

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.75

DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-1-156-167

Оценка энергоэффективности агрегирования разнородных данных в беспроводных сенсорных сетях

Павлов А.М.¹, Пожидаева И.А.²

¹ Курский государственный университет,
Россия, 305000, г. Курск, ул. Радищева, 33

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
имени профессора М.А. Бонч-Бруевича,
Россия, 193232, г. Санкт-Петербург, пр-т Большевиков, 22, к.1
E-mail: vka_off@mail.ru, efestion.961996@mail.ru

Аннотация. Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой перспективное направление в области развития телекоммуникационных систем. Данная статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме энергопотребления в беспроводных сенсорных сетях. Целью исследования является оценка энергоэффективности агрегирования разнородных данных в БСС. В статье рассмотрено влияние качества агрегирования данных на энергопотребление и пропускную способность БСС. Рассмотрены причины возникновения временных и пространственных корреляций данных, возникающих в БСС, определены подходы к их устранению. Предложены новые коэффициенты оценки качества агрегирования данных в БСС: коэффициент энергоэффективности агрегирования и коэффициент размера информационного пакета. Проведен анализ влияния агрегирования данных на БСС произвольной топологии. На основе математического и статистического анализа, а также с применением программных средств математического моделирования в ходе исследования был произведен расчет величин расходуемой энергии и пропускной способности, необходимых для передачи информационных пакетов, построены графики зависимостей этих величин. В результате исследования был разработан способ оценки энергоэффективности агрегирования разнородных данных в беспроводных сенсорных сетях. Представленный материал будет интересен специалистам в сфере телекоммуникаций, студентам и аспирантам технических направлений, а также может служить основой для дальнейших исследований в рассматриваемой области.

Ключевые слова: агрегирование, беспроводная сенсорная сеть, сенсорный узел, базовая станция, энергоэффективность, информационный пакет, коэффициент энергоэффективности агрегации, коэффициент размера информационного пакета.

Для цитирования: Павлов А.М., Пожидаева И.А. 2021. Оценка энергоэффективности агрегирования разнородных данных в беспроводных сенсорных сетях. Экономика. Информатика, 48 (1): 156–167. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-1-156-167.

Energy efficiency assessment of heterogeneous data aggregation in wireless sensor networks

Alexey M. Pavlov¹, Irina A. Pozhidaeva²

¹ Kursk State University, 33 Radishcheva St, Kursk, 305000, Russia

² Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22 Bolshevnikov Ave, k.1,
St. Petersburg, 193232, Russia
E-mail: vka_off@mail.ru, efestion.961996@mail.ru

Abstract. The wireless sensor networks are the promising area in the development of telecommunication systems. This article is devoted to the actual problem of energy consumption in wireless sensor networks. The purpose of the study is an energy efficiency assessment of heterogeneous data aggregation in wireless sensor networks. In article is discussed the influence of data aggregation quality on energy consumption and wireless sensor networks throughput. Next the author considers the reasons of spatial and temporal correlations in wireless sensor networks and suggests ways of elimination these correlations. The author suggests new quality assessment ratios in wireless sensor networks: the energy efficient aggregation ratio and the information packet size ratio. In this article the analysis of the impact of data aggregation on wireless sensor networks of any topology was carried out. Research shows calculations of energy consumption value and throughput required for data packets transmission, which were performed using mathematical and statistical analysis and mathematical modeling software. As a result of the research the way of energy efficiency assessment of heterogeneous data aggregation on the wireless sensor networks was developed. This article will be interesting to specialists in the telecommunication area, to students and graduate students of the technical institutes and can form a basis for further researches.

Keywords: aggregation, wireless sensor network, sensor node, base station, energy efficiency, information packet, energy efficient aggregation ratio, the information packet size ratio.

For citation: Pavlov A.M., Pozhidaeva I.A. 2021. Energy efficiency assessment of heterogeneous data aggregation in wireless sensor networks. *Economics. Information technologies*, 48 (1): 156–167 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-1-156-167.

Введение

Одним из основных направлений при внедрении новых информационных технологий в сфере контроля различных параметров физических объектов является динамичное развитие беспроводных сенсорных сетей (БСС) [Лихтциндер и др., 2020; Кучерявый, 2007; Микитюк, 2019; Муравьев, Тараканов, 2012; Hart, Martinez, 2006]. БСС представляются перспективной и стремительно развивающейся областью, привлекающей интерес многих международных организаций, среди которых ISO, IEC, ITU-T, IEEE [Росляков и др., 2015].

В качестве известных в настоящее время БСС выступают: всепроникающие сенсорные сети (USN – Ubiquitous Sensor Network), сети для транспортных средств (VANET – Vehicular Ad Hoc Network), муниципальные сети (HANET – Home Ad hoc Network), медицинские сети (MBAN(S) – Medicine Body Area Network (services)) [Росляков и др., 2015].

Использование в сенсорных узлах (СУ) автономных элементов электропитания накладывает серьезные ограничения на жизненный цикл БСС.

Одним из возможных подходов, позволяющих одновременно минимизировать энергозатраты и снизить информационную нагрузку на беспроводные каналы передачи данных (БКПД) БСС, является агрегирование.

