

УДК 621.39

В.А. Краснобаев, Р.А. Горбенко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Рассматривается двухуровневая древовидная модель функционирования беспроводной сенсорной сети, которая позволяет оценить ее срок службы и энергоэффективность. Также проведен анализ основных параметров сети, которые влияют на ее производительность. Путем изменения описанных величин можно добиться оптимизации сети таким образом, чтобы достичь для нее оптимального срока службы.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, передача данных, оптимизация срока службы сети.

Введение

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из сотен или тысяч сенсорных узлов, распределенных на местности. Каждый узел – это автономное миниатюрное вычислительно-коммуникационное устройство, которое имеет специфические характеристики и способно к межузловой ретрансляции данных. После развертывания БСС может регулировать свои параметры и менять логику работы без вмешательства оператора в ответ на изменение внешних факторов (например, таких как загрузка, изменение структуры из-за повреждения узлов, из-за уменьшения энергии источника питания, из-за наличия ошибок при передаче сообщений и др.) [1]. Большинство БСС используют традиционную клиент-серверную технологию, при которой каждый сетевой узел (радиосенсор) передает собранные данные в центр сбора и обработки информации (рис. 1) [2].

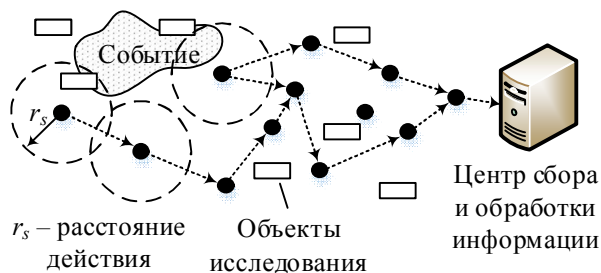


Рис. 1. Обобщенная схема БСС

Узлы работают под управлением операционной системы (ОС) TinyOS с открытым исходным кодом. Созданная специально для БСС и написана на языке NesC, она имеет компонентную структуру, что позволяет обеспечивать минимальный размер кода и делает работу программ максимально эффективной. Сейчас TinyOS используется во многих аппаратных платформах и многочисленных сенсорных устройствах.

TinyOS заметно отличается от ОС общего назначения (UNIX, Windows, MAC и пр.), так как не нуждается во встроенной поддержке интерфейса пользователя.

Реализованная в TinyOS модель событий дает возможность управлять питанием на низком уровне, что позволяет экономить энергопотребление сенсоров [3]. Так как, срок службы БСС напрямую зависит от используемого источника энергии (который чаще всего невозможно заменить или подзарядить во время эксплуатации), анализ энергоэффективности БСС является актуальной задачей исследований.

Основная часть

Цель данной работы – построение модели БСС а также проведение ее анализа относительно двух основных критериев: энергоэффективности и срока службы сети. Под энергоэффективностью БСС понимают количество успешно переданных пакетов на затраченную единицу энергии. Коллизии на канальном подуровне контроля доступа к среде передачи (MAC – medium access control), повторная передача при потерях и искажениях пакетов, не оптимально выбранный маршрут – уменьшают энергоэффективность сети [4]. Под сроком службы БСС подразумевают:

- продолжительность функционирования определенного узла до полного израсходования батареи питания;
- или продолжительность работы сети с гарантированным качеством обслуживания (QoS – Quality Of Service);
- или продолжительность работы целостной сети до момента разбиения ее на множество сетей.

При создании модели приняты следующие исходные предположения:

1. Все узлы N в сети организуют двухуровневую древовидную структуру. Сенсорные узлы нижнего уровня будем называть окончательными узлами. На верхнем уровне N_1 главный узел формирует k -древовидную топологию с $h+1$ уровнями (или h транзитными участками) от центра сбора и обработки информации, где каждый главный узел уровня i подсоединяет k дочерние узлы в уровне $i+1$ к их родительским узлам уровня $i-1$ (рис. 2). Каждый главный узел верхнего уровня формирует локальный поток

данных, а также передает данные от своих оконечных узлов. Каждый главный узел насчитывает с оконечных узлов. Оконечный узел низшего уровня N_2 формирует поток данных и передает его непосредственно к главному узлу в пределах одного пролета (хопа). Если главный узел лежит на уровне i , предполагается, что его оконечные узлы также лежат на этом уровне.

