

Раздел I. Моделирование процессов и систем

УДК 004.738:621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-6-19

**А.Р.Д. Алалван, Н.А.М. Шаммари, Д.А. Мищенко,
М.С. Светлов, А.А. Львов**

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ДАТЧИКОВ

Беспроводные сети датчиков (БСД) активно внедряются в различных системах дистанционного наблюдения и мониторинга распределенных объектов. БСД обладают целым рядом несомненных достоинств: гибкость, эффективность, относительная дешевизна и возможность быстрого развертывания. Однако обмен информацией и данными производится в БСД с помощью беспроводных каналов связи, подверженных воздействию, как правило, неконтролируемых помех, вызывающих ошибки передачи и даже потерю передаваемых пакетов данных, что представляет собой одну из главных проблем обеспечения надежности БСД. Другой не до конца решенной проблемой является неравномерное распределение потребляемой энергии внутри БСД в условиях жестких ограничений и требований к источникам энергии. В настоящее время для предотвращения потерь передаваемых данных более широко используются две схемы повторной передачи информации – пошаговая и сквозная. Большинство известных исследований, посвященных вопросам надежной передачи данных в БСД с использованием этих схем, выполнено экспериментальным путем. Кроме того, до сих пор отсутствуют аналитические методы оценки различных надежных транспортных решений, что затрудняет анализ предлагаемых БСД. Поэтому цель настоящей работы – синтез аналитических методов и алгоритмов исследования рабочих характеристик ретрансляционных схем сигналов в БСД. Предлагаются аналитические методы оценки схем повторной передачи в БСД, основанные на относительно новой теоретической базе – сетевом исчислении для сетей с коммутацией пакетов, представляющем собой инструмент определения размеров сети. Сначала вводятся модели трафика, обслуживания и затрат энергии. На основе этих моделей и сетевых расчетов осуществляются аналитические оценки максимальной задержки времени передачи пакетов и энергоэффективности пошаговой и сквозной повторной передач. По результатам эксперимента сравниваются в нескольких сценариях максимальная задержка и наибольшее энергопотребление этих двух схем. Кроме того, максимальная задержка, вычисленная аналитически, сравнивается с результатами моделирования. С помощью предлагаемого метода можно выбрать подходящую схему повторной передачи на основе различных устанавливаемых требований и ограничений.

Беспроводные сети датчиков; повторная передача пакета; сетевое исчисление; кривая прибытия; кривая обслуживания.

A.R.J. Alalvan, N.A.M. Shammari, D.A. Mischenko, M.S. Svetlov, A.A. L'vov

STUDY OF RETRANSMISSION SCHEMES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Wireless sensor networks (WSNs) are being actively implemented in various systems for remote observation and monitoring of distributed objects. WSNs have a number of undoubted advantages: flexibility, efficiency, relative cheapness, and the possibility of rapid deployment. However, the exchange of information and data is carried out in the WSN using wireless communication channels, which are subject to inevitable interference and noise, which leads to transmission

errors and even to the loss of transmitted data packets. Another challenge, not fully resolved, is the uneven distribution of consumed energy within the WSN in the face of stringent requirements for energy sources. Currently, there are two most widely used retransmission schemes in the loss of transmitted data, namely, hop-by-hop and end-to-end. Most of the well-known studies devoted to the issues of reliable data transmission in WSN using these schemes have been carried out experimentally. In addition, there are still no analytical methods for evaluating various reliable transport solutions, which complicates the analysis of the proposed WSN. Therefore, the aim of the proposed work is the development of analytical methods and algorithms for studying the operating characteristics of the signal relaying circuits in the WSN. Analytical methods are proposed for evaluating retransmission schemes in the WSN, based on a relatively new theoretical basis - the network calculus for packet-switched networks, which is a tool for determining the size of the network. First, traffic, service and energy cost models are introduced. Based on these models and network calculations, the maximum packet transmission delay and energy efficiency of the two main types of retransmission schemes: hop-by-hop and end-to-end retransmission, are analytically estimated. According to the results of the experiment, the maximum latency and the maximum power consumption of these two schemes are compared in several scenarios. In addition, the analytically calculated maximum delay is compared with the simulation results. With the proposed method, a suitable retransmission scheme can be selected based on the various requirements and constraints to be set.