Агрегирование позволяет преобразовать необработанные избыточные данные сенсоров к некоторой обобщенной форме, в которой они будут переданы базовой станции (БС) БСС [Sukhchandan, Sushma, 2017; Virmani etc., 2013]. При этом за счёт передачи меньшего количества информационных пакетов снижается потребление энергии БСС в целом.

Однако все еще остаются нерешенными в полной мере задачи оценки качества агрегирования данных, оценки влияния агрегирования на энергопотребление и пропускную способность БКПД БСС.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступают процессы агрегирования данных в БСС. При проведении исследований использовались положения теорий: вероятностей и математической статистики [Гмурман, 2003; Бронштейн, Семендяев, 1986], передачи сигналов и кодирования [Сергиенко, 2002; Скляр, 2007], теории графов, а также пакет прикладных программ технических вычислений «Matlab» [Дьяконов, 2012].

Основная часть

Известные исследования потребления энергии БСС подтверждают, что основной расход энергии происходит в процессе осуществления беспроводной связи [Галкин, 2014; Неама, Богуславский, 2014; Киреев, 2011]. Таким образом, для снижения потребления энергии рациональным представляется решение, заключающееся в минимизации коммуникационной активности СУ БСС. Однако такое решение становится невозможным с ростом объёмов передаваемой в БКПДБСС информации. В таком случае, более эффективным является применение агрегирования данных СУ. Агрегирование данных СУ позволяет сократить затраты энергии за счёт уменьшения количества передаваемых информационных пакетов (ИП) СУ и устранения избыточности их представления.

В условиях отсутствия агрегирования в БС будут передаваться все необработанные данные СУ. Передача необработанных данных СУ имеет ряд недостатков:

растрачивание пропускной способности БКПД БСС;

отсутствие смысловой нагрузки избыточных данных БСС;

повышение вероятности перегрузки БСС в случае превышения потенциальной информационной ёмкости БКПД;

увеличение потребления энергии БСС.

В работах [Розенберг, 2015; Багутдинов и др., 2017; Vuran etc., 2004; Villas etc., 2014] показано, что избыточность необработанных данных связана с их корреляцией во времени и пространстве. Для отдельного СУ корреляция по времени возникает в случае идентичности показаний сенсоров в разные моменты времени. Корреляция в пространстве возникает, когда идентичны данные, полученные БС от нескольких СУ в один и тот же промежуток времени.

Пусть контролируемый объект условно разделен на четыре области (рис. 1).

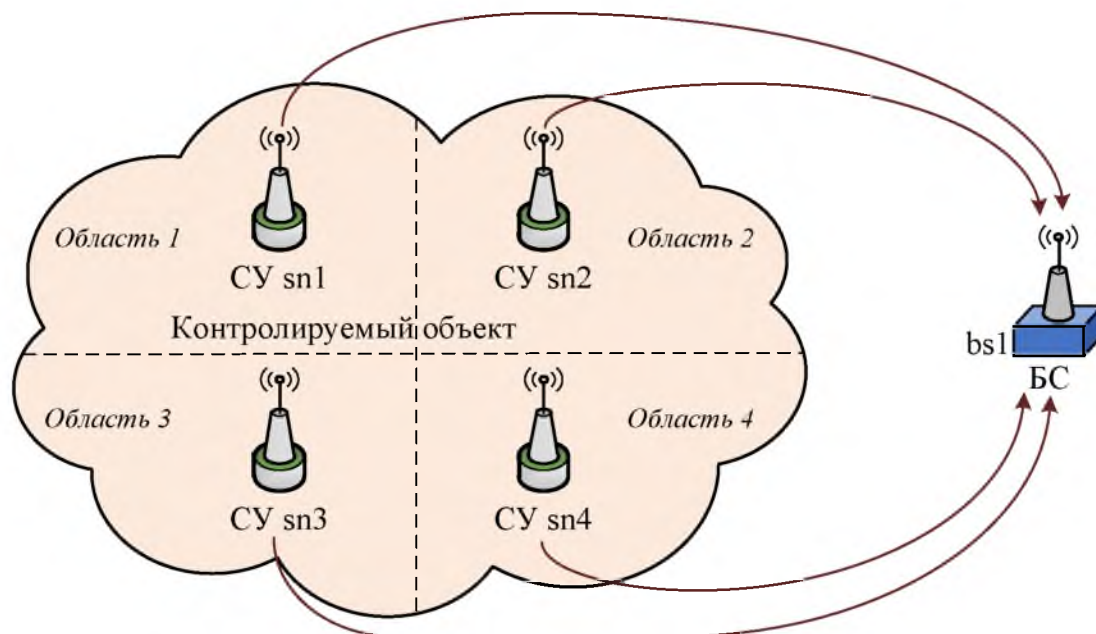


Рис. 1. Корреляция данных СУ во времени и пространстве

Fig. 1. The data correlation of sensor node in time and space

В каждой из областей физические параметры объекта контролируются одним единственным СУ: в области 1 – СУ sn_1 , в области 2 – СУ sn_2 , в области 3 – sn_3 , в области 4 – СУ sn_4 . Все сенсорные узлы однотипны:

$$sn_1 = sn_2 = sn_3 = sn_4 = sn.$$

Допустимые значения, переданные каждым СУ, дискретны и принадлежат множеству:

$$A = \{a, b, c, d, e, f\}.$$

Представим, что значения, переданные СУ в промежуток времени $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$, составили вектора:

$$\begin{aligned} sn_1 &= \{a, b, c, f\}, \\ sn_2 &= \{c, d, a, e\}, \\ sn_3 &= \{a, a, a, a\}, \\ sn_4 &= \{f, e, a, d\}. \end{aligned}$$

