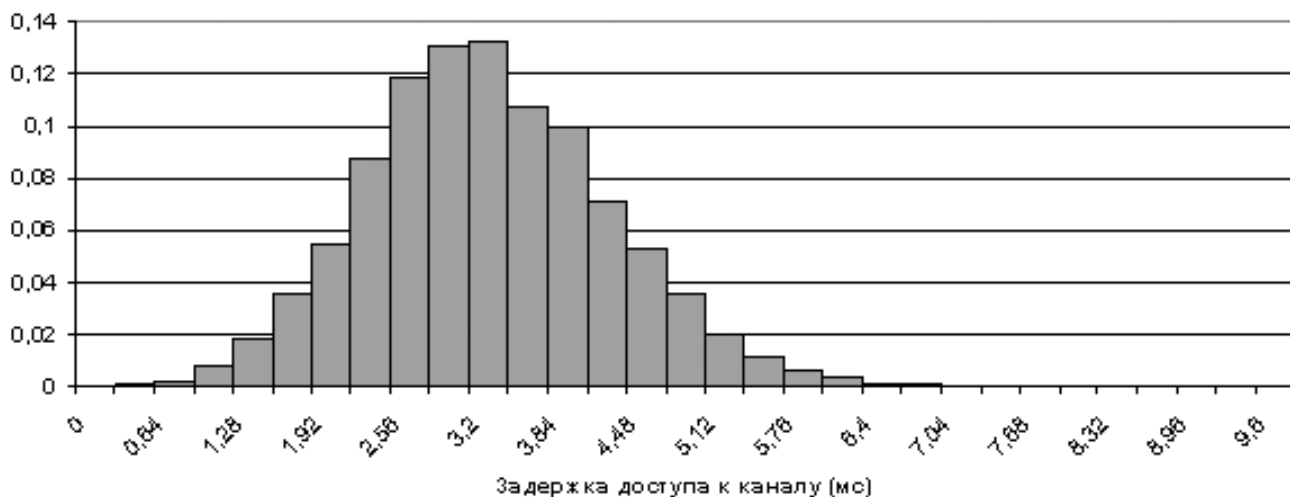


Рис. 6. Распределение задержки доступа к каналу

Выводы

Реализован имитационный уровень модели БСС СЭ СШВ, предложенный в работе [3], позволяющий определять параметры сети, зависящие от топологии и нагрузки. К таким параметрам относятся: 1) задержка доступа к каналу; 2) количество сообщений, необходимых для передачи узлами сети собранной информации; 3) количество серверов синхронизации. Применение имитационного моделирования для определения этих параметров позволяет избежать проведения натурных экспериментов при создании каждой БСС.

Библиографический список

1. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети с режимом сбережения энергии // Материалы междунауч.-практ. конф. «Информационные технологии и информационная безопасность в науке,

технике и образовании ИНФОТЕХ-2009». Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. С. 311—312.

2. Терентьев М.Н. Метод синхронизации узлов беспроводных сенсорных сетей с режимом сбережения энергии // Труды третьей международной конференции «Системный анализ и информационные технологии САИТ-2009». М., 2009. С. 53.

3. Терентьев М.Н. Модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т.16. № 4.

4. Стандарт IEEE 802.15.4.