2. Все сенсорные узлы расположены с одинаковой плотностью на исследуемой территории. Они имеют достаточно большой объем буферной памяти чтобы исключить возможность потери данных из-за переполнения буфера. Каждый узел формирует поток сообщений, которые удовлетворяют требованиям распределения Пуассона. Интенсивность поступления сообщений обозначена как f , а общее количество передаваемых данных в этот момент – как V бит. Обозначим через O количество служебных бит в структуре пакета данных длиной L бит. Следовательно, количество пакетов рассчитывается как $n_p = V / (L - O)$. Соответствующая скорость передачи данных каждым сенсорным узлом i находится по формуле $r_i = n_p \cdot f = [V / (L - O)]f$.

3. Каждый узел высшего уровня (главный узел) получает данные от других главных узлов k , их оконечных узлов c , также как и локально сформированные данные. Главный узел объединяет или сжимает только собственные данные и данные оконечных узлов. Необработанный поток данных от узла i (r_i) сжимается до $0 \leq r'_i \leq r_i$. Примем эффективность объединения (сжатия) равной $a = (r_i - r'_i) / r_i$.

4. Предусмотрен механизм контроля управления потоком данных между центром сбора и сенсорными узлами, что гарантирует отсутствие перегрузки. Поэтому суммарная скорость передачи данных r_c от всех узлов сети должна быть меньше чем максимальная пропускная способность R главного узла уровня 1:

$r_c < R$. При этом возможны два режима работы узлов сети: равнозначный и максимально-минимальный. При равнозначном режиме обеспечивается одинаковая скорость передачи для всех узлов. При максимально-минимальном режиме скорость передачи узлов пропорционально увеличивается с приближением к центру сбора и обработки информации.

5. Каждый узел имеет количество энергии E . Определим срок службы сети как временной интервал от начала и до момента, когда главный узел на уровне 1 израсходует всю свою энергию.

6. Все узлы стационарны без адаптивного управления питанием.

Основываясь на выше изложенном, общее количество узлов сети вычисляется по формуле:

$$N = N_1 + N_2 = (1 + c)N_1 = (1 + c) \sum_{i=1}^{h+1} k^{i-1} \quad (1)$$

Определим среднее количество повторной передач пакетов. Пускай b_e и p_e – вероятность битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) и ошибки передачи пакета (PER – Packet Error Rate) соответственно. Основываясь на то, что длина пакета равна L бит, вероятность ошибки передачи пакета без механизма коррекции ошибок равна

$$p_e = 1 - (1 - b_e)^L \quad (2)$$

Ошибка передачи пакета приводит к повторной передаче на MAC уровне. Повторная передача улучшает надежность сети, но увеличивает задержку. Предположим, что максимальное количество повторных передач равно K . Среднее количество повторных передач вычисляется следующим образом

$$n_r = \sum_{i=1}^{K-1} i p_e^i (1 - p_e) + K p_e^K \quad (3)$$

Если максимальное количество повторных передач не ограничивается, то есть $K = \infty$, то

