

УДК 621.39

В.А. Краснобаев, Р.А. Горбенко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## МЕТОД МНОГОУРОВНЕВОГО КОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОДОВ В КЛАССЕ ВЫЧЕТОВ

*Проведен анализ структуры кадров передачи данных в беспроводной сенсорной сети. Разработан метод многоуровневого кодирования данных беспроводной сенсорной сети на основе применения кодов в классе вычетов. Предложенный подход объединения данных узлов в беспроводной сенсорной сети сокращает объем служебных данных, что позволяет повысить эффективную пропускную способность протоколов передачи данных.*

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети, передача данных, класс вычетов, двухступенчатая система класса вычетов.

### Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются перспективной и быстро развивающейся технологией XXI века. Недорогие и интеллектуальные сенсоры, объединённые в беспроводную сеть, предоставляют широкие возможности для контроля и управления в различных сферах деятельности человека: медицина, экология, сельское хозяйство, военное дело и др. [1]. Типичный перечень элементов узла БСС включает: микросхему беспроводного приемопередатчика; микроконтроллер (МК) или однокристалльное устройство; антенну (печатная/внешняя); разъемы для подключения внешних устройств (антенна, дополнительные датчики, интерфейсы); пассивные компоненты для согласования антенны и приемопередатчика; антенный усилитель (в отдельных случаях); стабилизатор и преобразователь питания или батареи питания.

Последние технологические инновации в аппаратной части направлены на миниатюризацию устройств, увеличение области действия радиоблоков, появление новых сенсорных датчиков, продление срока службы батарей при уменьшении их габаритных размеров. Разработанные новые программные средства позволяют не только автоматически развертывать сенсорные сети, но и перепрограммировать их, а также удаленно управлять режимами функционирования, сбором и визуализацией данных [1].

Несмотря на постоянное развитие и улучшения БСС, в связи с низкой скоростью передачи данных (до 250 Кбит/с) актуальной является задача разработки методов кодирования и протоколов передачи данных, ориентированных на повышение эффективной пропускной способности каналов связи и оптимизацию расхода энергии батареи.

Срок службы БСС напрямую зависит от используемого источника энергии, который чаще всего невозможно заменить или подзарядить во время эксплуатации.

Радиопередача является наиболее энергоемкой операцией в БСС и составляет до 70 % всех энергозатрат [2]. Так, передача 1 бита радиоблоком эквивалентна выполнению от 800 до 1000 операций процессора [3]. Следовательно, чтобы максимально увеличить срок службы сети, необходимо оптимизировать процесс передачи данных по радиоканалу. Минимизация времени работы радиоблока возможна при использовании дополнительных методов кодирования и декодирования данных, которые направлены на уменьшение служебной информации в протоколах передачи и сокращения количества пакетов.

### Основная часть

**Анализ стандарта IEEE 802.15.4.** Стандарт 802.15.4 предназначен для организации двух нижних уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМ ВОС) в БСС – физический (PHY – physical layer) и канальный подуровень контроля доступа к среде передачи (MAC – medium access control). Эти слои предлагают услуги высшим слоям (рис. 1) [5].

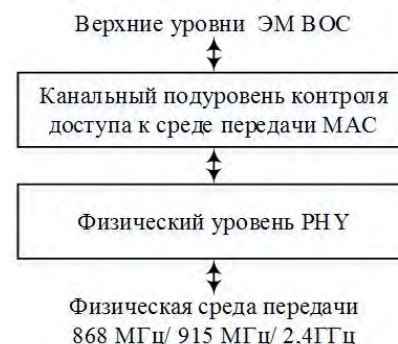


Рис. 1. Архитектура уровней 802.15.4

Физический уровень выполняет задачи управления радиоблоком, передачи и получения кадров через физическую среду, определения уровня энергии. MAC уровень обеспечивает доступ к каналу, управление гарантированными временными слота-

ми GTS, подтверждение доставки кадров, соединение и разъединение с устройствами, безопасность.

