

---

УДК 621. 391

И.С. Шостко, Ю.Э. Соседка

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## **АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

*В статье проведен анализ технологии стандарта беспроводной передачи данных IEEE 802.15.4. Рассмотрены технические характеристики устройств, для каждой технологии в отдельности. Сформулированы особенности расчета средней мощности беспроводных устройств и время их работоспособности.*

**Ключевые слова:** *беспроводные сенсорные сети, энергопотребление, передача пакета, мощность.*

### **Введение**

Современные технологии изготовления малогабаритных приемопередающих модулей позволяют

создавать беспроводные сенсорные сети (БСС), с чрезвычайно малым энергопотреблением. Основное назначение таких сетей – сбор по беспроводному каналу связи показаний от множества датчиков

(сенсоров), распределенных в пространстве для последующего накопления, анализа и выдачи управляющих команд. Данные сети применяются:

- в промышленности, для контроля производства товаров;
- в системах обеспечения безопасности и обороны;
- в медицине, для дистанционного биометрического контроля;
- в системах мониторинга окружающей среды;
- при построении системы «Умный дом»;
- для мониторинга местонахождения и управления транспортом.

Ключевым параметром качества БСС является продолжительность работы её элементов в автономном режиме, поэтому при создании подобных систем в первую очередь возникает задача оценки энергопотребления модулей БСС. Разумный выбор элементной базы и ее правильная настройка поможет построить распределенную беспроводную сеть с долгим бесперебойным сроком службы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для построения БСС могут использоваться как открытые промышленные стандарты ZigBee, MiWi, так и проприетарные решения, например Mesh Logic. Все они базируются на стандарте IEEE 802.15.4, который в настоящее время является основным в области сенсорных сетей [1].

Проприетарная платформа Mesh Logic – это российская разработка ученых из одноименной компании «МешЛоджик». Данная технология получила широкое распространение в сетях сбора данных с температурных датчиков и в строительной отрасли.

Технология ZigBee получила широкое распространение во всем мире, благодаря малой стоимости оборудования, низким энергопотреблением узлов, простотой построения самой БСС и совместимости с другими технологиями. Построение БСС на основе технологии ZigBee, так же успешно практикуется и в Украине.

Технология MiWi также как и ZigBee, получила широкое распространение по всему миру, но она немного уступает ей по функциональности. Обе эти технологии применяются в системах «Умный дом», медицине, в охранных системах и т.д.

**Постановка задания.** Далее будет проведён анализ энергопотребления устройств выше перечисленных технологий, работающих по стандарту IEEE 802.15.4.

## Основной материал

### Доступ к каналу

В стандарте IEEE 802.15.4 [2] используется распространенная схема распределенного множественного доступа к общей среде передачи CSMA/CA [3]. Согласно данной схеме, каждый раз, когда устрой-

ству нужно передать данные, оно сначала ждет случайный промежуток времени, после чего определяет занятость канала (Clear Channel Assignment – CCA). Стандартом IEEE 802.15.4 определена следующая формула для расчета времени ожидания:

$$t_{\text{wait}} = R * a\text{UnitBackOffPeriod},$$

где  $R$  представляет собой целое число, выбираемое каждый раз случайным образом из диапазона  $[0...2^{BE} - 1]$ . По умолчанию показатель степени  $BE = 3$ . А  $a\text{UnitBackOffPeriod}$  представляет собой константу, равную 20 символьным периодам. Во всех редакциях стандартах IEEE 802.15.4 для частотного диапазона 2.4 ГГц один символьный период равен 16 мкс. Если канал свободен, устройство передает данные, в противном случае выбирается новое время ожидания. В худшем случае, когда  $R$  выбирается равным 7, время ожидания будет равно 2,24 мс. Время прослушивания канала  $t_{\text{CCA}}$  для определения его занятости постоянно и равно восьми символьным периодам или 128 мкс.

### Формат кадра

Формат кадра IEEE 802.15.4 представлен на рис. 1.

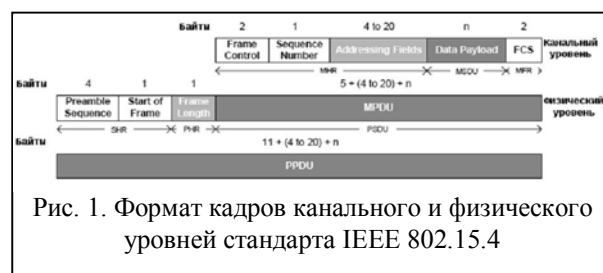


Рис. 1. Формат кадров канального и физического уровней стандарта IEEE 802.15.4

Максимальный размер полезной нагрузки зависит от длины служебных полей кадра. Стандартом оговорена максимальная длина кадра физического уровня  $a\text{MaxPHYPacketSize} = 127$  байт. Если используется минимальный по размеру формат адресации (4 байта), максимальный размер полезной нагрузки равен 112 байтам. При максимальном содержании адресной части полезная нагрузка ограничивается 96 байтами.