Тогда БС принимает матрицу значений СУ:

$$sn = \begin{bmatrix} sn_1 \\ sn_2 \\ sn_3 \\ sn_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a, b, c, f \\ c, d, a, e \\ a, a, a, a \\ f, e, a, d \end{bmatrix}.$$

Нетрудно заметить, что для сенсора sn_3 возникает корреляция значений по времени $t_1 - t_4$, а для сенсоров sn_2, sn_3, sn_4 возникает корреляция в пространстве в момент времени t_3 . На рисунке 2 показан график значений СУ $sn_1 - sn_4$ в зависимости от времени, наглядно иллюстрирующий корреляции.

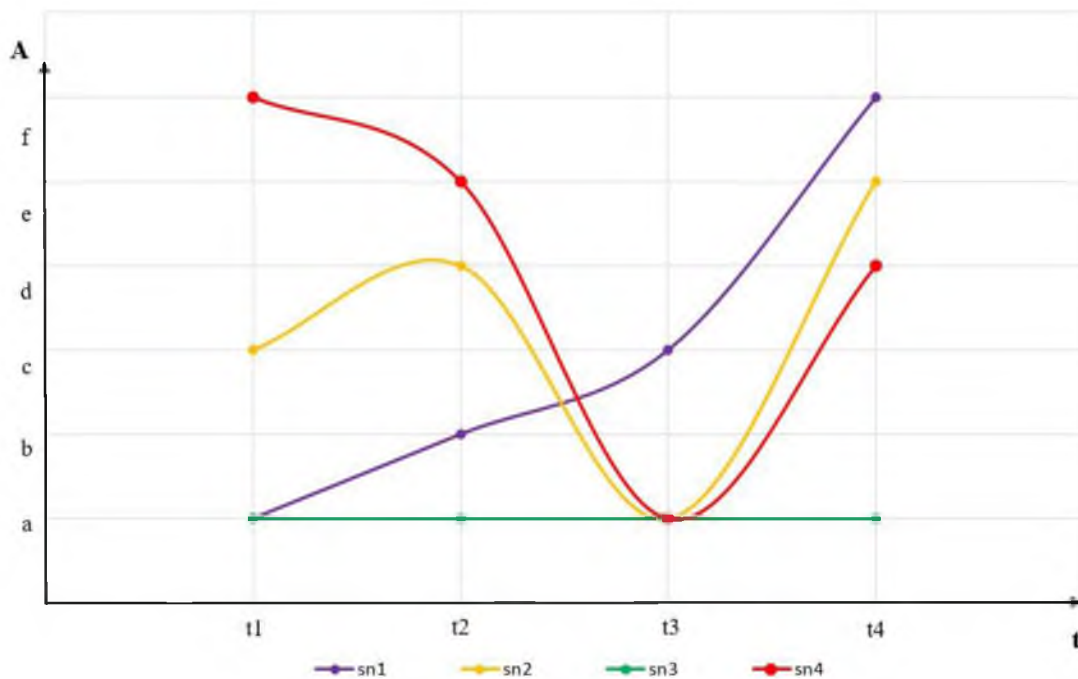


Рис. 2. График зависимостей значений показаний (N) сенсоров (sn) от времени (t)

Fig. 2. The dependencies graph of sensors (sn) indications values (N) from time (t)

В качестве примера корреляции данных СУ во времени рассмотрим реакцию СУ, оснащенного датчиком температуры DHT 22 (AM2302), на увеличение значения температуры. График показаний СУ представлен на рисунке 3.

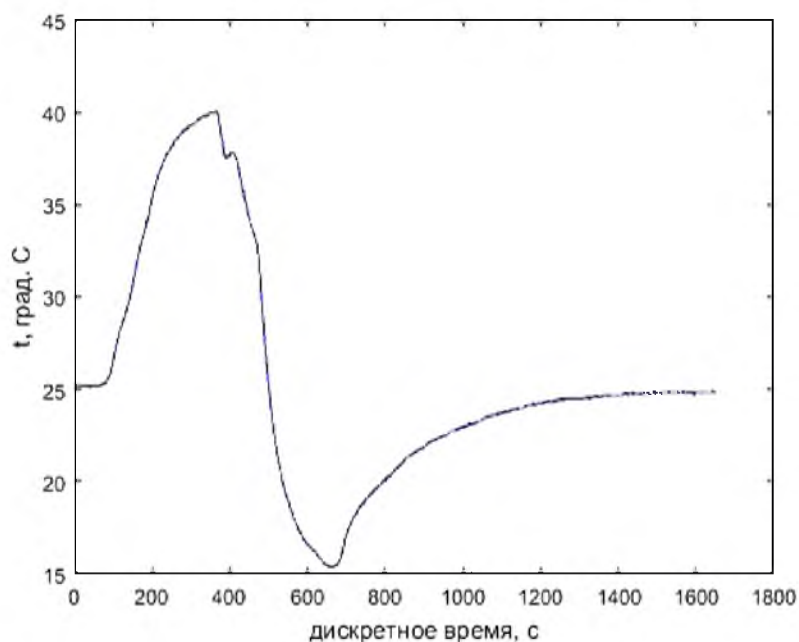


Рис. 3. Реакция СУ на увеличение температуры (с применением сенсора DHT 22 (AM2302))
 Fig. 3. Sensor node reaction to temperature increase (using the DHT 22(AM2302) sensor)