В стандарте определено опциональное использование суперструктуры (superframe structure). Суперструктура разделяется на 16 слотов одинаковой продолжительности и ограничивается маяками (beacon). Существует два вида суперструктуры – с активным и неактивным периодами. В течении неактивного периода координатор может перейти в маломощный режим. Если использовать суперструктуру не обязательно, то координатор перестанет посылать маяки. Последние служат для синхронизации устройств с координатором во время соединения. Любое устройство, желающее связаться в течении периода доступа (CAP – contention access period), конкурирует с другими устройствами, используя механизм случайного доступа с обнаружением коллизий (CSMA-CA – Carrier sense multiple access with collision avoidance) или метод доступа ALOHA. Все транзакции завершаются до следующего маяка.

Для приложений, требующих низкий уровень ожидания или требующих пропускную способность для специфических данных, координатор выделяет специальные суперструктуры – гарантированные временные слоты (GTS – guaranteed time slot). Они

формируются в свободный период (CFP – contention-free period), который всегда появляется в конце активной суперструктуры, после периода доступа CAP.

Модель пересылки данных включает в себе три вида транзакций. Первый вид – передача данных координатору, второй – передача от координатора, третий – передача между равными устройствами. В топологии типа «звезда» применяется только первые два вида транзакций, так как данные идут между координатором и устройством. В топологии «равноправных узлов» возможны все три вида транзакций.

Стандартом определяется четыре типа кадров:

- сигнальный кадр (beacon frame), используемый координатором для передачи маяков;
- кадр данных (data frame), используемый для передачи данных;
- кадр подтверждения (acknowledgment frame), используемый для подтверждения успешного приема;
- командный кадр, который используется для управления объекта MAC.

Проведем анализ структуры кадра данных, изображенного на рис. 2 [5]. Кадр, кроме полезной нагрузки данных, содержит служебную информацию необходимую для надежной доставки и обработки.



Рис. 2. Схематическое изображение кадра данных

Поле данных передается на подуровень MAC и рассматривается как сервисный блок данных MAC (MSDU – MAC service data unit). Поле данных MAC имеет префикс MHR (MAC header), далее следует поле MFR (MAC footer). MHR содержит поле управления кадром, порядковый номер данных SN (Sequence Number), адресное поле и опционально заголовок безопасности. Поле MFR (MAC footer) содержит 16-битную контрольную сумму (FCS – frame check sequence). MHR, поле данных MAC и MFR образуют поле данных MAC кадра, (т.е., MPDU – MAC protocol data unit). Контрольная сумма FCS вычисляется с использованием образующего полинома  $G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ .

MPDU передается на физический уровень PHY в виде сервисного блока данных (PSDU – PHY service data unit), которое становится полем данных уровня PHY. Поле данных PHY имеет префикс SHR (synchronization header), который содержит последо-

вательность преамбулы и поле начала заголовка SFD (start-of-frame delimiter), а также поле PHY (PHY header), которое содержит значение длины поля данных PHY в октетах. Последовательность преамбулы и поля SFD обеспечивают синхронизацию. Зависимо от метода модуляции значение длины преамбулы и поля SFH варьируется. Для расчетов примем значение префикса SHR в 40 бит (5 октет).

Рассчитаем процент служебных данных в кадре для различных значений поля данных n относительно максимального (45 октет) и минимально возможного (15 октет) значения служебных данных. Расчет показал, что процент служебных данных в структуре кадра данных IEEE 802.15.4 может составлять от 11 до 95 % и зависит от размера поля данных (рис. 3). Выполним оценку эффективной пропускной способности в зависимости от размера поля данных. Под эффективной пропускной способностью канала связи  $C_n$  бит/с понимается предельная скорость передачи

данных пользователя без учета передаваемых служебных символов в заголовках и концевиках и без учета возможных простоев канала и коллизий [6].

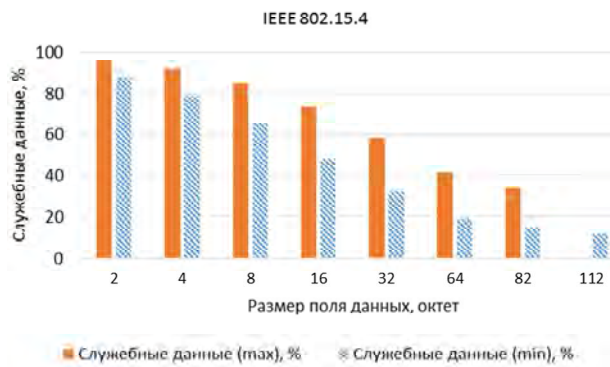


Рис. 3. Процент служебных данных в структуре кадра данных IEEE 802.15.4

Рассчитаем максимальное количество кадров минимальной длины для скорости передачи данных в канале 250 Кбит/с (диапазон частот 2450 МГц).