Wireless sensor networks; packet retransmission; network calculation; arrival curve; service curve.

Введение. В последнее десятилетие в повседневную практику все активнее внедряются беспроводные сети датчиков (БСД – *Wireless Sensor Networks*) [1–5], наилучшим образом реализующие мониторинг распределенных объектов. Гибкость, эффективность, относительная дешевизна и возможность быстрого развертывания БСД обеспечивают использование новых приложений дистанционного контроля различных объектов и процессов, в том числе находящихся в опасных для людей или недоступных средах.

Традиционной архитектурой таких распределенных датчиков, объединяемых в единую совместную сеть, является многоузловая сеть с беспроводными каналами связи (БПКС), обычно с радиоканалами связи [6–8], работающими в условиях неконтролируемых изменений их состояний, в первую очередь, из-за влияния внешней среды. Кроме того, в процессе функционирования сети изменяются и внутренние параметры БПКС. В общем случае можно говорить, что передача информации в БСД происходит по БПКС с помехами, что приводит к возникновению ошибок передачи в результате наложения во времени передаваемых информационных пакетов и сигналов помех [3–5, 7, 8]. При этом наиболее критичной является возможная потеря пакетов.

Причинами потери информационных пакетов могут быть случайные сбои в работе того или иного узла, приводящие к произвольному отключению соответствующего датчика. Такие сбои возможны не только как результат ненадежности (отказов) программно-аппаратных средств конкретных узлов [7–10], но и как следствие неравномерного распределения потребляемой ими энергии в условиях жестких требований по энергетике. Эти поврежденные узлы часто образуют общую поврежденную область, которая препятствует нормальной работе БСД, приводя к потере пакетов.

Появление скоростного и непрерывно функционирующего интернета вещей (ИВ), в свою очередь, привело к созданию большого числа разнообразных беспроводных сетей и сенсорных устройств, которые используются для мониторинга и управления многими инфраструктурами. Проведенный анализ [8–10] показывает, что, несмотря на достигнутый определенный прогресс в области проектирования и разработки компонентов БСД для ИВ, все еще значителен круг стоящих перед разработчиками проблем, требующих своего оперативного решения.

Относительно невысокая надежность БПКС, в том числе из-за воздействия помех и окружающей среды в целом, а также из-за возникающих в радиоканале затуханий и замираний сигнала требуют решения целого комплекса задач обеспечения высокой надежности БСД. Большинство известных работ, посвященных вопросам надежной передачи данных в БСД, выполнено экспериментальным путем, поэтому до сих пор отсутствуют обоснованные аналитические методы оценки различных надежных транспортных решений, что затрудняет анализ предлагаемых БСД.

Все сказанное определяет цель настоящего исследования, состоящую в разработке аналитических методов и алгоритмов оценки рабочих характеристик схем ретрансляции в БСД.

В предлагаемой работе предложены аналитические методы оценки схем передачи данных в БСД, разработаны математические модели трафика, обслуживания и потребления энергии в БСД. На основе этих моделей рассчитаны характеристики их функционирования.

1. Обзор методов оценки характеристик ретрансляционных схем в беспроводных сетях. С развитием беспроводной связи и микроэлектроники развертывание БСД стала многообещающей технологией с множеством приложений, таких как удаленный помощник пациента, структурный мониторинг, наблюдение в военных целях, ИВ и т.д. [1–11, 10, 13, 14]. Для многих приложений фундаментальной проблемой является обеспечение эффективной и надежной сквозной передачи пакетов [10, 15].