Из графика видно, что в промежутки дискретного времени $\{0-30\}$, $\{1400-1600\}$ показания практически не изменяются, а изменение показаний происходит только в период резкого увеличения температуры. В условиях медленного изменения физических параметров передаваемые БС показания СУ длительное время (от нескольких минут до нескольких часов) могут быть квазиидентичны. Таким образом, корреляция по времени СУ может сохраняться и приводить к растрачиванию пропускной способности БКПД. В рассмотренном случае применение агрегирования избыточных необработанных данных СУ, имеющих высокую степень корреляции во времени, снизит энергозатраты за счёт передачи БС обобщенного ИП с устраненной избыточностью.

Предположим, что энергетические затраты в БСС складываются из двух частей – постоянной и переменной. Постоянные энергозатраты связаны с количеством энергии, необходимой на передачу ИП СУ. Переменные энергозатраты связаны с энергетическими затратами на передачу управляющей информации СУ (например, управление маршрутизацией).

Таким образом, если постоянные энергозатраты будут неизменны (например, работа приемопередатчиков в одном режиме), тогда наибольшее влияние окажут переменные энергозатраты.

Очевидно, что значения переменной составляющей энергозатрат БСС при передаче данных с агрегированием и без него будут различны. Одно из отличий заключается в том, что количество ИП изменяется. При агрегировании количество ИП, передаваемых СУ в БС, меньше или равно количеству исходных ИП. Другое отличие заключается в изменении размера ИП. В ходе агрегации исходный размер пакетов сокращается.

Основываясь на вышеизложенном, введём два новых коэффициента оценки качества агрегации: коэффициент энергоэффективности агрегирования $K_{ЭА}$ (КЭА) и коэффициент размера ИП $K_{РИП}$ (КРИП).

Под КЭА будем понимать отношение количества ИП СУ после выполнения процедуры агрегирования данных к количеству исходных ИП СУ:

$$K_{ЭА} = \frac{n_{агр}}{n_{исх}}$$

где n_{aep} – количество ИП СУ после выполнения процедуры агрегирования данных, $n_{исх}$ – количество исходных ИП СУ.

Рассчитанные значения $K_{ЭА}$ находятся в пределах диапазона (0; 1]. При этом, если $K_{ЭА} = 1$, то будем считать, что агрегирование данных не выполняется или не приводит к снижению энергозатрат, а СУ передает БС все исходные ИП. Несложно заметить, что чем меньше значение КЭА, тем меньшее количество ИП СУ передает БС, и, следовательно, тем выше энергоэффективность агрегирования.

Для расчёта фактически сэкономленной энергии можно воспользоваться формулой:

$$E_{э} \cong E_{ЭА} \times E_{ин} \times n_{исх} \times N_{СУ}, [MВт \times с]$$

где $K_{ЭА}$ – КЭА, $E_{ин}$ – энергия, затрачиваемая для передачи одного ИП от СУ к БС без агрегации, $n_{исх}$ – количество исходных ИП, генерируемых СУ за 1 с, $N_{СУ}$ – количество сенсорных узлов.

Под КРИП будем понимать отношение длины агрегированного ИП СУ к сумме длин исходных ИП СУ:

$$K_{РИП} = \frac{l_{aep}}{\sum l_{исх}},$$

где l_{aep} – длина агрегированного ИП, $\sum l_{исх}$ – сумма длин исходных ИП.

Так как КРИП характеризует изменение размера пакетов функцией агрегирования, то значения $K_{РИП}$ могут быть как меньше 1, так и больше её. При этом, если $K_{РИП} = 1$, то будем считать, что агрегирование данных не выполняется или не приводит к снижению общего объема передаваемых данных, а СУ передает исходный объем данных, что не приводит к экономии пропускной способности канала передачи. Таким образом, чем большая совокупная длина исходных ИП преобразуется в каждый агрегированный ИП, тем эффективнее агрегирование и большая экономия пропускной способности БКПД достигается.

Для расчёта фактически сэкономленной энергии будем считать, что для передачи одного ИП длиной $l_{исх}$ тратится $E_{ин}$ энергии, тогда суммарные энергозатраты на передачу $n_{исх}$ ИП длиной $l_{исх}$ составят:

$$E_{зам}^{исх} \cong f(fE_{ин}(l_{исх}), n_{исх}),$$

где $E_{ин}$ – энергия, затрачиваемая для передачи одного ИП от СУ к БС без агрегации, $l_{исх}$ – длина исходного ИП, $n_{исх}$ – количество исходных ИП, генерируемых СУ за 1 с.

Энергозатраты на передачу n_{aep} пакетов длиной l_{aep} после проведения процедуры агрегирования составят:

$$E_{зам}^{aep} \cong f(fE_{ин}(l_{aep}), n_{aep}),$$

где $E_{ин}$ – энергия, затрачиваемая для передачи одного ИП от СУ к БС без агрегации, l_{aep} – длина агрегированного ИП, n_{aep} – количество агрегированных ИП.

