

УДК 004.75

Су Цзюнь

## МНОГОУРОВНЕВЫЙ МЕТОД КОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

**Аннотация.** Разработан метод многоуровневого кодирования данных на основе преобразования системы остаточных классов. Предложенный подход к кодированию данных сенсоров позволяет уменьшить объем служебных данных и тем существенно повысить полезную пропускную способность протоколов передачи данных беспроводных сенсорных сетей.

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети, система остаточных классов, протокол передачи.

Su Jun

## MULTILEVEL METHOD OF DATA CODING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

**Abstract.** The multilevel method of data coding in wireless sensor networks based on the conversion of the residue number system. The proposed approach allows reducing the overhead number as well as increasing the effective capacity of data transmission protocols significantly.

**Keywords:** Wireless sensor networks, residue number system, communication protocol.

Су Цзюнь

## БАГАТОРІВНЕВИЙ МЕТОД КОДУВАННЯ ДАНИХ В БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

**Анотація.** Розроблено метод багаторівневого кодування даних на основі перетворення системи залишкових класів. Запропонований підхід до кодування даних сенсорів дає змогу зменшити обсяг службових даних і тим суттєво підвищити корисну пропускну здатність протоколів передачі даних бездротових сенсорних мереж.

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, система залишкових класів, протокол передачі.

**Введение.** Беспроводные сенсорные сети (БСС) из плоскости научных (теоретических и экспериментальных) исследований все чаще переходят в область практического использования в различных сферах деятельности: мониторинг состояния окружающей среды и промышленного оборудования, медицина, сельское хозяйство и др.

Большинство БСС используют традиционную клиент – серверную технологию, при которой каждый сетевой узел (радиосенсор) передает собранные данные в центр сбора и обработки [1].

В [2] показано, что затраты энергии на передачу данных в беспроводных сетях занимают примерно 70 % всех расходов.

В связи с низкой скоростью передачи данных в БСС (250 Кбит/с) актуальной является задача разработки методов кодирования и протоколов передачи данных, ориентированных на повышение полезной пропускной способности каналов связи БСС.

Предварительный анализ показал, что повысить эффективность работы БСС можно двумя способами [3, 4]:

© Су Цзюнь, 2011

1) уменьшением количества служебных данных в сетевом пакете;

2) устранением избыточности измеренных данных сенсоров.

Для уменьшения избыточности данных сенсоров используют различные методы. Так в работах [5, 6] предлагается технология «мобильных агентов» – программного кода, при передаче которого исходный объем данных может быть уменьшен за счет ликвидации избыточности детерминированными методами. Однако такой подход значительно ограничивает сферу применения данной технологии через ограничения на архитектуру сети, расстояния до ядра (кластера) и др. В [7] предлагается оптимизация трафика путем декорреляции данных, т.е. устранение избыточности. Однако использование данного подхода возможно только для потоков данных близлежащих узлов при измерении одинаковых физических величин, что существенно ограничивает его применение.

Уменьшить процент служебных данных в структуре пакетов существующих протоколов можно за счет увеличения размера поля данных. Однако системы мониторинга

и управления, построенные на основе технологии БСС [1], характеризуются малой длиной информационных сообщений. Например, объем данных сенсоров при измерении физических величин (температура, давление, влажность, радиационный фон и др.) составляет всего 8–16 бит. Увеличить размер сообщения в БСС можно, объединив данные различных сенсоров в один пакет. Простейшим способом увеличения размера пакета (объединение данных сенсоров) является конкатенация данных. Если  $\alpha = a_1 \dots a_n$  и  $\beta = b_1 \dots b_m$  слова в алфавите  $A$ , то конкатенацией слов  $\alpha$  и  $\beta$  будет слово  $\gamma$  в том же алфавите  $A$ , что определяется  $\gamma = \alpha \beta = a_1 \dots a_n b_1 \dots b_m$  [8]. Однако, если измеренные значения сенсоров имеют разную разрядность, использование известных методов конкатенации приводит к увеличению избыточности. В данной работе исследованы направления совершенствования сетевых протоколов путем увеличения размера поля данных сетевых пакетов для сенсоров различной разрядности.

