

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

Максим Николаевич ТЕРЕНТЬЕВ родился в 1966 г. в городе Москве. Старший преподаватель МАИ. Основные научные интересы — в области беспроводных сенсорных сетей, операционных систем, САПР. Автор 11 научных работ. E-mail: m-te@yandex.ru

Maxim N. TARENTIEV, was born in 1966, in Moscow. He is a Senior Assistant Professor at the MAI. His major research interests are in wireless sensor networks and operating systems. He has published 11 technical papers. E-mail: m-te@yandex.ru

Рассматривается проблема увеличения срока функционирования узлов беспроводных сенсорных сетей с автономным невозобновляемым источником питания за счет чередования активных фаз и фаз сна. Предложена математическая модель беспроводных сенсорных сетей с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени. Для обеспечения возможности коммуникации между узлами предложен метод синхронизации шкал времени узлов.

A problem of lifetime increasing is discussed for nodes of wireless sensor networks using autonomous non-renewable power supply with alternation of active and sleeping time segments. A mathematical model is suggested for the wireless sensor networks with energy saving and synchronization of time scales. A time scale synchronization technique is developed to allow communications between network nodes.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, БСС, источник питания, математическая модель, сбережение энергии, синхронизация, шкала времени, прогноз, коррекция, таймер.

Key words: wireless sensor networks, WSN, power supply, mathematical model, energy saving, synchronization, time scale, forecast, correction, timer.

Основным назначением беспроводных сенсорных сетей (БСС) является сбор поставляемой датчиками информации о параметрах окружающей среды и передача этой информации внешнему компьютеру или сети. Типовые БСС представляют собой множество автономных маломощных узлов, взаимодействующих путем обмена сообщениями по радио. Узлы БСС имеют в своем составе микропроцессор, приемник-передатчик, датчики и источник питания (ИП). Один из узлов, называемый координатором, управляет работой сети. Координатор, как правило, также является шлюзом, обеспечивающим обмен данными между БСС и внешним компьютером или сетью [1].

Вследствие автономности узлов их обслуживание невозможно, поэтому срок функционирования узла t_{LC} ограничен запасом энергии его ИП. Типичный узел при непрерывной работе исчерпывает ресурс ИП за два-четыре дня. Для увеличения срока функционирования отдельных узлов и БСС в целом могут применяться как мощные химические ИП, так и ИП, основанные на извлечении энергии из окружающей среды (преобразование

энергии солнечного света, тепла, колебаний и напряжений конструкции и т.п.), но это влечет за собой увеличение размеров и стоимости узлов БСС.

В связи со сказанным, актуальной становится проблема увеличения срока службы узлов БСС за счет минимизации расходования заряда ИП узлов при сохранении всех остальных требований к сети. Основными предпосылками для этого являются следующие факторы:

- 1) узлы большую часть времени проводят в состоянии ожидания;
- 2) компоненты узлов допускают перевод в режим сниженного потребления энергии.

Основываясь на данных факторах, можно построить БСС, главным принципом функционирования которых является чередование активных фаз работы и фаз сна узлов. В этом случае *активной фазе* соответствует режим полного энергетического обеспечения узла, а *фазе сна* — режим сниженного потребления энергии. Такие БСС называют БСС с режимом сбережения энергии [2].

Большую часть времени узлы БСС с режимом сбережения энергии проводят в состоянии ожидания. Из состояния ожидания узлы выводятся либо

по истечении заданного интервала времени, либо при получении сообщений по радио от соседнего узла. На активной фазе каждый из узлов опрашивает свои датчики и соседние узлы и передает полученную информацию об измерениях внешнему потребителю или соседним узлам БСС. По окончании активной фазы узел снова переходит в состояние ожидания.

Особенностью БСС с режимом сбережения энергии является то, что отправленное узлом сообщение может быть принято другими узлами только в том случае, если они также находятся в активной фазе. В противном случае передаваемое сообщение будет потеряно. Поэтому для сохранения работоспособности БСС с режимом сбережения энергии в целом важнейшей является задача синхронизации смен фаз всех составляющих ее узлов. При этом должна быть обеспечена одинаковая, не ниже заданной для всех узлов БСС вероятность доставки прикладных сообщений при максимальном времени функционирования узла с заданным запасом энергии его источника питания.