Тогда экономия энергии за счёт агрегирования может быть вычислена как:

$$E_{э} \cong \Delta E \cong E_{зам}^{исх} - E_{зам}^{aep}.$$

Оценим методом имитационного моделирования влияние качества агрегирования на БСС произвольной топологии.

Влияние агрегирования данных на БСС произвольной топологии

Пусть существует БСС, состоящая из трёх однотипных СУ $sn_1 - sn_3$, одного маршрутизатора m_1 и одной БС bs_1 , связанной с ЦОУД по проводной линии (рис. 4). Передача ИП в рамках расчёта рассматривается в одном направлении от СУ к БС. Будем считать, что энергозатраты для передачи одного ИП длиной $l_{инк} = 128$ байт от СУ к БС составляют 1,2 мВт.

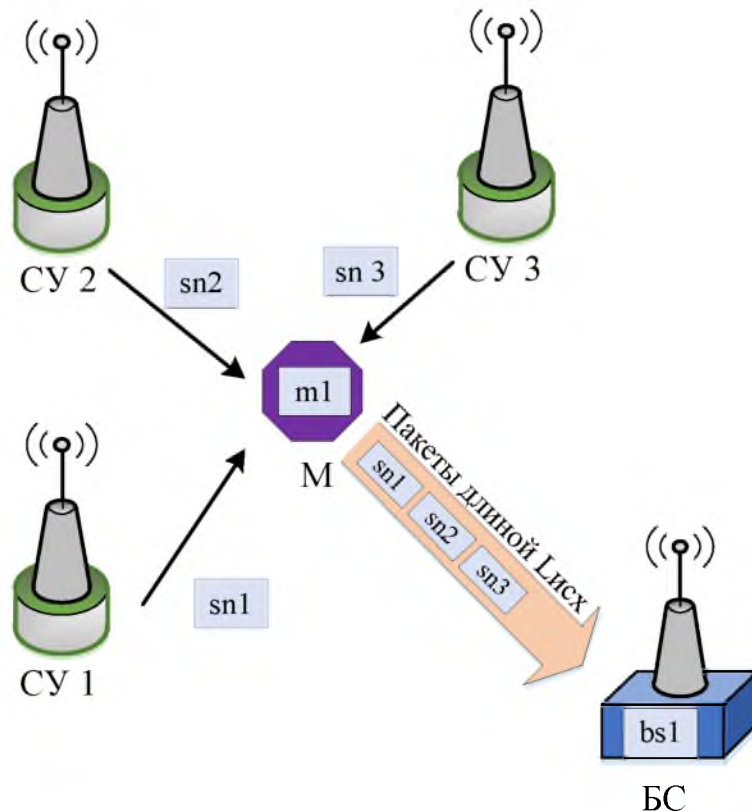


Рис. 4. БСС произвольной топологии
Fig. 4. Wireless sensor network of any topology

Каждый СУ $sn_1 - sn_3$ генерирует 10 пакетов за 1 секунду, тогда 3 сенсорных узла за 1 секунду генерируют 30 пакетов. Суммарная мощность, затраченная на передачу исходных ИП от трех СУ к БС, составит:

$$E = 30 \times 1,2 \text{ мВт} = 36 \text{ мВт} \times c.$$

Тогда за 1 минуту энергозатраты на передачу данных от СУ к БС составят:

$$E_{\text{зат}} = 36 \text{ мВт} \times 60 = 2160 \text{ мВт} \times \text{мин} = 2,16 \text{ Вт} \times \text{мин}.$$

Графики изменения энергозатрат и пропускной способности для рассмотренной БСС с энергозатратностью 2,16 Вт×мин. в зависимости от различных значений $K_{ЭА}$ и $K_{РИП}$ приведены на рисунках 5, 6, 7.

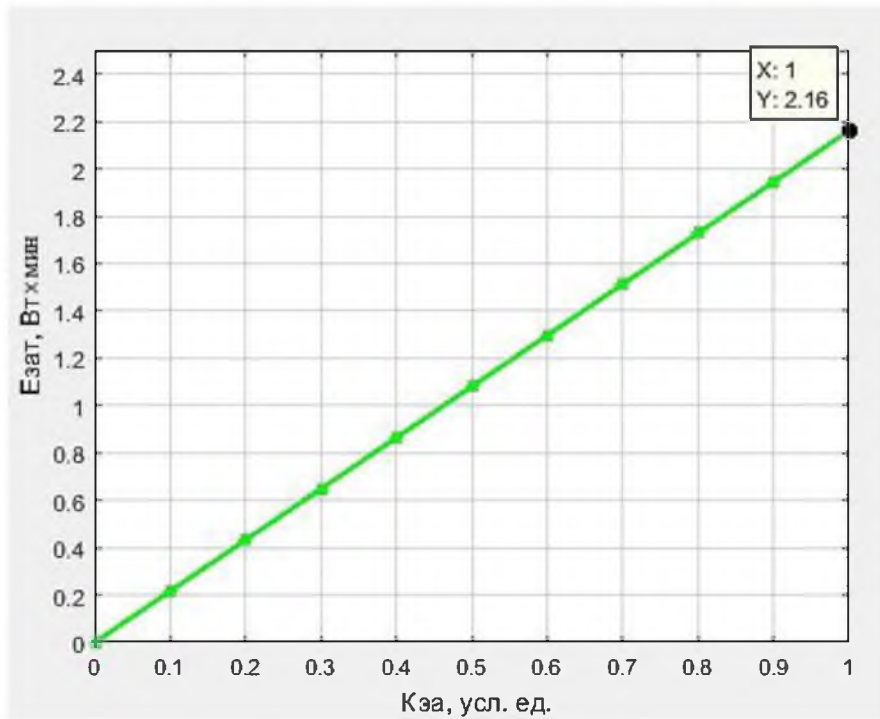


Рис. 5. График зависимости расходуемой энергии БСС ($E_{зат}$) от величины $K_{ЭА}$