#### Анализ структуры протоколов БСС

Под полезной пропускной способностью сети понимают скорость передачи информационных данных [4], причем на неё влияют следующие факторы: интерференция, ожидания доступа к среде, межкадровые интервалы (Interframe Space or Spacing), служебные данные (заголовки физического и MAC уровня), подтверждение и повторная передача кадра. Среди приведенных факторов значительное влияние на полезную пропускную способность БСС имеет количество служебных данных. Каждый пакет, который передается в БСС, кроме данных содержит служебную информацию необходимую для надежной доставки и обработки пакетов. К служебным данным протоколов БСС (IEEE 802.15.4, SimpliCIPI) относятся: преамбула, граница кадра, длина кадра, поле управления кадром, номер канала, адресов ID, контрольная сумма.

Проведенный анализ структуры кадров протоколов БСС (IEEE 802.15.4, SimpliCIPI) показал, что процент служебных данных в указанных протоколах составляет от 4 % до

80 % и зависит от размера поля данных (рис. 1).

Проведем оценку полезной пропускной способности в зависимости от размера поля данных без учета межкадровых интервалов и времени ожидания доступа к среде.

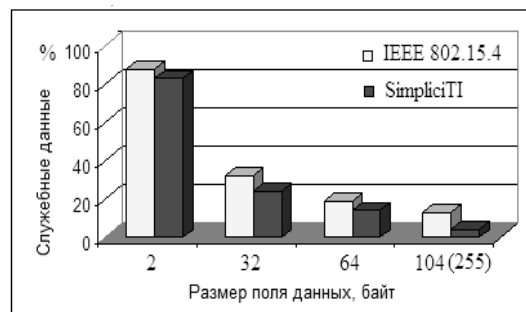


Рис.1. Процент служебных данных в пакете (структуре) протокола

Для этого рассчитаем максимальное количество кадров минимальной длины. Размер кадра минимальной длины в стандарте IEEE 802.15.4 вместе с преамбулой составляет  $L_1 = 27$  байт, поэтому на его передачу необходимо 864 мкс, при скорости передачи 250 кбит/с, время передачи одного бита  $t = 4$  мкс. Отсюда, максимально возможная пропускная способность сети  $m_1 = 1157$  кадр/с [4].

Кадры максимальной длины в стандарте IEEE 802.15.4 вместе с преамбулой имеют размер  $L_2 = 127$  байт. Соответственно, время передачи кадра составляет 4064 мкс. Следовательно, максимальная возможная пропускная способность сети  $m_2 = 246$  кадр/с. Вместе с тем целесообразно рассчитать полезную пропускную способность при использовании кадров минимальной и максимальной длины. Для кадров с минимальной длиной поля данных ( $d_1 = 4$  байта) полезная пропускная способность (рис.2)  $C_1 = m_1 d_1 t = 37$  Кбит/с, а для кадров с максимальной длиной поля данных ( $d_2 = 104$  байт)  $C_2 = m_2 d_2 t = 204,7$  Кбит/с.

Как видно из рис. 2, полезная пропускная способность уменьшается в пять раз при минимальном размере поля данных в структуре протокола.

Следовательно, оптимальным является передача пакетов с полем данных максимальной длины, в которых процент служебной информации в отношении полезных

данных намного меньше, чем в пакетах минимальной длины. Соответственно полезная пропускная способность приближается к номинальной – 250 Кбит/с (рис.2).