Размер кадра минимальной длины физического уровня РНУ в стандарте IEEE 802.15.4 вместе с служебными данными составляет  $L_1 = 17$  байт. Для передачи указанного объема необходимо  $(17 \cdot 8) / (250 \cdot 1000) = 5,44 \cdot 10^{-4}$  с. Т.е. при скорости передачи в 250 Кбит/с, время передачи одного бита составляет  $5,44 \cdot 10^{-4} / (17 \cdot 8) = 4 \cdot 10^{-6}$  с. Отсюда, максимально возможная пропускная способность сети  $\square_1 = 1 / (17 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 10^{-6}) = 1838$  кадр/с.

Кадр максимальной длины  $L_2 = 133$  байта, соответственно время передачи кадра составляет 4172 мкс. Следовательно, максимально возможная пропускная способность сети  $\square_2 \approx 240$  кадр/с.

Теперь возможно определить эффективную пропускную способность БСС и коэффициент использования канала связи при передаче кадров максимальной и минимальной длины:

– для кадров с минимальной длиной поля данных ( $d_{\min} = 2$  байта) полезная пропускная способность  $C_{\text{ndmin}} = \square_1 \cdot d_{\min} \cdot t = 1838 \cdot 2 \cdot 8 = 29,4$  Кбит/с, а коэффициент использования канала  $k_{\min} = C_{\text{ndmin}} / C = 29,4 / 250 \approx 0,118$ ;

– для кадров с максимальной длиной поля данных ( $d_{\max} = 112$  байта) полезная пропускная способность  $C_{\text{ndmax}} \approx 234$  Кбит/с,  $k_{\max} = 0,936$ .

Как видно, коэффициент использования канала при минимальном размере поля данных снижается до 8 раз. Следовательно, передача кадров с полем данных максимальной длины приближает пропускную способность к номинальной – 250 Кбит/с. Отметим, что это справедливо только при отсутствии ошибок и потерь пакетов в сети. В случаях высокой вероятности битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) увеличение размера поля данных может уменьшить эффективную пропускную способность БСС за счет повторной передачи потерянных и искаженных пакетов.

**Метод многоуровневого кодирования данных в БСС на основе применения кодов в классе вычетов.** Предлагаемый метод многоуровневого кодирования данных ориентирован на централизованную модель сбора информации в БСС древовидной топологии, в которой только определенные узлы (будем называть их узлами высшего ранга (СН – Cluster Head)) могут взаимодействовать с другими узлами (узлами низшего ранга (СМ – Cluster Members)) (рис. 4).

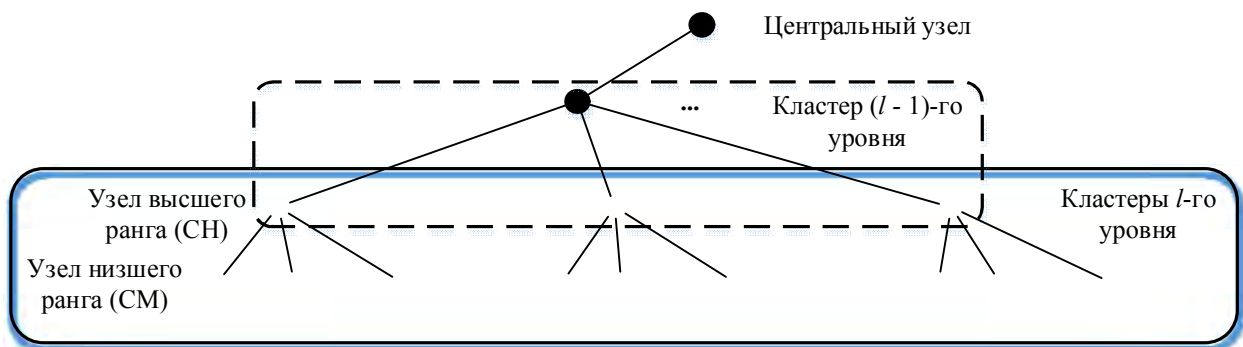


Рис. 4. Топология древовидной сети

Под кластером понимается узел высшего ранга СН со всеми его узлами низшего ранга СМ.