Fig. 5. The dependencies graph of wireless sensor network consumed energy ($E_{зат}$) on value $K_{ЭА}$

Из графика зависимости расходуемой энергии БСС от коэффициента $K_{ЭА}$ видно, что энергозатраты БСС прямо пропорциональны коэффициенту $K_{ЭА}$, при этом функция $E_{зат}(K_{ЭА})$ подчиняется линейному закону и может быть задана уравнением прямой с угловым коэффициентом:

$$E_{зат} = k \times K_{ЭА} + b,$$

где b – действительное число, $k = \tan \alpha$ – значение тангенса угла наклона прямой к оси $K_{ЭА}$.

Аналогичным характером обладает зависимость пропускной емкости БСС от коэффициента $K_{ЭА}$, представленная на рисунке 6.

На рисунке 7 представлен график зависимости $C_{зат}(K_{РИП})$ при разных значениях $K_{ЭА}$. Из рисунка видно, что достижение тех или иных значений пропускной способности ($C_{зат}$) возможно при различных комбинациях $K_{РИП}$ и $K_{ЭА}$. Так, например, для рассмотренной БСС величина пропускной способности, равная 100 кбайт, может быть получена при следующих комбинациях: $\{K_{ЭА} = 0,6; K_{РИП} = 0,45\}$, $\{K_{ЭА} = 0,5; K_{РИП} = 0,55\}$, $\{K_{ЭА} = 0,4; K_{РИП} = 0,74\}$.

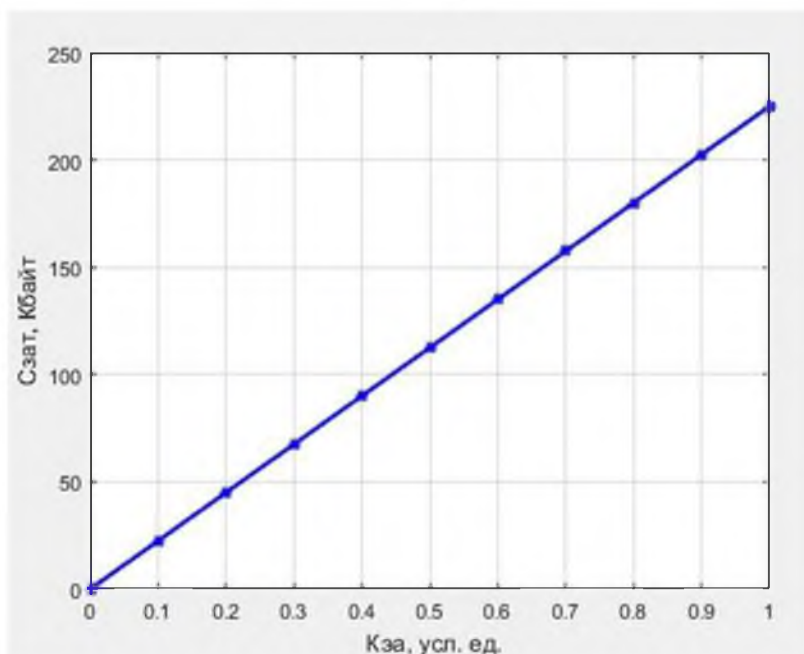


Рис. 6. График зависимости пропускной емкости БСС ($C_{зам}$) от величины $K_{ЭА}$
 Fig. 6. The dependencies graph of wireless sensor network throughput ($C_{зам}$) on value $K_{ЭА}$

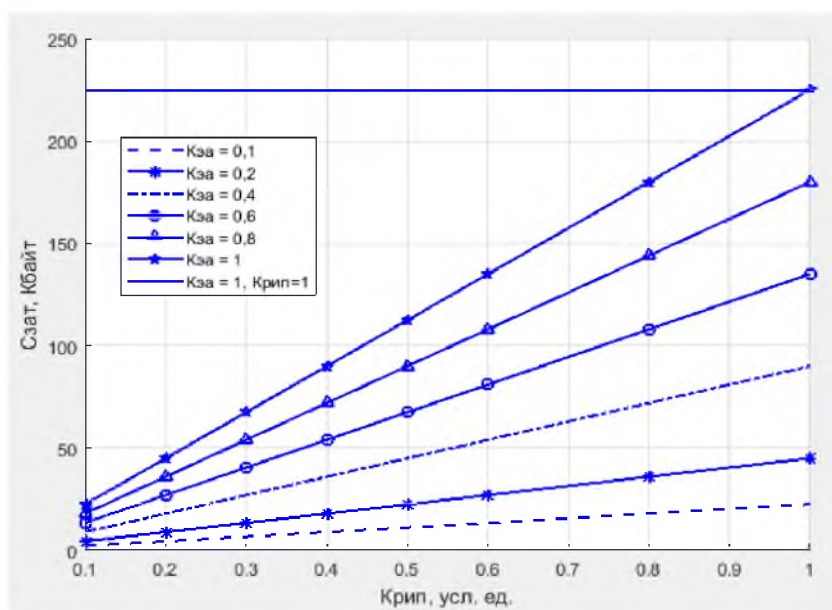


Рис. 7. График зависимости пропускной емкости БСС ($C_{зам}$) от величины $K_{РИП}$
 при разных значениях $K_{ЭА}$