Одним из наиболее распространенных подходов к повышению надежности передачи является повторная передача [10, 15–17]. В частности, в работе [15] авторы предлагают масштабируемую структуру для надежной доставки данных в нисходящем направлении с использованием импульсного сигнала ожидания первого пакета (*Wait-for-First-Packet*, WFP). В статье [16] предложен надежный транспортный протокол под названием PSFQ (*Pump Slowly and Fetch Fastly*). В этих работах реализованы типичные примеры использования пошаговой повторной передачи пакетов. В работе [17] делается попытка представить механизм адаптивной повторной передачи, который позволяет центру сбора данных выбирать датчики для повторной передачи их локальной информации в соответствии с надежностью полученной информации. Этот протокол относится к сквозной ретрансляции.

В последнее время для сетей с коммутацией пакетов было разработано сетевое исчисление как инструмент определения размеров сети [18]. В работе [19] авторы расширили эту концепцию для анализа времени задержки и предельной загрузки в сетях датчиков. Подобная процедура была названа исчислением сетей датчиков. В статье [20] предложена методология моделирования и определения размеров сетей датчиков для наихудшего случая, представляющих собой кластеры с топологией дерева. В [21] теоретические результаты расчета сети датчиков подтверждены моделированием реалистичных сценариев развертывания БСД.

В [22] авторы исследовали роль повторной передачи пакетов в случае восстановления ошибок кодирования со стиранием для надежной передачи данных в БСД путем разработки соответствующих вероятностных моделей.

В настоящей работе также используется теория сетевого исчисления для анализа максимальной временной задержки схем повторной передачи, а также, как было сказано выше, предлагаются аналитические методы оценки схем повторной передачи в БСД.

2. Модели системы

2.1. Модель трафика и модель обслуживания. В сетях датчиков сенсорный узел определяет свое окружение и генерирует входной поток трафика. Чтобы охарактеризовать этот процесс, моделируется входной поток в узле, описывающий

его совокупный трафик $F(t)$ как количество битов, поступающих в поток в течение интервала времени $[0, t]$. Кроме того, используется некоторая неубывающая функция $\alpha(t)$, ограничивающая этот совокупный поток трафика $F(t)$, который определяется следующим образом. Поток $F(t)$ ограничивается функцией $\alpha(t)$, если и только если для любого $s < t$ выполняется неравенство:

$$F(t) - F(s) \leq \alpha(t-s), \quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – так называемая *кривая прибытия* входного потока $F(t)$ [18]. *Аффинная кривая прибытия* – одна из наиболее часто используемых кривых прибытия, которая задействована во многих исследованиях [19, 20, 23]. В предлагаемой работе также используется аффинная кривая прибытия для моделирования трафика, генерируемого исходными узлами, который определяется как сумма $\alpha(t) = \rho t + \sigma$, где ρ и σ представляют собой допуск на пакетную передачу (в битах) и среднюю скорость передачи данных (в бит/с), соответственно. На рис. 1,а показаны примеры периодического кумулятивного потока $F(t)$ и аффинной кривой прибытия $\alpha(t)$.

Кривая обслуживания абстрагируется для моделирования возможностей обработки ресурсов, предоставляемых узлом в сетях с коммутацией пакетов [18]. В БСД это в основном зависит от характеристик канального уровня, таких как скорость передачи данных и способ планирования пакетов. Чтобы свести к минимуму потребление энергии, работа датчиков координируется синхронизированным методом с разделением по времени, когда датчики периодически «засыпают» (находятся в режиме ожидания) и «пробуждаются» по мере надобности [10]. Только узлы, участвующие в передаче или приеме, остаются активными, а другие пребывают в состоянии сна. Эти характеристики канального уровня могут быть смоделированы кривой обслуживания в координатах «скорость–время ожидания» [18], т.е.:

$$\beta(t) = C \frac{S}{T} [t - (T - S)]^+, \quad (2)$$

где T – длина передаваемого фрейма; S – длина слота, назначенного каналу; C – емкость канала. На этой кривой обслуживания отношение CS/T – средняя скорость обслуживания, которая описывает среднюю скорость передачи, а разность $(T - S)$ – максимальная задержка времени обслуживания, которая состоит из времени задержки постановки в очередь и времени пребывания в состоянии сна. Оператор $[x]^+$ задается следующим образом:

$$[x]^+ = \begin{cases} x & \text{при } x > 0; \\ 0 & \text{при } x \leq 0. \end{cases}$$

Пример кривой обслуживания $\beta(t)$ показан на рис. 1, б.