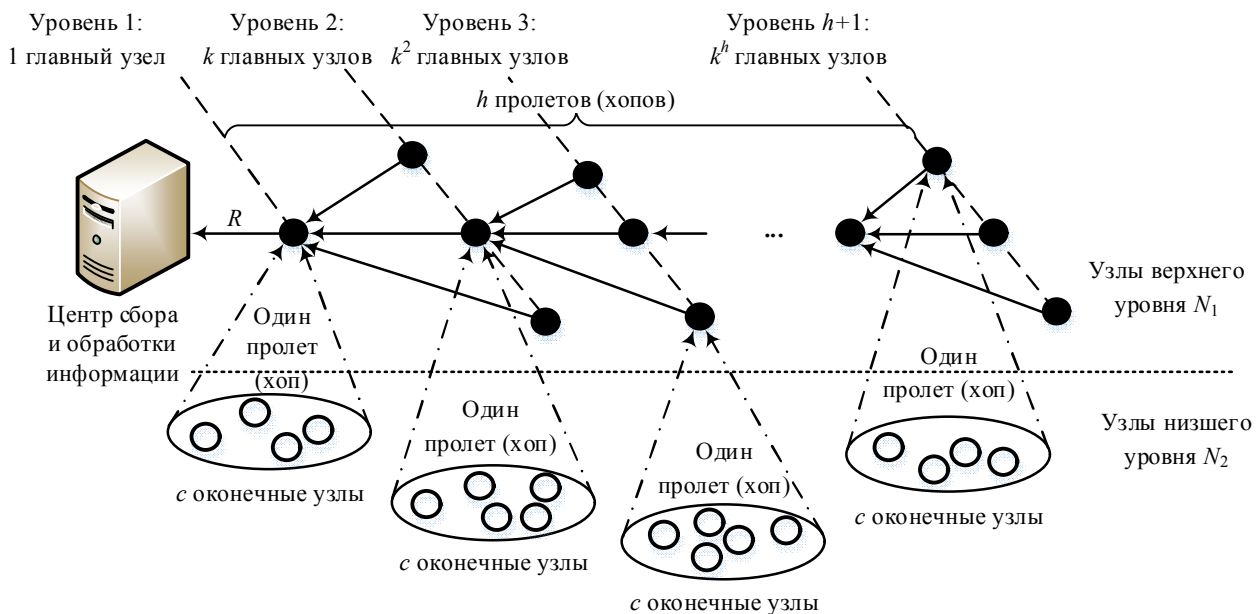


Рис. 2. Двухуровневая древовидная структура смоделированной БСС

$$n_r = \sum_{i=1}^{\infty} i p_e^i (1-p_e) = \frac{p_e}{1-p_e}. \quad (4)$$

В каждом пролете для передачи данных потребляется энергия: передатчика e_i , при коллизиях на MAC уровне в режимах ожидания и прослушивания e_m , при вычислениях e_c . Энергия передатчика e_i зависит от расстояния d и длины пакетов L . Затрачиваемая энергия e_m определяется количеством узлов $(c+1)$ в пределах одного пролета (хопа) и интенсивностью нагрузки (принимая во внимание использование механизма случайного доступа с обнаружением коллизий). Затрачиваемую энергию e_c на вычисления процессором считаем постоянной. Следовательно, общее потребление энергии на передачу пакетов в пределах одного пролета (хопа) равняется

$$e = e_i + e_m + e_c. \quad (5)$$

Для равнозначного режима работы сети каждый узел имеет одинаковую скорость передачи данных, $r_i = n_p \cdot f$. Отсюда, суммарная скорость передачи данных рассчитывается

$$r_c = r(1-a)N = n_p \cdot f(1-a)N. \quad (6)$$

Для максимально-минимального режима работы сети, каждый узел для уровня j имеет одинаковую скорость передачи данных r^j , а скорость передачи данных на другом уровне пропорциональна самому уровню:

$$\frac{j+1}{j} \approx \frac{r^j}{r^{j+1}} = \frac{n_p f_j}{n_p f_{j+1}} = \frac{f_j}{f_{j+1}} (1 \leq j \leq h+1), \quad (7)$$

где f_j – интенсивность поступления сообщений сенсорных узлов на уровне j . Следовательно, суммарная скорость передачи данных может быть сформулирована как

$$r_c = \sum_{j=1}^{h+1} r^j (1-a) \left[k^{j-1} (c+1) \right] = \sum_{j=1}^{h+1} \frac{r^1}{j} (1-a) \left[k^{j-1} (c+1) \right] = n_p f^1 (1-a) (c+1) \sum_{j=1}^{h+1} \frac{k^{j-1}}{j}. \quad (8)$$

Определим срок службы сети. Предположим, что все сенсорные узлы начали работать в момент времени $t_0 = 0$, а к моменту t_1 первой будет полностью исчерпана энергия главного узла уровня 1. Срок службы сети приближенно равен $T_1 = t_1 - t_0$. Здесь передвижения и возможность управления питанием узлов были проигнорированы. Величина T_1 может быть использована в качестве нижней границы времени жизни сети.

