

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Н. А. ВЕРЗУН¹, А. М. КОЛБАНЁВ², М. О. КОЛБАНЁВ¹

¹Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
191023, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dina_25@hotmail.ru

²ООО „Перспектива“, 192029, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены процессы информационного взаимодействия и энергопотребления умными вещами. Показано, что потребление энергии умными вещами зависит, в том числе, и от способов помехоустойчивого кодирования, поскольку от используемого кода зависят объемы данных, распространяемых по сети, и сложность алгоритмов обработки блоков данных. Предложен подход к выбору таких процедур кодирования, которые не просто обеспечивают достоверную передачу данных, но и потребляют рациональные объемы энергии. Цель статьи — выработка общего подхода к сравнению и последующему выбору способов помехоустойчивого кодирования данных с учетом не только требований к качеству их доставки, но и объемов потребляемых при этом энергетических ресурсов. Показано, что используемые в традиционных локальных сетях процедуры передачи, основанные на обнаружении ошибок и повторной передаче ошибочных кодовых комбинаций, не являются энергоэффективными. Это объясняется тем, что энергопотребление процессорами ниже энергозатрат на передачу кодовых комбинаций через физическую среду сетей связи, и особенно — эфирных. К самонастраивающимся сенсорным сетям, используемым для связи умных вещей в интернете вещей, целесообразно применять процедуры кодирования, исправляющие ошибки и, таким образом, ограничивающие количество повторов передач кодовых комбинаций. Результаты работы могут быть полезны специалистам, изучающим возможности повышения энергоэффективности информационных технологий, сетей и систем.

Ключевые слова: зеленые технологии, энергетическая эффективность, затраты энергии, интернет вещей, умная вещь, беспроводная сеть, помехоустойчивое кодирование, исправление ошибки, обнаружение ошибки

Необходимость снижения ресурсоемкости различных видов производства уже давно стоит перед всем миром. Приоритетной задачей стал переход многих отраслей промышленности и отдельных предприятий на зеленые технологии. Ее решение регулируют государственные и межгосударственные документы. В Российской Федерации закон № 261-ФЗ „Об энергосбережении“ устанавливает, что энергосбережение — это обязанность не только промышленности, но и муниципальных учреждений и государственных органов. Около 200 государств в 2015 г. приняли важные решения в этой области на конференции по проблемам климата — COP21 (Conference of the Parties).

Отрасль информационных технологий не может оставаться в стороне от решения проблем энергосбережения и должна создавать зеленые информационные технологии, потребляющие рациональные объемы электроэнергии [1].

Задачи энергосбережения и перехода к зеленым технологиям [2, 3] актуальны и для отрасли инфокоммуникаций, которая в настоящее время потребляет до 10 % от всей вырабатываемой электроэнергии [4, 5].

К числу главных потребителей энергии в сфере инфокоммуникаций относятся терминальные устройства, применительно к интернету вещей — умные вещи (УВ), а число УВ, согласно работе [6], к 2020 г. превзойдет население планеты на несколько порядков.

При расчетах энергетических характеристик информационных процессов необходимо учитывать, что энергия нужна для выполнения информационных преобразований трех типов [7—11]:

- изменение значения битов данных в процессоре,
- сохранение битов данных в памяти,
- распространение битов данных по физической среде сетей связи, например, в эфире.

В статье анализируется энергетическая эффективность помехоустойчивого кодирования информации в процессе взаимодействия УВ через самонастраивающиеся беспроводные сенсорные сети [12].

Предполагается, что для повышения достоверности передачи используется избыточный помехоустойчивый код, позволяющий обнаруживать ошибки. В случае обнаружения ошибки происходит повторная передача кодовой комбинаций (КК). Рассматривается взаимодействие УВ при помощи КК без использования и с использованием кода, исправляющего ошибки.

Введем следующие обозначения:

k — длина (бит) исходной КК — „полезное“ или пользовательское передаваемое сообщение;

r_0 — число проверочных разрядов (бит), приходящихся на одну КК в результате применения кода, обнаруживающего ошибки;

$r_{и}$ — число проверочных разрядов (бит), приходящихся на одну КК в результате применения кода, исправляющего ошибки;

n — длина (бит) передаваемой КК:

$$n = k + r_0 \quad (1)$$

для 1-го варианта взаимодействия УВ,

для 2-го варианта взаимодействия УВ

$$n = k + r_0 + r_{и}; \quad (2)$$

p — вероятность искажения одного символа передаваемой КК;

i — кратность ошибки в КК (бит);

i_0 — кратность обнаруживаемой ошибки (бит) — максимальное число искаженных битов в КК, которые может обнаружить код;

$i_{и}$ — кратность исправляемой ошибки (бит), максимальное число искаженных битов в КК, которые может исправить код.