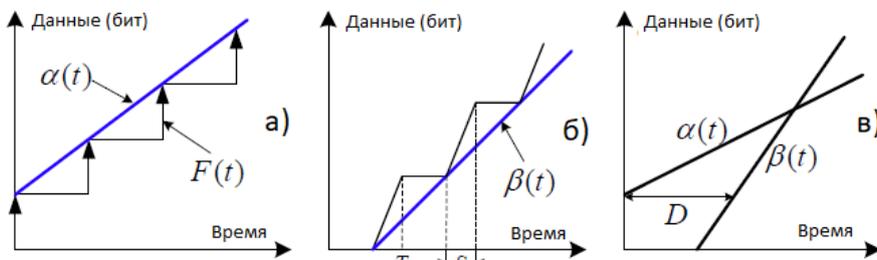


Рис. 1. Кривая прибытия $\alpha(t)$ – а); кривая обслуживания $\beta(t)$ – б); максимальная задержка D – в)

С помощью определений и свойств кривых прибытия и обслуживания можно вывести следующие теоремы на основе теории сетевого исчисления. Подробные описания и доказательства этих теорем даны в [18].

Теорема 1. Максимальная задержка. Предположим, что поток трафика $F(t)$, ограниченный кривой прибытия $\alpha(t)$, проходит через систему передачи данных, которая обеспечивает кривую обслуживания $\beta(t)$. В любой момент времени t виртуальная задержка $D(t)$ удовлетворяет соотношению:

$$D(t) \leq \sup_{t \geq 0} \inf_{\tau \geq 0} [\alpha(t) \leq \beta(t + \tau)] \quad (3)$$

Данная граница определяет максимальное время, на которое может быть задержан бит, прибывающий в систему в момент времени t . На графике верхняя граница задержки – это максимальное горизонтальное отклонение D между $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ (рис. 1, в).

Теорема 2. Граница выхода. Предположим, что поток трафика $F(t)$, ограниченный кривой прибытия $\alpha(t)$, проходит через систему передачи данных, которая обеспечивает кривую обслуживания $\beta(t)$. Тогда выходной поток ограничен следующей кривой прибытия:

$$\alpha^*(t) \leq \sup_{s \geq 0} \{\alpha(t + s) \leq \beta(s)\} \quad (4)$$

Теорема 3. Конкатенация. Предположим, что поток последовательно проходит через две системы передачи данных, которые обеспечивают кривые обслуживания β_1 и β_2 , соответственно. В этом случае объединение (конкатенация) этих двух систем обеспечивает потоку кривую обслуживания $\beta(t)$, которая определяется как:

$$\beta(t) = (\beta_1 \otimes \beta_2) \leq \inf_{0 \leq s \leq t} \{\beta_1(t - s) + \beta_2(s)\} \quad (5)$$

где оператор \otimes представляет «мини-плюс» свертку (ее определение можно найти в [18]). Если β_1 и β_2 являются кривыми обслуживания в координатах «скорость–время ожидания», т.е. $\beta_1(t) = R_1[t - T_1]^+$ и $\beta_2(t) = R_2[t - T_2]^+$, то $\beta_1 \otimes \beta_2 = R^*[t - T^*]^+$, где $R^* = \min(R_1, R_2)$ и $T^* = T_1 + T_2$.