В настоящей работе предлагается БСС с режимом сбережения энергии, основанная на следующих принципах синхронизации:

- 1) однозначный выбор эталона времени;
- 2) каскадная синхронизация;
- 3) исключение недетерминированных задержек передачи сообщений;
- 4) коррекция показаний часов в промежутках между сеансами синхронизации.

Далее такая БСС называется *БСС с синхронизацией шкал времени*. Рассмотрим её особенности подробно.

Сбережение энергии узлов БСС

С целью увеличения срока функционирования узлов организуется чередование активных фаз и фаз сна. В заданный момент времени узел переходит в активную фазу длительностью t_A , включает приемник, выполняет необходимые измерения и передает координатору их результаты. По истечении интервала t_A узел переходит в фазу сна длительностью t_W , переводя свою аппаратуру в режим сниженного потребления электрической энергии. При этом $t_A \ll t_W$. Потребление тока в различных фазах работы узла показано на рис. 1.

Так как длительность фазы сна t_W может быть относительно велика, а разрядность таймера-счетчика микроконтроллера ограничена, во время фазы сна происходят прерывания по переполнению таймера-счетчика, на обработку которых затрачивается время t_{int} . При постоянном напряжении питания вместо расхода энергии ИП можно вести речь о расходе его заряда. Расход заряда q за один период работы $t_A + t_W$ составляет

$$q = (I_A + I_{RX})t_A + (I_W + I_{OFF} + (I_A - I_W)f_{int}t_{int})t_W, \quad (1)$$

где f_{int} — частота прерываний по переполнению таймера-счетчика.

Таким образом, срок функционирования узлов БСС при заданном заряде ИП (без учета эффектов саморазряда и восстановления заряда) составляет

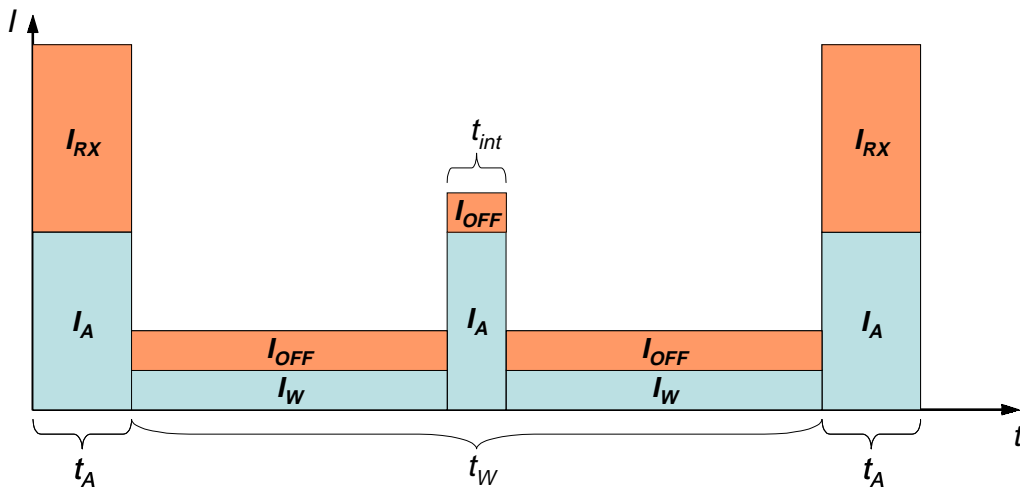


Рис. 1. Потребление энергии узлом в различных фазах работы:

I_A — ток, потребляемый микропроцессором в активной фазе; I_W — ток, потребляемый микропроцессором в фазе сна; I_{RX} — ток, потребляемый приемником-передатчиком при приеме;
 I_{OFF} — ток, потребляемый приемником-передатчиком в фазе сна; t_{int} — время обработки прерывания от таймера-счетчика

$$t_{LC} = \frac{Q^*}{q}(t_A + t_W), \quad (2)$$

где Q^* — заряд ИП.

Требуемая периодичность сбора информации узлами накладывает следующее ограничение:

$$t_A + t_W \leq t^*. \quad (3)$$

Синхронизация шкал времени

Работу узлов БСС по единому расписанию можно обеспечить благодаря синхронизации их часов. При синхронизации узлы получают сообщения, содержащие эталонные отметки времени, и загружают полученную величину в свои собственные часы. Синхронизация часов должна обеспечивать заданную вероятность доставки прикладных сообщений P^* . На рис. 2 показаны возможные моменты отправки сообщения и успешность его доставки.