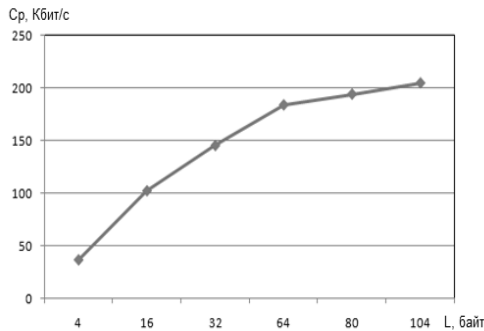


Рис. 2. Зависимость полезной пропускной способности от размера поля данных в пакете протокола стандарта IEEE 802.15.4

**Предлагаемый подход.** Отличие предложенного автором подхода состоит в представлении данных сенсоров в системе остаточных классов (блок 1) и их преобразования в позиционную систему счисления (блок 2). На приемной стороне (на сервере) происходит обратное преобразование данных из позиционной системы счисления (блок 4) в СЗК (блок 5) (рис. 3).

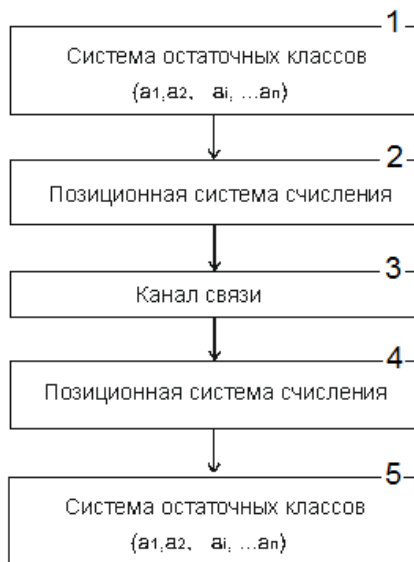


Рис. 3. Алгоритм предложенного метода кодирования

В СОК любое целое положительное число представляется в виде набора наименьших положительных остатков от деления этого числа  $A$  на фиксированные целые положительные взаимно простые числа  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , называемые модулями. Обозна-

чим наименьший положительный остаток от деления  $A$  на  $p_i$  [9]:

$$\alpha_i = A - \left\lfloor \frac{A}{p_i} \right\rfloor \cdot p_i,$$

где  $\lfloor \bullet \rfloor$  – округление до меньшего целого.

Тогда число  $A$  в СОК запишется в виде

$$A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n\}.$$

Суть кодирования заключается в следующем. Для каждого сенсора выбирается взаимно простой модуль согласно условия  $p_i > a_i$ , где  $a_{ij}$  – данные сенсоров, т.е. модуль выбирается больший за максимальное значение данных.

Данные, формирующие сенсоры, объединяются в пакеты по формуле [9] (рис.4):

$$A_{ij} = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot B_{ij} \pmod{P_{ij}}, \quad (1)$$

где  $B_{ij}$  – ортогональные базисы,  $P_{ij} = \prod_{i=1}^n p_i$ ,

$p_i$  – взаимно простые числа,  $n$  – количество модулей,  $i = 1, n, j$  – номер уровня.

$$B_{ij} = \frac{P_{ij}}{p_i} \cdot \delta_i \equiv 1 \pmod{p_i},$$

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

В блоках  $A_{12}, A_{i2}, A_{n2}$  происходит объединение данных  $(a_1, \dots, a_n)$  сенсоров верхнего уровня на основе формулы (1) (рис.4,а), в блоке  $A_{13}$  – объединение данных, поступивших с предыдущего уровня (блоки  $A_{12}, A_{i2}, A_{n2}$ ) и т.д. В результате многоуровневого кодирования получим сообщение в позиционной системе счисления, в котором представлены измеренные значения сенсоров.

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

$$A_{ij-1} = A_{ij} \pmod{P_{ij-1}};$$

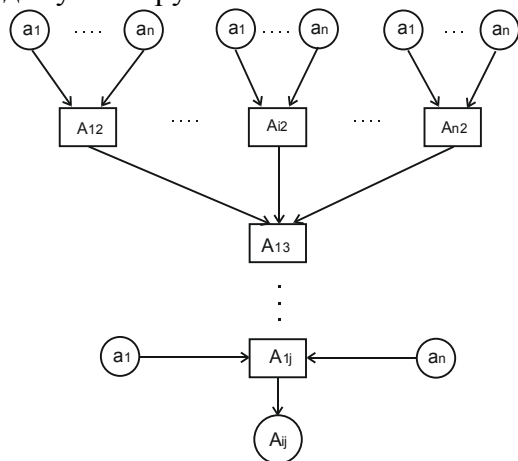
$$A_{ij-2} = A_{ij-1} \pmod{P_{ij-2}};$$

...