2.2. Энергетическая модель. Следуя энергетической модели, предложенной в [24], аналогичным образом представляется потребление энергии при передаче пакетов между двумя узлами:

$$E = 2E_{start} + L(P_{tx} + P_{rx} + 2P_{cir} + P_{amp})/R, \quad (6)$$

где E_{start} представляет собой энергию для запуска передачи данных по радиоканалу; P_{tx} и P_{rx} – энергопотребление радиопередатчика в режиме передачи и приема, соответственно; P_{cir} – потребляемая мощность электронной схемы узла БСД; L – длина пакета в битах; R – скорость передачи данных; $P_{amp} = cdn/p_b$ – потребление энергии усилителем мощности, которое в основном определяется расстоянием d , на которое ведется передача, и коэффициентом ошибок по битам (BER) p_b ; c – постоянная величина, зависящая от затухания в канале и нелинейного эффекта усилителя мощности; n – показатель вероятных потерь. Энергопотребление в спящем режиме игнорируется, поскольку оно намного меньше, чем при передаче или приеме пакетов [25]. Модель (6), может быть расширена, если в нее включить потребление энергии в спящем режиме.

3. Анализ схем передачи. По разработке схем повторной передачи в БСД опубликовано достаточно много работ [10, 15, 17]. Все схемы повторной передачи, как указывалось выше, можно разделить на две основные модификации – пошаговую (*Hop-by-Hop*) и сквозную (*End-to-End*) повторные передачи (рис. 2).

Исходно предполагается, что существует многозвенный путь с n переходами между исходным узлом S и узлом назначения D и что существует механизм автоматического запроса на повторную передачу (*Automatic Repeat Request*), работающий до тех пор, пока пакет не будет успешно доставлен получателю. Пакет не принимается, пока какой-либо бит пакета получен с ошибкой (для систем без использования корректирующих кодов с исправлением ошибок).

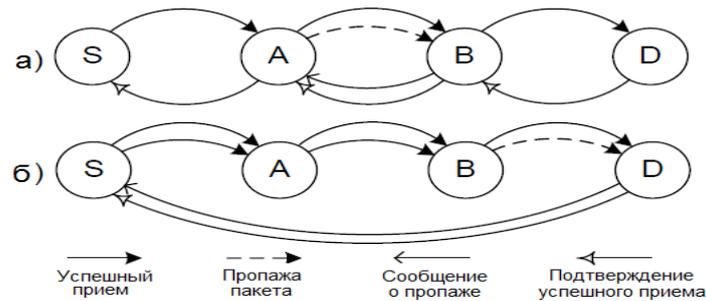


Рис. 2. Механизмы повторной передачи: а) пошаговая повторная передача (*Hop-by-Hop*); б) сквозная повторная передача (*End-to-End*)

Кроме того, предполагается наличие идеального протокола MAC (*Multiple Access Control*) [10], в котором не учитываются помехи и коллизии, поэтому считается, что сбои при доставке пакетов происходят только из-за ошибок, возникающих в канале передачи. Относительную частоту p_e ошибки передачи пакета можно вычислить по известному соотношению:

$$p_e = 1 - (1 - p_b)^L,$$

где L – длина пакета.

3.1. Пошаговая передача. В схеме пошаговой повторной передачи на каждом этапе приемник проверяет правильность приема пакета и запрашивает повторную передачу, если поступило сообщение о пропаже пакета (СПП), пока не будет получен правильный пакет. После этого на узел-источник отправляется подтверждение успешного приема (ПУП) пакета, свидетельствующее об успешном приеме. Рассмотрим пример, показанный на рис. 2,а. Первая передача пакета не удалась между узлами A и B . Поэтому узел B отправляет пакет СПП к узлу A , запрашивая повторную передачу. После этого узел A повторно передает пропавший пакет. После успешного получения пропавшего пакета узел B отправляет пакет ПУП для узла A .

Пусть m_i – количество попыток передачи на переходе с номером i между какими-либо узлами, а p_i – частота ошибок передачи пакета на переходе i . Тогда величины максимальной задержки времени передачи и потребления энергии могут быть вычислены следующим образом.