Вероятность успешной доставки сообщения P связана с отклонением часов следующим выражением:

$$P = 1 - \frac{\Delta\theta}{t_A - t_m}.$$

Следовательно, предельное отклонение часов $\Delta\theta_{\max}$ при заданной минимальной вероятности доставки сообщения составит

$$\Delta\theta_{\max} = (1 - P^*)(t_A - t_m). \quad (4)$$

Эталон времени БСС — координатор

В качестве эталона времени предлагается использовать координатор. Такой подход делает выбор однозначным и возможен в любой БСС. Будем

называть координатор *сервером синхронизации* нулевого уровня. При необходимости координатор может быть синхронизирован с внешним источником точного времени. В каждой активной фазе координатор начинает сеанс синхронизации, рассылая широкоэвещательное сообщение, содержащее его показание часов θ_i^* .

Каскадная синхронизация

Не все узлы БСС могут получать эталонные отметки времени непосредственно от координатора. В случае необходимости любой синхронизированный узел в состоянии выполнять функции сервера синхронизации. Уровень такого сервера синхронизации будет на единицу больше уровня сервера, от которого был синхронизирован данный узел.

Исключение недетерминированных задержек передачи сообщений

Для того чтобы полученная узлом во время сеанса синхронизации эталонная отметка времени θ_i^* не устарела, должны быть исключены задержки, возникающие при передаче сообщений по радио. Эти задержки показаны на рис. 3.

На основе анализа этих задержек предлагаются следующие способы их исключения. Задержки d_s и d_r должны быть исключены путем реализации метода синхронизации на возможно более низком уровне стека протоколов БСС. Задержкой d_p предлагается пренебречь вследствие ее малости. Задержка d_a не может быть устранена, но ее фактическая величина может быть измерена и передана синхронизируемым узлам дополнительным сообщением.

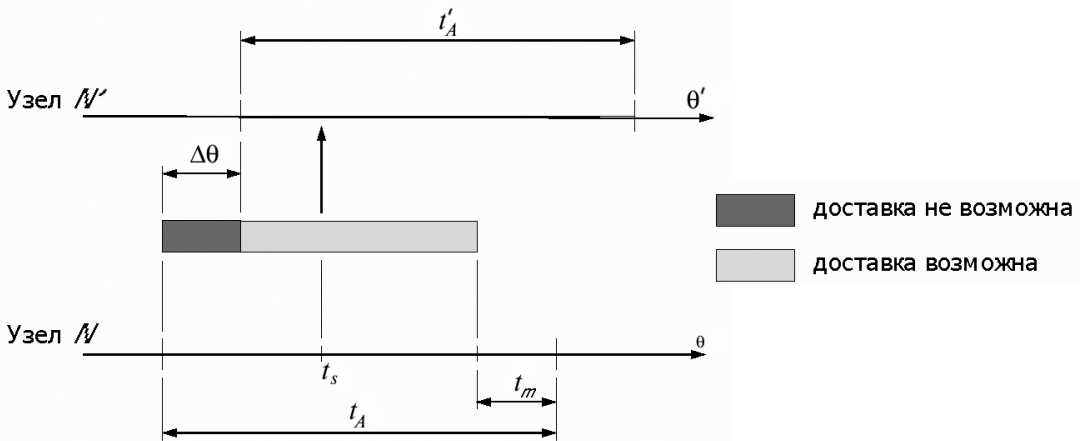


Рис. 2. Связь между отклонением часов узлов и вероятностью доставки сообщения. Узел N начинает отсылку сообщения узлу N' в момент времени t_s . Шкалы времени имеют отклонение $\Delta\theta$. Длительность трансляции сообщения составляет t_m