Для равнозначного режима работы сети:

$$\begin{aligned} (r_c t_1)(1+n_r)e &= E \Rightarrow t_1 = E / (r_c e(1+n_r)) = \\ &= \frac{E}{[n_p f(1-a)N](1+n_r)(e_t + e_m + e_c)} \Rightarrow \\ \Rightarrow T_1 &= \frac{E}{[n_p f(1-a)N](1+n_r)(e_t + e_m + e_c)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для максимально-минимального режима,

$$\begin{aligned} (r_c t_1)(1+n_r)e &= E \Rightarrow t_1 = \frac{E}{r_c e(1+n_r)} \Rightarrow \\ \Rightarrow t_1 &= \frac{E}{(1+n_r)(e_t + e_m + e_c)} \times \\ &\times 1 / \left(n_p f^1 (1-a) (c+1) \sum_{j=1}^{h+1} \frac{k^{j-1}}{j} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow T_1 &= \frac{E}{(1+n_r)(e_t + e_m + e_c)} \times \\ &\times 1 / \left(n_p f^1 (1-a) (c+1) \sum_{j=1}^{h+1} \frac{k^{j-1}}{j} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Из (9) и (10) видно, что срок службы сети зависит от интенсивности поступления сообщений f , эффективности объединения (или сжатия) a , длины пакета L , вероятности ошибки пакетов p_e . Следовательно, при проектировании протоколов передачи данных и развертывании БСС, необходима оптимизация указанных параметров для увеличения срока службы сети. Выразим из (9) показатель энергоэффективности E_i

$$E_i = \frac{L-O}{(1+n_r)(e_t + e_m + e_c)}. \quad (11)$$

Для примера, возьмем что $e_t = 100 \cdot L$ нДж, $e_m = 200$ нДж и $e_c = 100$ нДж, тогда

$$E_i = \frac{(L-O)(1-b_e)^L}{100L + 300}. \quad (12)$$

Согласно [5], в структуре кадра данных кроме полезной информационной нагрузки содержится и служебная информация. Проведем расчет энергоэффективности E_i по формуле (12) для различных значений L относительно максимального 45 байт (рис. 3) и минимально возможного 15 байт (рис. 4) значения служебных данных O при трех уровнях BER: 0,01; 0,001; 0,0005.

При увеличении L , количество пакетов n_p для передачи данных уменьшается, что приводит к увеличению срока службы сети T_1 . В тоже время увеличение длины пакета L может привести к более высокой вероятности ошибки пакетов p_e и, следовательно, к возрастанию повторных передач пакетов n_r , что в свою очередь уменьшит T_1 .

Зависимо от вероятности битовой ошибки b_e и объема передаваемой информации, длина пакета L может быть оптимизирована таким образом, чтобы достичь оптимального срока службы сети.

Выводы

Так как ключевым показателем БСС по-прежнему остается время их автономной работы от батарей, важной задачей является выбор эффективного протокола передачи данных, который позволит оптимизировать потребление энергии сети.