1) *Задержка:* предполагается, что длина пакетов ПУП и СПП одинаковая и равная L_a . В исходном узле S кривая прибытия выражается как $\alpha_1(t) = \rho_1 t + \sigma_1$. Согласно (2) кривая обслуживания на шаге i ($1 \leq i \leq n$) определяется в следующем виде:

$$\beta_i(t) = C \frac{S_i}{T} [t - (T - S_i)]^+, \quad (7)$$

где S_i – длина слота, отведенного каналу i . Поскольку входные данные текущего перехода равны выходным данным предыдущего перехода, то $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}^*(t)$ для ($2 \leq i \leq n$), а кривую прибытия трафика на i -м ($1 \leq i \leq n$) шаге можно получить рекурсивно на основе теоремы 2:

$$\alpha^*(t) \leq \sup_{s \geq 0} \{\alpha_i(t+s) - \beta_i(s)\} = \alpha_i(t) + \rho_i(T - S_i). \quad (8)$$

Основываясь на результатах теоремы 1 и выражениях (7) и (8), можно записать максимальную задержку времени передачи на шаге i как:

$$D(t) \leq \sup_{t \geq 0} \left\{ \inf_{\tau \geq 0} [\alpha_i(t) \leq \beta_i(t + \tau)] \right\} = \frac{\sigma_i T}{CS_i} + (T - S_i). \quad (9)$$

На каждом шаге ожидаемое количество передач может быть оценено отношением $1/(1 - p_i)$. Следовательно, ожидаемая максимальная задержка (D_{hh}) отправки пакета от исходного узла S к конечному узлу D может быть вычислена путем суммирования задержек времени передачи на каждом переходе от узла к узлу:

$$D_{hh} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 - p_i} D_i. \quad (10)$$

2) *Энергопотребление.* На потребление энергии влияют два фактора: пакеты данных и пакеты ПУП (СПП). Для простоты потребление энергии, необходимой для декодирования, не учитывается, хотя это несложно сделать. Согласно энергетической модели, потребление энергии на i -м переходе может быть рассчитано с учетом (6) следующим образом:

$$E_i = 2E_{start}^i + \frac{L + L_a}{R} (P_{tx}^i + P_{rx}^i + 2P_{cir}^i + P_{amp}). \quad (11)$$

Следовательно, общее ожидаемое потребление энергии E_{hh} для передачи пакета от исходного узла S к конечному узлу D может быть вычислено, учитывая (10), из соотношения:

$$E_{hh} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 - p_i} E_i. \quad (12)$$

3.2. Сквозная повторная передача. В схеме сквозной повторной передачи промежуточные узлы просто пересылают полученные пакеты на следующий переход и не проверяют правильность приема пакетов. Когда пакет прибывает в узел назначения D , то этот узел проверяет пакет и запрашивает повторную передачу с помощью пакета СПП, обращаясь непосредственно к узлу S , если пакет принят неправильно. В противном случае он отправляет пакет ПУП к узлу S , указывающий на успешный прием пакета. Пример на рис. 2,б).

Пусть p_i – частота ошибок при передаче пакета на шаге i , а m – количество попыток передачи. Тогда временная задержка передачи и потребление энергии могут быть получены, как показано ниже.

1) *Задержка.* В этой схеме повторная передача выполняется сквозным способом, поэтому можно вывести эквивалентную кривую обслуживания для всего канала на основе теоремы 3 и уравнения (7):

$$\beta_{e2e} = (\beta_1 \otimes \beta_2 \otimes \dots \otimes \beta_n) = R_{e2e}(t - T_{e2e}), \quad (13)$$

где R_{e2e} и T_{e2e} можно вычислить из соотношений:

$$R_{e2e} = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ C \frac{S_i}{T} \right\}; \quad T_{e2e} = \sum_{i=1}^n (T - S_i). \quad (14)$$

В соответствии с моделью трафика кривая прибытия входящего потока в узле S определяется как: $\alpha_{in}(t) = \rho_{in}t + \sigma_{in}$. На основании теоремы 1 максимальная временная задержка D_{st} для одной передачи от узла S к узлу D может быть рассчитана следующим образом:

$$D_{st} = \sup_{t \geq 0} \left\{ \inf_{\tau \geq 0} [\alpha_{in}(t) \leq \beta_{e2e}(t + \tau)] \right\} = \frac{\sigma_{in} T}{R_{e2e}} + T_{e2e}. \quad (15)$$