Рассмотрим следующие варианты взаимодействия двух УВ:

1-й вариант. Для повышения достоверности передачи используется код, позволяющий обнаруживать ошибки кратностью i_0 . Если при приеме обнаруживается ошибка — осуществляется повторная передача КК.

2-й вариант. Используется код, обнаруживающий ошибки. Затем используется код, позволяющий исправлять ошибки, FEC (Forward Error Correction), т.е. такое канальное кодирование, когда коррекция ошибок осуществляется за счет передачи избыточной информации без требования повторной передачи (благодаря использованию механизма FEC повторная передача блоков данных требуется только при $i > i_{и}$). Если при приеме в КК $i_{и} \leq i \leq i_0$, то ошибки будут обнаружены и искаженная КК будет передана повторно.

Для обоих вариантов в ситуации $i > i_0$ ошибка не обнаруживается. Подобные ошибки могут быть распознаны протоколами вышележащих уровней, например, ТСП при использо-

вании стека TCP/IP для организации взаимодействия УВ — в настоящей статье рассматривается только модель физического и канального уровня OSI, что соответствует случаю „КК принята без ошибок“.

В представленных ниже формулах и дальнейших расчетах будем принимать, что

— ошибки передаваемых КК независимы друг от друга;

— используется режим бесконечного числа „переспросов“ ошибочно переданных КК.

В указанных предположениях для рассматриваемых вариантов взаимодействия УВ будут справедливы следующие выражения для расчета затрат энергии на организацию помехоустойчивого кодирования передаваемых КК.

1-й вариант взаимодействия УВ

Передача КК в режиме обнаружения ошибки сопровождается следующими случаями:

а) КК принята без ошибок;

б) КК принята с ошибкой, которая обнаруживается.

Вероятность успешной передачи КК (случай а) определяется следующим образом:

$$Q_1 = (1 - p)^n, \quad (3)$$

где n определяется формулой (1).

Вероятность ошибочной передачи КК (случай б) определяется как

$$P_1 = 1 - Q_1. \quad (4)$$

Перед успешной передачей КК возможно несколько $(0, 1, 2, \dots, j, \dots, \infty)$ неудачных попыток передачи КК. В случае независимых ошибок повторы передачи КК также будут независимыми, и ряд распределения числа неудачных передач будет геометрическим:

$$f(j) = Q_1 P_1^{(j-1)}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

а математическое ожидание числа неудачных передач КК, предшествующих одной удачной, будет определяться следующим образом:

$$\bar{j} = 1 / Q_1.$$

Затраты энергии на организацию избыточного кодирования одной КК для 1-го варианта взаимодействия УВ (E_1) будут равны

$$E_1 = E_{\text{обн}} + (E_{\text{обн}} + E_{\text{пп}}) / Q_1; \quad E_{\text{обн}} = E_{\text{коо}} + E_{\text{поо}} + E_{\text{дкоо}}, \quad (6)$$

где затраты энергии $E_{\text{обн}}$ — на организацию однократного кодирования с использованием кода, обнаруживающего ошибки, $E_{\text{коо}}$ — на кодирование КК при передаче, $E_{\text{поо}}$ — на передачу избыточных символов, $E_{\text{дкоо}}$ — на декодирование КК при приеме, $E_{\text{пп}}$ — на передачу полезной информации. Для расчета затрат энергии воспользуемся следующими выражениями:

$$E_{\text{коо}} = N_{\text{ко}} e_{\text{обр}}; \quad E_{\text{поо}} = r_0 e_{\text{пер}}; \quad E_{\text{дкоо}} = N_{\text{дкоо}} e_{\text{обр}}; \quad E_{\text{пп}} = k e_{\text{пер}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{ко}}$ — число операций, требуемое для кодирования исходной КК; $e_{\text{пер}}$ и $e_{\text{обр}}$ — соответственно энергозатраты на передачу в эфирной среде и обработку в процессоре одного бита данных; $N_{\text{дкоо}}$ — число операций, требуемое для декодирования принятой КК.