Стандарт определяет в частотном диапазоне 2.4 ГГц канальную скорость передачи  $f = 250$  кбит/с. Поэтому время, затрачиваемое на передачу данных, можно вычислить по следующей формуле:

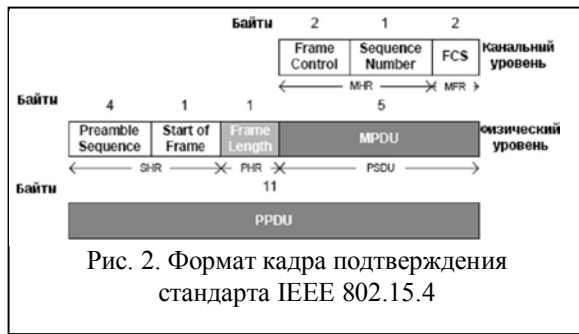
$$t_{\text{data}} = (L + O)/f, \quad (1)$$

где  $L$  – размер пакета в битах,  $O$  (Overhead) – размер служебных полей в битах.

Далее в расчетах мы брали размер полезной нагрузки передаваемого пакета 896 бит, а размер служебных полей пакета равный 120 бит.

### Прием подтверждения

Кадр подтверждения приема данных состоит из 11 байт, его структура показана на рис. 2.



Используя формулу (1), находим время на непосредственную передачу подтверждения:

$$t_{ACK} = 352 \text{ мкс.}$$

Перед отправкой подтверждения есть задержка в 192 мкс, связанная с необходимостью перехода устройства из режима приема в режим передачи. Кроме того, чтобы дать устройствам достаточно времени на обработку принятых данных, в стандарте определены минимальные задержки, которые следуют после кадра подтверждения:

- Для кадров длиной до 18 байт включительно - 18 символьных периодов (288 мкс).
- Для кадров длиной более 18 байт - 40 символьных периодов (640 мкс).

Как правило, эти задержки покрываются за время подготовки к передаче нового кадра.

Таким образом, при передаче каждого кадра устройство проходит четыре различных стадии -

пассивного ожидания (WAIT), прослушивания канала (CCA), передачи кадра (DATA) и приема подтверждения (ACK). Тогда средняя мощность устройства в течение всей процедуры передачи данных, будет равна:

$$P_f = \frac{\left( (I_a \cdot U_p) t_{wait} + (I_{rx} \cdot U_p) t_{CCA} + (I_{tx} \cdot U_p) t_{data} + (I_{rx} \cdot U_p) t_{ACK} \right)}{t_f},$$

где  $t_f = t_{wait} + t_{CCA} + t_{data} + t_{ACK}$ .

Рассчитаем время жизни окончного устройства сети. Пусть рассматриваемое устройство работает с периодом выхода в активный режим  $t_c = 2c$ , при этом его процессор работает на частоте  $f_{proc}$ , одна операция занимает в среднем  $C = 3$  процессорных циклов и требуется выполнить  $M = 5000$  операций для измерений, обработки результатов и подготовки пакета для передачи в сеть. Кроме того, необходимо учитывать время выхода из режима сна  $t_r = 10\text{мс}$ . Тогда время, необходимое для выполнения всех действий в активном режиме, будет равно [4]:

$$t_a = M \cdot C / f_{proc} + t_r.$$

В табл. 1 приведены типовые значения параметров устройств на основе разных технологий, работающих на частоте 2400-2483,5 МГц (стандарт IEEE 802.15.4).