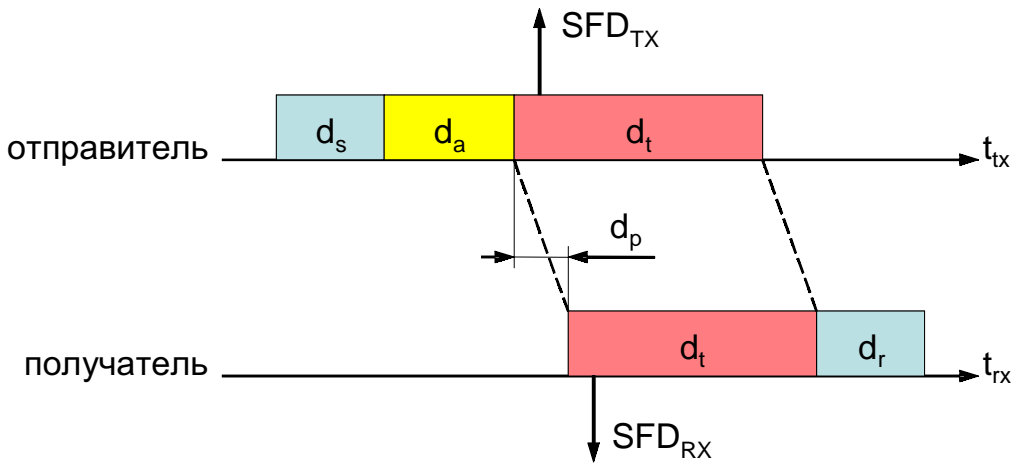


Рис. 3. Задержки, возникающие при передаче сообщений в БСС:

d_s — задержка отправки; d_a — задержка доступа к среде; d_p — задержка распространения; d_t — длительность трансляции; d_r — задержка получения сообщения; SFD_{TX} и SFD_{RX} — моменты прерываний по передаче и получению символа SFD соответственно

Коррекция показаний часов в промежутках между сеансами синхронизации

С целью повышения точности часов узлов предлагается осуществлять их коррекцию на основе данных предыдущих синхронизаций. Для этого после сеанса синхронизации с номером n должен быть вычислен коэффициент дрейфа локальных часов S_n относительно эталона:

$$S_n = \frac{\theta_n - \theta_{n-1}^*}{\theta_n^* - \theta_{n-1}^*}, \tag{5}$$

где θ_n — показание локальных часов в момент данной синхронизации; θ_n^* , θ_{n-1}^* — показание эталон-

ных часов в момент текущей и предыдущей синхронизации соответственно. Вычисленный коэффициент дрейфа должен применяться к показанию локальных часов $\theta(t)$ для получения скорректированного значения времени $\hat{\theta}(t)$:

$$\hat{\theta}(t) = \theta(t)S_n. \tag{6}$$

Вычисление коэффициента дрейфа и его использование для коррекции часов показано на рис. 4.

Чтобы найти предельно возможный интервал между синхронизациями t_w , проанализируем два фактора, препятствующие сохранению синхронизи-

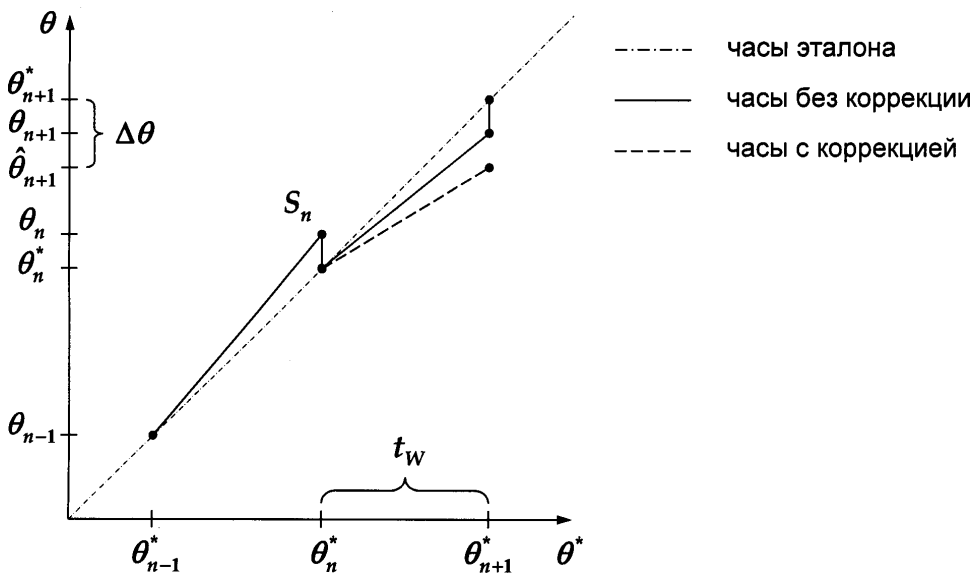


Рис. 4. Коррекция показания часов на основе оценки коэффициента дрейфа;

θ^* — шкала времени эталона; θ — шкала времени локальных часов

рованного состояния шкал времени узлов. Первый фактор — погрешность изготовления кварцевых осцилляторов, выражающаяся в том, что при одних и тех же условиях рабочие частоты осцилляторов различаются. Получив оценку коэффициента дрейфа шкалы времени (5) и скорректировав показания часов (6), можно полностью устранить влияние данного фактора. Вторым фактором является нестабильность частоты кварцевого осциллятора.