2-й вариант взаимодействия УВ

Возможны следующие случаи передачи КК в режиме исправления ошибки:

а) КК принята без ошибок;

б) КК принята с ошибкой, которая исправляется механизмом FEC: $i \leq i_{\text{н}}$ — повторная передача КК не осуществляется;

в) КК принята с ошибкой, которая не исправляется, но обнаруживается: $i_{\text{н}} \leq i \leq i_{\text{о}}$ — необходима повторная передача КК.

Для 2-го варианта Q_2 — вероятность приема КК без ошибок (случай а):

$$Q_2 = (1-p)^n, \quad (8)$$

где n определяется формулой (2);

P_2 — вероятность того, что произошла ошибка при передаче КК (т.е. случай б+в), для данного варианта складывается из:

$$P_2 = p_{\text{исп}} + p_{\text{обн}}; \quad P_2 = 1 - Q_2, \quad (9)$$

где $p_{\text{исп}}$ — вероятность исправления ошибки механизмом FEC, $p_{\text{обн}}$ — вероятность того, что ошибка не будет исправлена, но будет обнаружена.

Вероятность того, что КК принята с ошибкой i -й кратности ($p_{\text{ош}}^i$) в случае независимых ошибок определяется согласно [13] по формуле

$$p_{\text{ош}}^i = C_n^i p^i (1-p)^{n-1}. \quad (10)$$

Вероятность исправления ошибки кратности i и менее (случай б) с использованием механизма FEC будет определяться следующим образом:

$$p_{\text{исп}} = \sum_{i=1}^{t_n} p_{\text{ош}}^i = \sum_{i=1}^{t_n} C_n^i p^i (1-p)^{n-1}. \quad (11)$$

Соответственно вероятность того, что ошибка не будет исправлена, но будет обнаружена (случай в), определяется следующим образом:

$$p_{\text{обн}} = P_2 - p_{\text{исп}}.$$

В данном варианте взаимодействия УВ с вероятностью $p_{\text{обн}}$ состоится повторная передача КК. Перед успешной передачей КК возможно несколько $(0, 1, 2, \dots, j, \dots, \infty)$ неудачных попыток. В случае независимых ошибок повторения передачи КК также будут независимыми, и ряд распределения числа неудачных передач будет геометрическим:

$$f(j) = (1 - p_{\text{обн}}) p_{\text{обн}}^{(j-1)}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

а математическое ожидание числа неудачных передач, предшествующих одной удачной, будет определяться следующим образом:

$$\bar{j} = 1 / (1 - p_{\text{обн}}).$$

Затраты энергии на организацию избыточного кодирования одной КК для 2-го варианта взаимодействия УВ (E_2) будут равны

$$E_2 = E_{\text{обн}} + E_{\text{исп}} + (E_{\text{обн}} + E_{\text{исп}} + E_{\text{пп}}) / (1 - p_{\text{обн}}); \quad E_{\text{исп}} = E_{\text{кио}} + E_{\text{пио}} + E_{\text{дкио}}, \quad (13)$$

где затраты энергии $E_{\text{исп}}$ — на организацию однократного кодирования с использованием кода, исправляющего ошибки, $E_{\text{кио}}$ — на кодирование исходной КК при передаче, $E_{\text{пио}}$ — на передачу избыточных символов, $E_{\text{дкио}}$ — на декодирование КК при приеме. Для расчета затрат энергии воспользуемся выражениями (7), а также следующими формулами:

$$E_{\text{кио}} = N_{\text{ки}} e_{\text{обр}}; \quad E_{\text{пио}} = r_{\text{и}} e_{\text{пер}}; \quad E_{\text{дкио}} = N_{\text{дкио}} e_{\text{обр}}, \quad (14)$$

где $N_{\text{ки}}$ и $N_{\text{дкио}}$ — число операций, требуемое для кодирования и декодирования КК соответственно.