При сквозной повторной передаче общее ожидаемое количество передач можно оценить как $1/p_{st}$, где $p_{st} = \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$. Тогда ожидаемая максимальная задержка времени передачи D_{e2e} может быть рассчитана по выражению:

$$D_{e2e} = \frac{1}{p_{st}} D_{st}. \quad (16)$$

2) *Энергопотребление.* В схеме сквозной повторной передачи только узел-приемник должен отправлять пакеты ПУП и СПП, другие промежуточные узлы просто пересылают пакеты данных, не участвуя в процессе управления трафиком. Согласно энергетической модели, потребление энергии на i -м шаге может быть рассчитано следующим образом:

$$E_i = 2E_{start}^i + \frac{L}{R} (P_{tx}^i + P_{rx}^i + 2P_{cir}^i + P_{amp}). \quad (17)$$

Следовательно, общее ожидаемое потребление энергии E_{hbh} для передачи пакета от узла S к узлу D может быть вычислено по формуле:

$$E_{e2e} = \frac{1}{p_{st}} \sum_{i=1}^n E_i + \frac{L}{R} (P_{tx}^i + P_{rx}^i + 2P_{cir}^i + P_{amp}). \quad (18)$$

В (18) первый элемент вычисляет потребление энергии для передачи пакетов данных, а второй элемент вычисляет энергию для передач пакетов ПУП и СПП.

4. Оценка работоспособности БСД

4.1. *Экспериментальная установка.* В этом разделе сравнивается максимальная задержка по времени передачи данных и потребление энергии для схем пошаговой и сквозной повторной передач. Параметры, используемые в экспериментах, показаны в таблице, которая соответствует параметрам, использованным в [25–27]. Расстояние между линиями связи выбирается случайным образом от 5 до 10 м, что типично для большинства приложений БСД. Длины фрейма T и слота S выбраны равными 0,2 с и 0,01 с, соответственно. Скорость входных данных для схемы сквозной повторной передачи $\rho_{in} = 30$ бит/с, что соответствует передаче одного пакета каждые восемь секунд. Для пошаговой схемы количество пакетов ПУП (СПП) такое же, как и пакетов данных, поэтому скорость передачи данных на первом переходе $\rho_1 = (1 + L/L_a) \rho_{in}$. Размеры пакетов данных – по 60 бит.

Таблица

Параметры передачи пакетов в эксперименте

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Мощность при передаче пакета	P_{tx}	19,1	мВт
Мощность при приеме пакета	P_{rx}	14,6	мВт
Мощность электронных компонентов	P_{cir}	12	мВт
Начальная энергия	E_{start}	1,0	мкДж
Длина передаваемого пакета данных	L	240	бит
Длина пакетов ПУП и СПП	L_a	80	бит
Пропускная способность канала	C	19,2	кбит/с

4.2. Сравнение двух методов передачи. Проводились следующие эксперименты, чтобы сравнить максимальную задержку по времени передачи и энергопотребление двух схем повторной передачи. Значения величины BER варьировались от 10^{-4} до 5×10^{-3} . На рис. 3 видно, что максимальная временная задержка схем повторной передачи увеличивается с увеличением BER. Кроме того, максимальное время задержки увеличивается с ростом числа переходов. Более того, максимальные временные задержки схемы пошаговой повторной передачи больше, чем у схемы сквозной повторной передачи. Когда число переходов равно 2, среднее максимальное время задержки сквозной схемы на 28,9% меньше, чем у пошаговой схемы. Когда число переходов равно 4 и 6, длительности максимальных задержек сквозной схемы падают на 43,8% и 49,2%, соответственно. Причина в том, что в схеме пошаговой передачи каждый промежуточный узел должен передавать пакеты ПУП (СПП), что, естественно, приводит к увеличению трафика, поэтому время задержки выше, чем при сквозной схеме.