Рассмотрим составляющие нестабильности частоты кварцевых осцилляторов, влияющие на показания часов [3]. Долговременная нестабильность частоты обусловлена старением компонентов и приводит к крайне медленному изменению частоты осциллятора, не проявляющемуся за период t_W . Оценка коэффициента дрейфа (5) и коррекция показания часов (6) компенсируют долговременную нестабильность частоты. Кратковременная нестабильность частоты, наоборот, проявляется в быстром изменении частоты. Суммарное действие кратковременной нестабильности частоты на интервале t_W является небольшой случайной величиной с нулевым математическим ожиданием. Нестабильности частоты вследствие изменения нагрузки и изменения напряжения питания для узлов БСС отсутствуют. Таким образом, основной вклад в накопление отклонения показания часов $\Delta\theta$ при условии выполнения коррекции (5), (6) вносит температурная нестабильность кварцевого осциллятора.

Показание часов узла с номером i зависит от времени t и температуры T следующим образом:

$$\theta_i(t) = \int_0^t (1 + \Phi_i(T(\tau))) d\tau = t + \int_0^t \Phi_i(T(\tau)) d\tau,$$

где $\Phi_i(T(\tau))$ — функция аддитивной зависимости частоты осциллятора от температуры. Вид функции

Φ_i определяется типом используемого кварцевого осциллятора. Для обеспечения заданной вероятности доставки сообщений необходимо, чтобы показания часов узла i не отличались от показаний часов узла j на величину, большую $\Delta\theta_{\max}$: $|\theta_i(t) - \theta_j(t)| \leq \Delta\theta_{\max}$. Заменяем данное условие более жестким: потребуем, чтобы абсолютная величина отклонения показания каждых часов $\Delta\theta(t)$ не превосходила половины предельного отклонения (4):

$$|\Delta\theta(t)| \leq \frac{1}{2} \Delta\theta_{\max}.$$

В этом случае отклонение часов любого узла от эталона не превысит предельного.

Рассмотрим случай использования наиболее распространенных кварцевых осцилляторов на основе поверхностных акустических волн (ПАВ). Для таких осцилляторов функция $\Phi_i(T)$ имеет следующий вид:

$$\Phi(T) = -\beta(T - T_0)^2,$$

где β — коэффициент температурной нестабильности осцилляторов на основе ПАВ, имеет отрицательное значение; T_0 — нормальная температура.

Введем обозначение $\Delta T = T - T_0$. Учитывая, что интервал t_W составляет единицы минут, будем считать скорость изменения температуры \dot{T} на интервале t_W постоянной: $T(t) = T_{t=0} + \dot{T}t$. Отклонение часов, работающих в условиях изменения температуры $\theta_j(t)$, от часов, работающих при постоянной температуре $\theta_0(t)$, составляет

$$\Delta\theta(t) = -\beta \left(\Delta T \dot{T} t^2 + \frac{1}{3} \dot{T}^2 t^3 \right).$$

Окончательно получаем

$$\left| \Delta T_{\max} \dot{T}_{\max} t_W^2 + \frac{1}{3} \dot{T}_{\max}^2 t_W^3 \right| \leq -\frac{\Delta\theta_{\max}}{2\beta}, \quad (7)$$

где ΔT_{\max} — предельно возможное отклонение рабочей температуры осциллятора от нормальной температуры T_0 ; \dot{T}_{\max} — максимально возможная скорость изменения температуры. Неравенство (7) ограничивает длительность фазы сна, учитывая возможные температурные колебания среды размещения узлов БСС.