Fig. 7. The dependencies graph of wireless sensor network throughput ($C_{зам}$) on value $K_{РИП}$
 at the different values $K_{ЭА}$

Способ оценки энергоэффективности агрегирования данных в БСС

Исходя из вышеизложенного, можно определить последовательность действий, необходимых для оценки энергоэффективности агрегирования данных СУ:

1. Построение модели БСС;
2. Расчёт энергии, необходимой для передачи ИП от всех СУ к БС за время t без агрегирования;

3. Расчёт пропускной способности, необходимой для передачи ИП от всех СУ к БС за время (t) без агрегирования;
4. Выбор узлов агрегирования и соответствующих им функций агрегирования ИП СУ;
5. Расчёт коэффициентов $K_{ЭА}$ и $K_{РИП}$ для каждого узла агрегирования;
6. Расчёт энергии необходимой для передачи ИП от всех СУ к БС за время t с агрегированием;
7. Расчёт пропускной способности необходимой для передачи ИП от всех СУ к БС за время t с агрегированием;
8. Расчёт энергетического выигрыша путём нахождения разницы между затраченной энергией от передачи ИП от СУ к БС без агрегирования и с агрегированием.

Выводы

В данной статье было показано, что агрегирование данных оказывает непосредственное влияние на энергопотребление и пропускную способность БСС – способствует снижению энергозатратности и увеличению пропускной емкости БСС за счет изменения количества ИП, передаваемых СУ, а также за счет сокращения совокупного размера ИП. Уменьшение количества и совокупного размера ИП приводит к снижению коммуникационной активности СУ, что обеспечивает сохранение энергии. Кроме того, проведенная оценка показала, что сокращение энергозатрат БСС путем агрегирования данных СУ, приводит к снижению информационной нагрузки на БКПД.

Качество агрегирования данных зависит от коэффициентов КЭА и КРИП. Для определения значений коэффициентов КЭА и КРИП и обеспечения одно и того же уровня энергозатратности необходимо решить задачу, которая заключается в нахождении оптимальной комбинации значений коэффициентов КЭА и КРИП. Полученные значения коэффициентов могут служить метрикой для оценки БСС.

В результате проведенных исследований разработан способ оценки энергоэффективности агрегирования разнородных данных в БСС.

В качестве направлений для дальнейших исследований может выступать решение задачи оптимизации энергопотребления БСС, которая связана с нахождением оптимального соотношения значений КЭА и КРИП для каждого узла агрегирования путём подбора функций агрегирования.

Список литературы

1. Багутдинов Р.А., Небаба С.Г., Захарова А.А. 2017. Алгоритм обработки разнородных данных для мультисенсорной СТЗ на примере анализа температуры и концентрации газа. В сборнике: ГрафиКон-2017. Труды 27-й международной научной конференции (Пермь, 24–28 сентября 2017 г.). Пермь, изд-во ПГНИУ: 97–100.
2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. 1986. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М., Наука, 544.
3. Галкин П.В. 2014. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей. ScienceRise, 2 (2): 55–61.
4. Гмурман В.Е. 2003. Теория вероятностей и математическая статистика. М., Высш. шк., 479.
5. Дьяконов В.П. 2012. MATLAB. Полный самоучитель. М., ДМК Пресс, 768.
6. Киреев А.О. 2011. Информационно-измерительная система для мониторинга и анализа энергопотребления беспроводных сенсорных систем. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Пенза, 22.
7. Кучерявый А.Е. 2007. Сенсорные сети как перспективное направление развития телекоммуникаций. В сборнике: 59-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава: Материалы. (Санкт-Петербург, 22–26 января 2007 г.). Санкт-Петербург, изд-во СПбГУТ: 5–7.
8. Лихтциндер Б.Я., Киричек Р.В., Федотов Е.Д., Голубничая Е.Ю., Кочуров А.А. 2020. Беспроводные сенсорные сети. М., Горячая Линия – Телеком, 236.
9. Микитюк Е.И. 2019. Беспроводные сенсорные сети. Молодой ученый, 261 (23): 19–21.