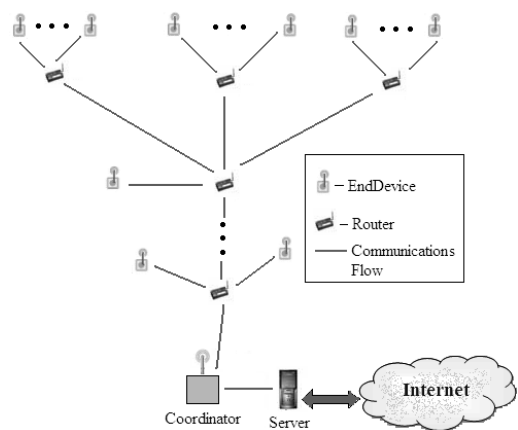
$$A_{i1} = A_{i2} \pmod{P_{i1}}.$$

Такой подход позволяет объединять данные различной разрядности. При этом не нужно добавлять адрес сенсора, его роль выполняет уникальный модуль системы ос-

точных классов, который присваивается каждому сенсору.



а



б

Рис. 4. Схемы многоуровневого кодирования данных сенсоров:

а – структурная; б – функциональная

Заметим, что увеличение размера кадра повышает пропускную способность сети (рис.2) только при надежной работе сети (данные не искажаются и не теряются). В противном случае увеличение размера пакета может привести не к увеличению, а к уменьшению пропускной способности, так как сеть будет повторно передавать потерянные пакеты.

Беспроводные сети, за счет влияния электромагнитных помех, характеризуются достаточно высокой вероятностью битовой ошибки (Bit Error Rate, BER) по сравнению с кабельными сетями. Для БСС типичным значением BER является  $10^{-4} - 10^{-6}$  [10].

В стандарте IEEE 802.15.4 для выявления ошибок используются коды CRC (Cyclic Redundancy Check), и полином

$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ , обеспечивающие выявление однократных ошибок с вероятностью 100 %, а другую количество ошибок с вероятностью  $P = (1 - 2^{-n})$ , где  $n$  – количество разрядов контрольной суммы [11].

В БСС при обнаружении ошибок происходит повторная передача пакета данных, что приводит к уменьшению полезной пропускной способности и увеличению энергопотребления.

Повысить полезную пропускную способность беспроводной сети можно, применив корректирующие коды. Использование корректирующих кодов уменьшает количество повторных передач пакетов, которые искажены вследствие воздействия помех.

Рассмотрим систему с основами  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , и диапазоном  $M = p_1 p_2 \dots p_n$ . Диапазон  $M$  будем называть рабочим. Для создания возможности обнаружения и исправления ошибок расширим систему модулей, т.е. введем основы  $p_{n+1}, p_{n+2}$ , взаимно простые с любой из принятых основ и будем представлять числа в системе с основами  $n + 1, n + 2$ . Это означает, что будем передавать числа и выполнять операции над числами, которые находятся в диапазоне  $[0, M]$  в более широком диапазоне  $[0, P]$ , где  $P = M p_{n+1} p_{n+2}$ .

Так как все значения, которые передаются в БСС, должны находиться в диапазоне  $[0, M]$ , следовательно, если в результате передачи получено число  $A$  больше  $M$ , значит, была допущена ошибка [12].

Как известно, система счисления в остаточных классах открывает возможность использования единого помехоустойчивого кода для борьбы с ошибками, возникающими при передаче информации по каналам связи и при ее обработке в цифровых информационных системах.

Универсальность кодов СОК объясняется не только их высокими корректирующими возможностями, арифметичностью и возможностью борьбы с пакетами ошибок, но и их адаптивным изменением корректирующих свойств без изменения способа кодирования [9].