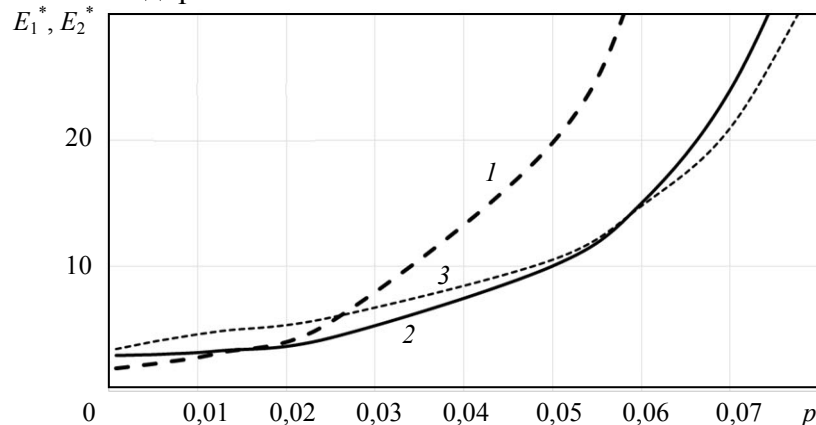
С применением представленных формул был проведен расчет затрат энергии на реализацию механизмов обнаружения и исправления ошибок при взаимодействии двух УВ в беспроводной сенсорной сети. Расчет проводился при следующих исходных данных: $p = 0-0,08$; $k = 50$ бит; $r_0 = 1$ бит (обеспечивает, согласно [13], обнаружение ошибки кратности 1); $r_{\text{и}} = 6$; 16 бит (обеспечивает, согласно [13], исправление ошибки кратности 1 и 2 соответственно); $N_{\text{кио}} = 100$; $N_{\text{дкко}} = 100$; $N_{\text{дкки}} = 102$; $N_{\text{дкио}} = 102$.

При определении энергозатрат на обработку и передачу ($e_{\text{обр}}$ и $e_{\text{пер}}$) можно, например, основываться на данных работ [14, 15]. В расчетах были приняты $e_{\text{обр}} = 0,01$ и $e_{\text{пер}} = 0,1$.

На рисунке представлены зависимости энергопотребления от вероятности ошибки в эфирной среде передачи для различных режимов передачи данных между УВ (1 — E_1^* , 2 — E_2^* при $i_{\text{и}}=1$, 3 — E_2^* при $i_{\text{и}}=2$). Для наглядности графики представлены в относительном виде:

$$E_1^* = E_1 / E_{\text{пп}}, E_2^* = E_2 / E_{\text{пп}},$$

они позволяют определить, во сколько раз больше по сравнению с прямой однократной передачей КК ($E_{\text{пп}}$ — см. формулу (7)) потребуется энергии для реализации различных механизмов помехоустойчивого кодирования.



Анализ графиков показывает, что

1) среда передачи оказывает существенное влияние на потребление энергии умными вещами. С ухудшением качества эфирной среды энергопотребление на помехоустойчивое кодирование передаваемых данных существенно возрастает (в десятки и сотни раз) из-за необходимости повторных передач искаженных сообщений;

2) использование кодов, исправляющих ошибки, позволяет снизить энергопотребление УВ при плохом качестве эфирной среды, однако ведет к увеличению энергопотребления при ее хорошем качестве.

В целом проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что используемые в традиционных „проводных“ сетях процедуры передачи, основанные на обнаружении ошибок и повторной передаче ошибочных кодовых комбинаций, не всегда энергоэффективны для беспроводных сетей. Для самонастраивающихся сенсорных сетей, используемых для связи умных вещей в интернете вещей, целесообразно применение кодов, исправляющих ошибки, что ограничивает количество повторных передач кодовых комбинаций и соответственно снижает затраты энергии на их организацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Технологическая платформа четвертой промышленной революции // Геополитика и безопасность. 2016. № 2(34). С. 73—78.
2. Официальный сайт РКИК [Электронный ресурс]: <<http://newsroom.unfcc.int>>.
3. Егорова М. С. Повышение энергоэффективности как ключевое направление сохранения природного капитала России // Фундаментальные исследования. 2014. № 9—10. С. 2265—2269.
4. Воробьев А. И., Колбанёв А. М., Колбанёв М. О. Зеленые информационные технологии // Ученые записки Международного банковского института. 2015. № 12. С. 153—164.