Таблица 1

Начальные значения устройств БСС [5], [6], [7], [8], [9]

Параметр, единица измерения (обозначение)	ZigBee XBee PRO 2.4	ZigBee Texas Instruments CC 2530	ZigBee Jennic JN5139	Mesh Logic	MiWi
1 Частота работы процессора, МГц ( $f_{proc}$ )	16	16	16	8	8
2 Среднее значение коэффициента случайной задержки (R)	3				
3 Ток в режиме приема, мА ( $I_{rx}$ )	40	25	34	24	18
4 Напряжение питания, В ( $U_p$ )	2.8 – 3.4	2.0 – 3.6	2.2 – 3.6	2.7 – 3.6	2.4 – 3.6
5 Ток в режиме передачи, мА ( $I_{tx}$ )	100	34	34	21	22
6 Ток в активном режиме, мА ( $I_a$ )	23	0.105	0.0015	3.7	8
7 Ток в режиме сна, мкА ( $I_s$ )	0.9	1	0.4	9	2
8 Скорость передачи данных, кбит/с.	250	250	250	62.5, 250	250
9 Тип модуляции	O-QPSK	O-QPSK	O-QPSK	GMSK	O-QPSK
10 Кол-во каналов	16	16	16	78	16
11 Ширина полосы $\Delta F$ , МГц	5	5	5	1	5

Далее проведем расчет средней мощности устройств БСС и время их работоспособности при питании от батареи. Для автономной работы БСС чаще всего используются литий-тионилхлоридные батареи (Li/SOCl<sub>2</sub>). Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами батарей:

- Высокая удельная емкость – 400 – 35000 мА·ч.
- Высокое и стабильное напряжение 3,6 В, позволяющее напрямую либо с использованием ре-

гуляторов напряжения питать модули БСС различные типа с номинальным напряжением 2 – 3,6 В.

- Высокая нагрузочная способность при импульсной нагрузке вследствие малого внутреннего сопротивления.

Для расчёта выбрана батарея с начальной энергией  $E_0 \approx 20$  кДж (1,5 А·ч).

**Оконечное устройство**

Время, затрачиваемое непосредственно на передачу данных

$$t_{\text{data}} = \frac{(L + O) \cdot 8}{f}. \quad (2)$$

Время, затрачиваемое на весь процесс передачи кадра

$$t_{\text{frame}} = t_{\text{wait}} + t_{\text{CCA}} + t_{\text{data}} + t_{\text{ACK}}. \quad (3)$$

Среднее время с учетом повторных передач

$$t_{\text{real}} = t_f \left[ (1 - p_e) \sum_{i=1}^{N-1} i p_e^{i-1} + N \cdot p_e^{N-1} \right], \quad (4)$$

при вероятности ошибки при передаче  $p_e = 0.1$  и при коэффициенте повторных передач  $N = 4$ .

Средняя мощность в процессе передачи кадра

$$P_f = \frac{\left( (I_a \cdot U_p) t_{\text{wait}} + (I_{\text{rx}} \cdot U_p) t_{\text{CCA}} + (I_{\text{tx}} \cdot U_p) t_{\text{data}} + (I_{\text{rx}} \cdot U_p) t_{\text{ACK}} \right)}{t_f}. \quad (5)$$

Время, затрачиваемое на обработку данных и выход из режима сна

$$t_a = t_r + M \cdot C / f_{\text{proc}}. \quad (6)$$

Средняя мощность, потребляемая устройством

$$P_{\text{ed}} = \frac{P_f t_{\text{real}} + (I_a \cdot U_p) t_a + (I_s \cdot U_p) (t_c - t_{\text{real}} - t_a)}{t_c}. \quad (7)$$

Время жизни оконечного устройства

$$t_{\text{ed}} = \frac{E_0}{P_{\text{ed}}}. \quad (8)$$

### Работа в режиме ретранслятора

Возьмем ретранслятор, обрабатывающий потоки от  $n = 30$  оконечных устройств. В этом случае  $\lambda_i = 0,5$  для каждого подключенного устройства.

Доля времени, проводимого в режиме приема данных

$$k_{\text{rx}} = \sum_{i=1}^n \tau_i \lambda_i. \quad (9)$$

Доля времени, проводимого в режиме передачи данных

$$k_{\text{tx}} = \sum_{i=1}^n t_i \lambda_i + t_{\text{ACK}} \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (10)$$

Мощность, потребляемая ретранслятором

$$P_r = (I_{\text{tx}} \cdot U_p) k_{\text{tx}} + (I_{\text{rx}} \cdot U_p) k_{\text{rx}} + (1 - k_{\text{tx}} - k_{\text{rx}}) I_{\text{idle}} \cdot U_p$$

при  $I_{\text{idle}} = I_a$ .