#### Экспериментальные исследования

Рассчитаем полезную пропускную способность при использовании корректирую-

щих кодов СОК с двумя контрольными модулями. Для кадров максимальной длины (104 - 2 = 102 байт, контрольные модули занимают 2 байта) полезная пропускная способность  $C_p = m_2 (d_2 - 2) = 200,7$  Кбит/с.

Следовательно, при использовании корректирующих кодов СОК с двумя контрольными модулями, которые обеспечивают исправление ошибок по какому-либо модулю, полезная пропускная способность составляет 200 Кбит/с.

Рассчитаем полезную пропускную способность при различной вероятности ошибки:

$$C_p = \frac{m \cdot L}{1 + Pb \cdot L},$$

где  $m$  – количество кадров с секунду;  $L$  – длина поля данных,  $Pb$  – вероятность ошибки.

На рис. 5 приведены результаты расчета полезной пропускной способности при различной вероятности битовой ошибки.

Следовательно, при вероятности ошибки в канале больше  $10^{-5}$  целесообразно использование корректирующих кодов СОК (рис.5). Полезная пропускная способность, как видно из рис.5, уменьшается в два раза при вероятности ошибки  $10^{-3}$ .

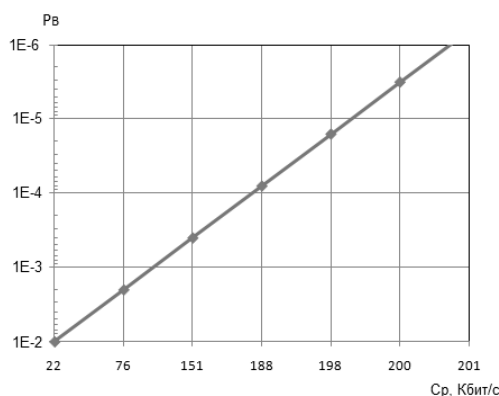


Рис. 5. Зависимость полезной пропускной способности от вероятности появления ошибки для максимального размера блока данных (104 байта)

Таким образом, предложенный подход к кодированию данных сенсоров позволяет уменьшить объем служебных данных, и тем существенно повысить полезную пропускную способность протоколов передачи данных БСС. Кроме того, кодирование данных на основе преобразования системы остаточ-

ных классов обеспечивает дополнительную возможность обнаружения и исправления ошибок. Учитывая сказанное, в будущем планируется исследовать оптимальный размер пакета данных, для которого пропускная способность сети будет максимальной при различных уровнях помех.

### Выводы

Предложен многоуровневый метод кодирования данных сенсоров, который повышает полезную пропускную способность протоколов передачи данных БСС в 3 – 5 раз за счет объединения данных сенсоров различной разрядности и уменьшает количество посылок.

Проведенные исследования полезной пропускной способности в зависимости от вероятности битовой ошибки, при использовании корректирующих кодов СОК с двумя контрольными модулями, показали, что применение корректирующих кодов является целесообразным при вероятности битовой ошибки больше  $10^{-5}$ .

### Список использованной литературы

1. Akyildiz I. F. A survey on wireless multimedia sensor networks / Akyildiz. F., Melodia T., Chowdhury K. R. // *Computer Netw. (Elsevier)*, vol. 51, no. 4, pp. 921–960, Mar. 2007.
2. Perrig A., Szewczyk R., Wen V., Culler D., J.D. Tygar, SPINS: Security protocols for sensor networks, in: *International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, Rome, Italy, 2001.
3. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / Олифер В. Г., Олифер Н. А.– СПб.: Питер, 2007. – 960 с.
4. *Computer Networks* / Tanenbaum A. S. – 4th Edition, 2003, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458.
5. H. Qi “Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks”/ H. Qi, Y. Xu, X.Wang // *Proceedings of the IEEE*. – vol. 91. – № 8. – 2003. – Pp. 1172–1183.
6. Mobile Agent-Based Directed Diffusion in Wireless Sensor Networks /Min Chen, Taekyoung Kwon, Yong Yuan, Yanghee Choi, and Victor C. M. Leung // *EURASIP Journal on*

Advances in Signal Processing, Vol. 2007, Article ID 36871, 13 pp. doi:10.1155/2007/36871.