Особенность подхода – предоставление данных сенсоров в двухступенчатой системе класса вычетов (КВ) и объединение в узлах высшего ранга СН данных переданных узлами низшего ранга СМ.

Представление числа в КВ основано на понятии вычета и китайской теореме об остатках (КТО). Система КВ определяется набором взаимно простых оснований  $(m_1, m_2, \dots, m_n)$  с произведением

$$M = \prod_{i=1}^n m_i$$

так, что каждому целому числу  $A$  из отрезка  $[0, M)$  ставится в соответствие набор вычетов  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , где  $A \equiv \alpha_i \pmod{m_i}, i = \overline{1, n}$  [7].

Рассмотрим двухступенчатую систему оснований КВ. Пусть первая (главная) система оснований  $(m_1, m_2, \dots, m_n)$  обеспечивает возможность выполнения операций в заданном диапазоне  $[0, M)$ . Максимальное число, которое может быть получено в

этой системе при умножении отдельных цифр, есть  $(m_n - 1)^2$ . Теперь представим все цифры первой системы в новой системе с основаниями  $(m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{in})$  такими, что  $m_{i1} \cdot m_{i2} \cdot \dots \cdot m_{in} \geq (m_n - 1)^2$ , а  $i = \overline{1, n}$  установлены для первой ступени [7].

Для обнаружения и исправления ошибок введем в первую и вторую ступень контрольные основания. То есть, для первой системы оснований получим число  $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \alpha_{k+1}, \dots, \alpha_n)$ , представленное в КВ системой оснований  $(m_1, m_2, \dots, m_k, m_{k+1}, \dots, m_n)$ , где основания  $m_1, m_2, \dots, m_k$  – информационные, а  $m_{k+1}, \dots, m_n$  – контрольные. Причем  $(m_i, m_j) = 1$  и  $m_1 < m_2 < \dots < m_k < m_{k+1} < \dots < m_n$ , где  $i \neq j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ . При этом будем передавать и выполнять операции над числами, которые находятся в рабочем диапазоне  $[0, \mu)$ , в более широком (полном) диапазоне с контрольными основаниями  $[0, M)$ .

Каждый узел БСС определяет уровень шума окружающей среды. Зависимо от его величины, при передаче данных, узлом увеличивается или уменьшается количество контрольных оснований. То есть, при высоких значениях битовой ошибки BER, что характерно для БСС, используются все контрольные основания, а если ошибки отсутствуют или BER достаточно низкий, контрольные основания используются для обнаружения или не используются вовсе. Таким образом, потребляемая энергия узлов при передаче данных расходуется оптимально.

При передаче данных для каждого сенсора должно выполняться условие  $\mu > A$ , то есть данные сенсоров должны быть меньше за рабочий объем диапазона представимых чисел.

Данные, формируемые узлами, объединяются в пакеты по формуле для первой и второй ступени [8]:

$$A_{i1} = \sum_{i=1}^n \bar{b}_{i1} V_{i1} \pmod{M_{i1}}, \quad (1)$$

где  $V_{i1}$  – ортогональные базисы,  $M_{i1} = \prod_{i=1}^n m_i$ ,  $n$  – количество оснований,  $i = \overline{1, n}$ ,  $1$  – номер уровня кластера.

Ортогональные базисы находят из выражения

$$V_{i1} = \frac{M_{i1}}{m_i} \delta_i \equiv \pmod{m_i}, \quad (2)$$

где  $0 < \delta_i < m_i$  – вес ортогонального элемента.

В узлах  $CH_1, CH_2, \dots, CH_n$  1-го уровня происходит объединение данных  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  сенсоров низшего ранга СМ (рис. 4) на основании формулы (1). Объединенные данные кластеров 1-го уровня передаются и аналогично объединяются в кластерах  $(1-1)$ -го уровня, и т.д. Результатом такого многоуровневого кодирования данных является объединенные значения всех сенсоров в сообщении.