Деятельность узлов во время активной фазы

Определим минимальную длительность активной фазы t_A . Во время активной фазы узлы выполняют три задачи: 1) проведение сеанса синхронизации, 2) выполнение измерений, 3) передача результатов измерений. Первая и вторая задачи могут выполняться параллельно, поэтому при расчете длительности будем учитывать первую задачу, как более долгую. Ограничение минимальной длительности t_A имеет вид

$$t_A \geq k_{MA} (K(N, \Psi)t_m + N_S t_S), \quad (8)$$

где t_S — время трансляции сообщения синхронизации; k_{MA} — коэффициент, учитывающий сниже-

ние пропускной способности БСС при конкурентном доступе к каналу; Ψ — топология БСС; $K(N, \Psi)$ — функция, принимающая значение, численно равное количеству сообщений при сборе результатов измерений. Значение $K(N, \Psi)$ зависит от количества узлов БСС и, что самое главное, от топологии сети. Рассмотрим два крайних случая. Минимальное значение $K = N - 1$ достигается при топологии типа «звезда», а максимальное значение $K = \frac{1}{2} N(N - 1)$ достигается при топологии типа «цепочка». В силу зависимости от фактической топологии значение K должно быть определено экспериментально.

Соотношения (1)–(8) образуют математическую модель БСС с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени. Рассмотрим применение данной модели для определения основных параметров БСС. Проектируемая БСС предназначена для сбора информации об условиях труда (температура воздуха и освещенность) в сборочном цехе авиационного завода. Требуется организовать БСС с режимом сбережения энергии и определить срок функционирования узлов при использовании ИП с зарядом $2000 \text{ мА} \cdot \text{ч}$.

Определим необходимые исходные данные.

1. Выберем места размещения и число узлов БСС с учетом их мощности, параметров помещения, конфигурации контролируемых зон и необходимого резервирования: $N = 32$. Периодичность сбора информации всеми узлами установим не реже $t^* = 300 \text{ с}$. Минимальную вероятность доставки сообщений выберем не хуже $P^* = 0,99$.

2. На основе анализа спецификации оборудования определим параметры узлов БСС: частота прерываний по переполнении таймера-счетчика $f_{int} = 2 \text{ Гц}$, время обработки прерываний $t_{int} = 6,25 \text{ мкс}$, ток потребления процессора в активном режиме $I_A = 8,5 \text{ мА}$, ток потребления процессора в режиме сна $I_W = 8,2 \text{ мкА}$, ток потребления приемника-передатчика в режиме приема $I_{RX} = 19,7 \text{ мА}$, ток потребления приемника-передатчика в режиме сна $I_{OFF} = 1 \text{ мкА}$. Коэффициент температурной нестабильности осциллятора $\beta = -0,04 \text{ ppm}/^\circ\text{C}^2$, нормальная температура осциллятора $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

3. Параметры решаемой задачи и окружающей среды: время трансляции прикладного сообщения (с учетом обязательных заголовков) $t_m = 1024 \text{ мкс}$,

время трансляции сообщения синхронизации $t_s = 640 \text{ мкс}$. Коэффициент снижения пропускной способности БСС $k_{MA} = 2,4$ (определяется экспериментально). Топология проектируемой сети обеспечивает $K = 8N$ (определяется экспериментально). Предельное отклонение температуры от нормальной $\Delta T_{max} = 20^\circ\text{C}$, предельная скорость изменения температуры $\dot{T}_{max} = 6^\circ\text{C}/\text{ч}$.

При помощи реализующего данную модель программного обеспечения выполним расчет основных параметров БСС с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени. Результаты расчета: длительность активной фазы $t_A = 1,022 \text{ с}$ и длительность фазы сна $t_W = 298,978 \text{ с}$. Расчетный срок функционирования узлов при имеющемся ИП составляет $t_{LC} = 790,815 \text{ суток}$.

Выводы

Предложены математическая модель и метод синхронизации, позволяющие создать БСС с режимом сбережения энергии, обеспечивающую заданные значения времени функционирования узлов, расхода энергии ИП и вероятности доставки прикладных сообщений. Управляющими параметрами модели, выбираемыми при проектировании БСС, являются длительности активной фазы t_A и фазы сна t_W . Критериальными параметрами являются срок функционирования БСС t_{LC} , минимальная вероятность доставки прикладных сообщений P^* , расход заряда ИП Q^* . Так, например, при решении задачи увеличения срока функционирования БСС в качестве критерия должен быть выбран параметр t_{LC} при заданных значениях минимальной вероятности доставки сообщений и заряда ИП. Внешние параметры, присутствующие в модели как константы, определяются из спецификации оборудования или экспериментально, что наиболее характерно для учета влияния среды размещения БСС.

Библиографический список

1. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008.
2. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks // Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences, January 2000.
3. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы: Справ. пособие. — М.: Радио и связь, 1984.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 16.07.2009