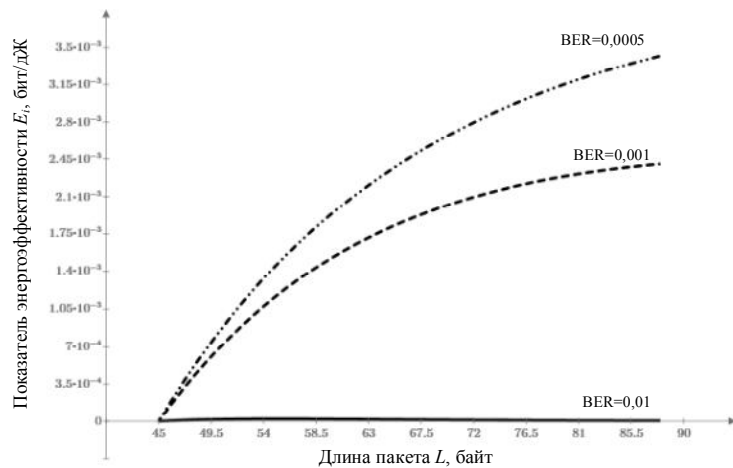


Рис. 3. Зависимость энергоэффективности от длины поля данных L (O = 45 байт)

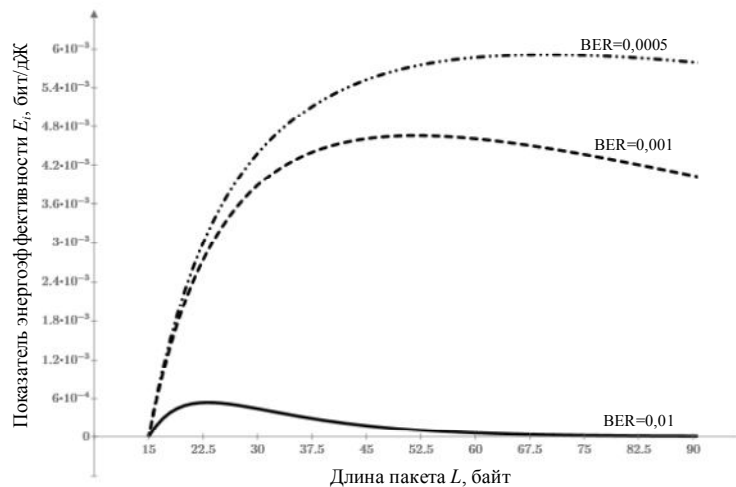


Рис. 4. Зависимость энергоэффективности от длины поля данных L (O = 15 байт)

Дальнейшее направление исследований целесообразно направить на повышение пропускной способности и улучшение энергоэффективности сети в зависимости от вероятности битовой ошибки, при использовании корректирующих кодов.

Список литературы

1. Phoha S., LaPorta T., Griffin C. *Sensor network operations* // IEEE press, John Wiley & Sons, Inc. – 2006, – 731 p.
2. Akyildiz I. F. *A survey on wireless multimedia sensor networks* / Akyildiz I. F., Melodia T., Chowdhury K. R. // *Computer Netw.* (Elsevier), vol. 51, no. 4, pp. 921–960, Mar. 2007.

3. Philip L, David G. *TinyOS Programming* // Stanford, July 16, 2009. – 142 p.

4. Schurgers C., Tsiatsis V., Ganerival S., Srivastava M. *Optimizing Sensor Networks in Energy-Latency-Density Design Space* // *IEEE Trans. on Mobile Comp.*, January 2002. – P. 70–80.

5. *IEEE Std 802.15.4-2011, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 16 June 2011.

Поступила в редколлегию 22.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Л. Ляхов, Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Полтава.

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

В.А. Краснобаєв, Р.А. Горбенко

Розглянута дворівнева деревоподібна модель функціонування бездротової сенсорної мережі, яка дозволяє оцінити її термін служби та енергоефективність. Також проведений аналіз основних параметрів мережі, що впливають на її продуктивність. Шляхом зміни описаних величин можна добитись оптимізації мережі таким чином, щоб вона досягла оптимального терміну служби.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, передача даних, оптимізація терміну служби мережі.

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF THE WIRELESS SENSOR NETWORKS

V.A. Krasnobaev, R.A. Horbenko

The two-tiered tree topology in a wireless sensor network has been analyzed in this article which allows to estimate its system life and energy efficiency. Also analyzed the basic network parameters that affect its performance. It's possible to obtain network optimization by changing of described values for reaching optimal lifetime.

Keywords: wireless sensor networks, data transfer, system lifetime optimization.