5. Траум Й. Эффективность начинается с подачи питания // Журнал сетевых решений. 2013. № 4. С. 36—38.
6. Trends in telecommunication reform 2012. Smart regulation in a broadband world // ITU-T. May 2012.
7. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Омелян А. В. Об энергетической эффективности сетей пакетной передачи данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 42—46.
8. Колбанёв М. О., Пойманова Е. Д., Татарникова Т. М. Физические ресурсы информационного процесса сохранения данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 38—42.
9. Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Физические ресурсы информационных процессов и технологий // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 14, № 6. С. 113—122.
10. Bogatyrev V. A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // Automatic Control and Computer Sciences. 2000. Vol. 34, N 6. P. 51—57.
11. Bogatyrev V. A. Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer // Automatic Control and Computer Sciences. 1999. Vol. 33, N 1. P. 57—63.
12. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Омелян А. В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей // Омский научный вестник. Сер. Информатика, вычислительная техника и управление. 2016. № 4(148). С. 147—151.
13. Березюк Н. Т., Андрущенко А. Г., Мощицкий С. С. и др. Кодирование информации (двоичные коды). Харьков: Вища школа, 1978. 252 с.
14. Koomey J. G., Berard S., Sanchez M., Wong H. Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing // IEEE Annals of the History of Computing. 2011. Vol. 33, N 3. July—September. P. 46—54.
15. Беспроводные технологии с низким энергопотреблением [Электронный ресурс]: <<http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/58627/>>.

Сведения об авторах

- Наталья Аркадьевна Верзун** — канд. техн. наук, доцент; СПбГЭУ, кафедра информационных систем и технологий; E-mail: dina_25@hotmail.ru
- Алексей Михайлович Колбанёв** — ООО „Перспектива“; руководитель отдела по техническому сопровождению клиентов; E-mail: kolbanev@gmail.com
- Михаил Олегович Колбанёв** — д-р техн. наук, профессор; СПбГЭУ, кафедра информационных систем и технологий; E-mail: mokolbanev@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационных систем и технологий
СПбГЭУ

Поступила в редакцию
29.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Верзун Н. А., Колбанёв А. М., Колбанёв М. О. Энергетическая эффективность помехоустойчивого кодирования в беспроводных сетях интернета вещей // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 2. С. 143—149.

ENERGY EFFICIENCY OF ERROR-CORRECTING CODING IN WIRELESS NETWORKS OF THE INTERNET OF THINGS

N. A. Verzun¹, A. M. Kolbanev², M. O. Kolbanev¹

¹St. Petersburg State University of Economics, 191023, St. Petersburg, Russia
E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

²Perspectiva Limited, 192029, St. Petersburg, Russia

The processes of communication and energy consumption by the smart things are considered. It is shown that the energy consumption of smart the things depends, among other reasons, on error-correcting coding methods, due to the influence of code used on volume of data transmitted over the network, and the complexity of the data block processing algorithms. An approach is proposed for choice of coding procedures, which not only provide reliable data transfer, but also consume a rational amount of energy. An attempt is made to develop a general approach to comparison and selection of methods of error-correcting coding of the data, considering not only the requirements to the quality of data delivery, but

the volume of energy resources consumed. It is shown that traditional local networks use transfer procedures of error detection and retransmission of erroneous code words, that are not energy efficient. This is due to the fact that energy consumption by processors is less than energy costs associated with the transmission of code words through the physical medium of communication networks and, in particular, essential communication networks. In self-adjusting sensor networks used for smart things connection in the Internet of Things, application of coding procedures correcting errors and thus restricting the number of retransmissions of code words, is desirable. It is supposed that the obtained results may be useful for specialists studying the possibility of increasing the energy efficiency of information technologies, networks and systems.

Keywords: green technologies, energy effectiveness, energy costs, Internet of Things, smart thing, wireless network, error-correcting coding, error correction, error detection

Data on authors

- Natalya A. Verzun** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Economics, Department of Information Systems and Technologies;
E-mail: dina_25@hotmail.ru
- Alexey M. Kolbanev** — Perspektiva Limited, Department of Technical Customer Support; Head of the Department; E-mail: kolbanev@gmail.com
- Mikhail O. Kolbanev** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Economics, Department of Information Systems and Technologies;
E-mail: mokolbanev@mail.ru

For citation: Verzun N. A., Kolbanev A. M., Kolbanev M. O. Energy efficiency of error-correcting coding in wireless networks of the Internet of Things // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 2. P. 143—149 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-143-149