Результаты расчета энергопотребления устройств разных технологий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета потребляемой мощности и времени жизни устройств БСС

	<i>Показатели</i>	ZigBee XBee PRO 2.4	ZigBee Texas Instruments CC 2530	ZigBee Jennic JN5139	Mesh Logic	MiWi
1.	Время, затрачиваемое на передачу данных, мс	2,14				
2.	Время, затрачиваемое на весь процесс передачи кадра, мс	3,58				
3.	Время с учетом повторных передач, мс	3,98				
4.	Средняя мощность в процессе передачи кадра, мВт	200	47	55	45	43
5.	Время, затрачиваемое на обработку данных и выход из режима сна, мс	10,94	10,94	10,94	11,88	11,88
6.	Средняя мощность, потребляемая устройством при $t_c = 2$ , мВт	0,75	0,10	0,11	0,17	0,20
7.	Время жизни оконечного устройства $t_{\text{ed}}$ при ( $t_c = 2$ ), дни	308	2374	2107	1334	1138
8.	$t_{\text{ed}}$ при ( $t_c = 1$ ), дни	154	1199	1058	717	576
9.	$t_{\text{ed}}$ при ( $t_c = 0,5$ ), дни	77	603	530	373	290
10.	Доля времени, проводимого ретранслятором в режиме приема данных, мс	0,032				
11.	Доля времени, проводимого ретранслятором в режиме передачи данных, мс	0,065				
12.	Мощность, потребляемая ретранслятором, мВт	80	6,2	7,3	15	22
13.	Время жизни ретранслятора при ( $t_c = 2$ ), дни	3	37	32	16	10

### Выводы

В работе проведена оценка энергопотребления модулей БСС разных производителей, стандарта IEEE 802.15.4.

Предложен метод расчета средней мощности модулей БСС и время их работоспособности в различных режимах функционирования.

Из результатов анализа следует, что минимальные затраты энергии и соответственно максимальную

«живучесть» демонстрируют модули фирмы Texas Instruments работающие по технологии ZigBee.

### Список литературы

1. Шостко И.С. Анализ энергопотребления модулей для беспроводных сенсорных сетей стандарта IEEE 802.15.4 / И.С. Шостко, Ю.Э. Соседка // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн. - техн. сб. – 2014. – № 176. – С. 253 – 257.
2. IEEE 802.15.4d-2009 standard [Электронный ресурс] / Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2009. URL: <http://standards.ieee.org/> (дата обращения: 14.05.2014).
3. Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: protocol design, throughput analysis, and implementation issues / H. Kwon, H. Seo, S. Kim, B.G. Lee // Wireless Communications, IEEE Transactions on. – 2009. – Vol. 8. no. 8. – P. 41.76 – 41.87.
4. Ефремов В.В., Маркман Г.З. "Энергосбережение" и "энергоэффективность": уточнение понятий, система сбалансированных показателей энергоэффективности / В.В. Ефремов, Г.З. Маркман // Известия Томского политехнического университета, 2007. – Т. 311, № 4. – С. 146 – 148.

5. Официальный сайт компании Digi [Электронный ресурс] / URL: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/x-bee-digimesh-2-4> (дата обращения: 21.05.2014).

6. CC2530, однокристальная система (System-on-Chip) для 2.4-GHz IEEE 802.15.4/ZigBee®/RF4CE /// Руководство по беспроводному подключению, 2011. – С. 8.

7. Официальный сайт компании Jennic [Электронный ресурс] / URL: <http://www.jennic.ru/> (дата обращения: 21.05.2014).

8. Баскаков С. Встраиваемые модули MeshLogic для построения беспроводных сенсорных сетей / С. Баскаков // Встраиваемое оборудование. – 2009. – №3. – С. 30 – 32.

9. Сафронов А. Стек протоколов MiWi для беспроводных сетей / А. Сафронов // Новости электроники, 2007. – № 13. – С 29-36.

Поступила в редколлегию 21.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Поповский, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### АНАЛІЗ СПОЖИВАНІ ПОВУЖНОСТІ І ТРИВАЛОСТІ РОБОТИ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

І.С. Шостко, Ю.Е. Соседка

Проводиться аналіз технологій стандарту безпроводової передачі даних. Розраховується середня потужність модулів БСС і час їх працездатності у різних режимах функціонування.

**Ключові слова:** безпроводні сенсорні мережі, енергоспоживання, передача пакету, потужність.

### ANALYSIS OF POWER CONSUMPTION AND AND LONGER OPERATION TIMES OFFLINE ELEMENTS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

I.S. Shostko, J.E. Sosedka

The analysis technology of standard wireless data transmission. Calculated average power of modules WSN and time of their working capacity in different modes of operation.

**Keywords:** off-wire sensory networks, energy consumption, transmission of package, power.