10. Мохсен М.Н., Богуславский И.В. 2014. Модель энергопотребления узлов беспроводной сети датчиков для увеличения времени автономной работы сети. *Advanced Engineering Research*, 14 (3): 37–44.
11. Муравьев С.В., Тараканов Е.В. 2012. Передача данных в беспроводных сенсорных сетях с приоритетами на основе агрегирования предпочтений. *Известия Томского политехнического университета*, 320 (5): 111–116.
12. Розенберг И.Н. 2015. Обработка пространственной информации. *Перспективы Науки и Образования*, 15 (3): 17–24.
13. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю. 2015. Интернет вещей. Самара, ПГУТИ, 200.
14. Сергиенко А.Б. 2002. Цифровая обработка сигналов. СПб., Питер, 608.
15. Скляр Б. 2007. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М., Вильямс, 1104. (Sklar B. 2001. *Digital communications*. NJ, Prentice Hall, 1099).
16. Hart J., Martinez K. 2006. Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*, 78 (3): 177–191.
17. Sukhchandani R., Sushma J. 2017. Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: Previous Research, Current Status and Future Directions. *Wireless Personal Communications*, 97 (4): 1–71.
18. Villas L.A., Boukerche A., De Oliveira H.A., De Araujo R.B., Loureiro A.A. 2014. A spatial correlation aware algorithm to perform efficient data collection in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Vol. 12: 69–85.
19. Virmani D., Sharma T., Sharma R. 2013. Adaptive Energy Aware Data Aggregation Tree for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 6 (1): 26–36.
20. Vuran M.C., Akan O.B., Akyildiz I.F. 2004. Spatio-temporal correlation: theory and applications for wireless sensor networks. *Elsevier Computer Networks*, 45 (3): 245–259.

References

1. Bagutdinov R.A., Nebaba S.G., Zaharova A.A. 2017. Algorithm for processing heterogeneous data for a multisensory STZ on the example of analyzing temperature and gas concentration. In: *GrafiKon-2017. Trudy 27-j mezhduнародnoj nauchnoj konferencii* (Perm, 24–28 September, 2017). Perm, Publisher: Perm State National Research University, 97–100. (in Russian).
2. Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A. 1986. *Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashihhsja vtuzov* [A guide to mathematics for engineers and college students]. Moscow, Nauka, 544.
3. Galkin P.V. 2014. Analysis of energy consumption nodes wireless sensor networks. *ScienceRise*, 2 (2): 55–61. (in Russian).
4. Gmurman V.E. 2003. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vyssh. shk., 479.
5. D'jakonov V.P. 2012. *MATLAB. Polnyj samouchitel. MATLAB* [Complete tutorial]. Moscow, DMK Press, 768.
6. Kireev A.O. 2011. *Informacionno-izmeritel'naja Sistema dlja monitoringa i analiza jenergopotreblenija besprovodnyh sensoryh sistem* [Information-measuring system for monitoring and analyzing energy consumption of wireless sensor systems.]. Avtoref. dis. ... cand. tech. sciences. Penza, 22.
7. Kucherjavj A.E. 2007. Sensor networks as a promising direction in the development of telecommunications. In: *59-ja Nauchno-tehnicheskaja konferencija professorsko-prepodavatel'skogo sostava: Materialy*. (Saint Petersburg, January 22–26, 2007). Saint Petersburg, Publisher: Saint Petersburg State University of Telecommunications, 5–7. (in Russian).
8. Lihtcinder B.Ja., Kirichek R.V., Fedotov E.D., Golubnichaja E.Ju., Kochurov A.A. 2020. *Besprovodnye sensorye seti* [Wireless Sensor Networks]. Moscow, Gorjachaja Linija – Telekom, 236.
9. Mikitjuk E.I. 2019. *Wireless sensor networks*. *Molodoj uchenyj*, 261 (23): 19–21.
10. Mohsen M.N., Boguslavskij I.V. 2014. Power consumption model of wireless sensor network nodes to increase network autonomy. *Advanced Engineering Research*, 14 (3): 37–44. (in Russian).
11. Murav'ev S.V., Tarakanov E.V. 2012. Prioritized wireless sensor network data transmission based on preference aggregation. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 320 (5): 111–116. (in Russian).
12. Rozenberg I.N. 2015. Spatial information processing. *Perspektivy Nauki I Obrazovanija*, 15 (3): 17–24. (in Russian).
13. Rosljakov A.V., Vanjashin S.V., Grebeshkov A.Ju. 2015. *Internet veshhej* [Internet of Things]. Samara, Publisher: Volga State University of Telecommunications and Informatics, 200.



14. Sergienko A.B. 2002. *Cifrovaja obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint Petersburg, Piter, 608.
15. Sklar B. 2001. *Digital communications*. New Jersey, Prentice Hall, 1099.
16. Hart J., Martinez K. 2006. Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*, 78 (3): 177–191.
17. Sukhchandan R., Sushma J. 2017. Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: Previous Research, Current Status and Future Directions. *Wireless Personal Communications*, 97 (4): 1–71.
18. Villas L.A., Boukerche A., De Oliveira H.A., De Araujo R.B., Loureiro A.A. 2014. A spatial correlation aware algorithm to perform efficient data collection in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Vol. 12: 69–85.
19. Virmani D., Sharma T., Sharma R. 2013. Adaptive Energy Aware Data Aggregation Tree for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 6 (1): 26–36.
20. Vuran M.C., Akan O.B., Akyildiz I.F. 2004. Spatio-temporal correlation: theory and applications for wireless sensor networks. *Elsevier Computer Networks*, 45 (3): 245–259.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Алексей Михайлович, магистр кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем Курского государственного университета, г. Курск, Россия

Пожидаева Ирина Александровна, магистр кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey M. Pavlov, Master of the Department of Software and Information Systems Administration, Kursk State University, Kursk, Russia

Irina A. Pozhidaeva, Master of the Department of Communication Networks and Data Transmission, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M.A. Bonch-Bruевич, St. Petersburg, Russia