Декодирование данных происходит с помощью операции последовательного получения остатка по соответствующим модулям [8]:

$$\begin{aligned} A_{i11} &= A_{i1} \pmod{M_{i11}}; \\ A_{i12} &= A_{i1-1} \pmod{M_{i12}}; \\ &\dots \\ A_{i1} &= A_{i2} \pmod{M_{i1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Использование корректирующих кодов уменьшает количество повторных передач пакетов, которые искажены вследствие воздействия помех.

Следует обратить внимание, что применение двухступенчатой системы оснований КВ и перехода к меньшим основаниям заметно упрощает реализацию элементарного арифметического устройства и сокращает время выполнения арифметической операции.

Арифметическое устройство при этом будет работать только в высшей ступени и лишь на этапах вывода результата полученные числа должны преобразовываться в форму, наиболее предпочтительную для выхода [7].

В общем случае мы выигрываем в избыточности одного элементарного арифметического устройства, однако при каждом увеличении ступени оснований проигрываем в избыточности всего арифметического устройства за счет увеличения разрядности всего числа и за счет увеличения избыточности при переходе на новую ступень [7].

## Выводы

Предложенный метод многоуровневого кодирования данных сенсоров направлен на уменьшение служебной информации в протоколах передачи данных и сокращение количества пакетов, что в общем позволяет повысить эффективную пропускную способность БСС.

Применение двухступенчатой системы оснований КВ направлено на увеличение скорости обработки данных, а способность узлов сети увеличивать или уменьшать количество контрольных оснований позволяет оптимизировать энергию узлов при различной шумовой обстановке.

## Список литературы

1. Гольдштейн Б.С. Сети связи пост-NGN / Б.С. Гольдштейн, А.Е. Кучерявый // СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 160 с.
2. Frame Preamble MAC for Multihop Wireless Sensor Networks: Design and Implementation / A. Bachir, S. Plan-coulaine, D. Barthel, M. Heusse, A. Duda // DRAFT, March 28, 2008. – 38 p.
3. SPINS: Security Protocols for Sensor Networks / A. Perrig, R. Szewczyk, J.D. Tygar, V. Wen, D.E. Culler // ACM Journal of Wireless Networks, 8:5, Netherlands, September 2002. – P. 521-534.
4. Phoha S. Sensor network operations / S. Phoha, T. LaPorta, C. Griffin // IEEE press, John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 731 p.
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.

6. Tanenbaum A.S. *Computer Networks – 4th Edition* / A.S. Tanenbaum. – Prentice Hall, Upper Saddle River, 2003. – 671 p.

7. Акушский И.Я. *Машинная арифметика в остаточных классах* / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. – М.: Сов. радио, 1968. – 460 с.

8. *Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем* / Н.И. Червяков,

П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, С.А. Ряднов; под. ред. Н.И. Червякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

Поступила в редколлегию 13.08.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Л. Ляхов, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава.

### МЕТОД БАГАТОРІВНЕВОГО КОДУВАННЯ ДАНИХ У БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСУ ЛИШКІВ

В.А. Краснобаев, Р.А. Горбенко

*Проведено аналіз структури кадрів передачі даних в бездротовій сенсорній мережі. Розроблено метод багаторівневого кодування даних бездротових сенсорних мереж на основі застосування кодів класу лишків. Запропонований підхід об'єднання даних вузлів в бездротовій сенсорній мережі зменшує обсяг службових даних що дозволяє підвищити ефективну пропускну здатність протоколів передачі даних.*

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, передача даних, клас лишків, дворівнева система класу лишків.

### MULTILEVEL DATA CODING MEYHOD IN WIRELESS SENSOR NETWORKS BASED ON RESIDUE CLASS

V.A. Krasnobaev, R.A. Horbenko

*The data frame structure in a wireless sensor network has been analyzed. The multi-level data coding method based on the residue class was developed. The proposed approach of gathering data nodes in wireless sensor network reduces the amount service data that allows to increase useful bandwidth of data communication protocols.*

**Keywords:** wireless sensor networks, data transfer, residue class, two-level system residue class.