7. Толстикова Е. В. Минимизация избыточности объема передачи данных в сети радиодатчиков / Е. В. Толстикова // Проблемы информатизации та управління. – № 1(29), 2010. – С.168-171.

8. Мерекин Ю. В. Нижняя оценка сложности для схем конкатенации слов / Ю.В. Мерекин // Дискретный анализ и исследование операций. – 1996. – Т. 3. – №. 1. – С. 52-56.

9. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Червяков Н. И., Сахнюк П. А., Шапошников А. В., Ряднов С. А. // Под. ред. Червякова Н. И. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

10. Wireless Communications and Networking / William Stallings. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

11. ZigBee Alliance. IEEE 802.15.4, ZigBee Standard. Режим доступа: <http://www.zigbee.org>.

12. Anatoly Sachenko. Modified Method of Noise-Immune Data Transmission in Wireless Sensors Networks/ Anatoly Sachenko, Vasyl Yatskiv, Roman Krepych // International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, "NSWCTC 2009", 25-26 April 2009, Wuhan, Hubei, China, Volume 2. – P.847-850.  
Получено 05.09.2011

#### References

1. Akyildiz I. F., Melodia T., Chowdhury K.R. A survey on wireless multimedia sensor networks / Computer Netw. (Elsevier). – vol. 51. – No. 4. – 960, Mar. 2007. – 921 p. [in English].

2. Perrig A., Szewczyk R., Wen V., Culler D. and Tygar J.D. SPINS: Security protocols for sensor networks, in: International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001), Rome, Italy, 2001 [in English].

3. Olifer V.G., Olifer N.A. Networks. Principles, technologies, protocols. – St. Petersburg Peter, 2007. – 960 p. [in Russian].

4. Computer Networks / Tanenbaum A. S. – 4th Edition, 2003, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458. [in English].

5. H.Qi, Y.Xu, X.Wang. Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks / Proceedings of the IEEE.– Vol.91/– № 8. – 2003. – P. 1172–1183 [in English].

6. Mobile Agent-Based Directed Diffusion in Wireless Sensor Networks /Min Chen, Taekyoung Kwon, Yong Yuan, Yanghee Choi, and Victor C. M. Leung // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2007, Article ID 36871, 13 pp. doi:10.1155/2007/36871 [in English].

7. Tolstikov E.V Minimizing the amount of data redundancy in the network radiodatchikov / Problems informatizatsii that upravlinnya. – № 1 (29). – 2010. – P.168-171 [in Russian].

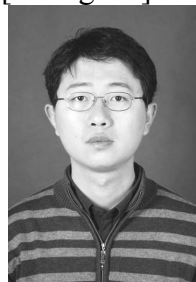
8. Merekin V. The lower bound of complexity for schemes of the concatenation of words / Discrete Analysis and study of operations. – Volume 3. – № 1. – 1996. – P. 52-56 [in Russian].

9. The modular structure of parallel computing systems to neyroprotsessornyh / Chervyakov NI Sahnyuk PA, Shaposh-workers, AV, SA Under Ryadnov. Ed. Worm Islands NI - Fizmatlit, 2003. – 288 p. [in Russian].

10. Wireless Communications and Networking / William Stallings. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. [in English].

11. ZigBee Alliance. IEEE 802.15.4, ZigBee Standard. Режим доступа: <http://www.zigbee.org> [in English].

12. Anatoly Sachenko. Modified Method of Noise-Immune Data Transmission in Wireless Sensors Networks/ Anatoly Sachenko, Vasyl Yatskiv, Roman Krepych // International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, "NSWCTC 2009", 25-26 April 2009, Wuhan, H. [in English].



Су Цзюнь,  
аспирант Тернопольского  
национального  
экономич. ун-та