На рис. 4 показано энергопотребление двух схем с разными значениями BER. Когда величина BER увеличивается с 10^{-4} до 10^{-3} , потребление энергии уменьшается. Но когда величина BER увеличивается с 2×10^{-3} до 5×10^{-3} , потребление энергии также увеличивается. Причина в том, что усилителю мощности необходимо потреблять больше энергии, чтобы гарантировать меньшее значение BER на приемнике (уравнение (6)). Следовательно, когда величина BER низка, потребление энергии может быть выше. На рис. 4 также видно, что энергопотребление при пошаговой схеме меньше, чем при сквозной схеме. Это связано с тем, что в сквозной схеме пакеты с ошибками не будут отбраковываться до тех пор, пока они не достигнут пункта назначения, что приводит к потере энергии. Но такого вида потерь энергии можно избежать в схеме пошаговой передачи.

На рис. 5 и 6 показано сравнение величин задержки и потребления энергии, соответственно, от изменения вероятности успешного достижения пакетом цели. На рис. 5, когда величина BER низка (10^{-4}), показатели сквозной схемы лучше, чем у пошаговой схемы. Но когда величина BER высока (10^{-3}), у пошаговой схемы показатели выше. Это указывает на то, что при высоком значении BER для достижения той же целевой вероятности успеха требуется больше попыток повторных передач по сквозной схеме.

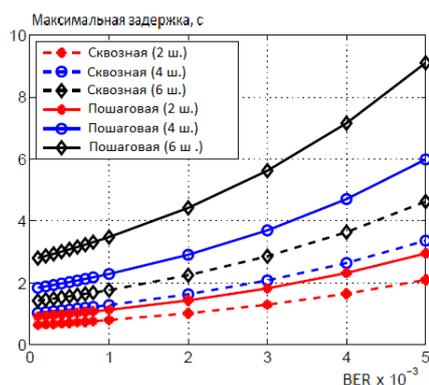


Рис. 3. Сравнение максимальной задержки передачи пакетов для двух способов передачи в зависимости от BER

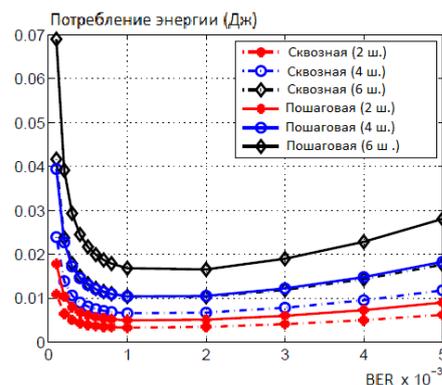


Рис. 4. Сравнение энергопотребления двух способов передачи в зависимости от BER

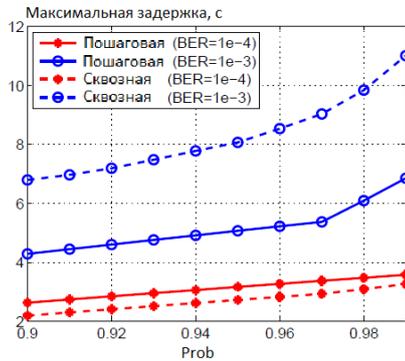


Рис. 5. Сравнение максимальной задержки у двух способов передачи в зависимости от вероятности успешного достижения пакетом цели ($Prob$) для различных BER

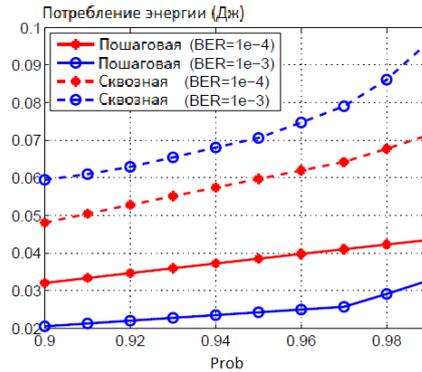


Рис. 6. Сравнение энергопотребления для двух способов передачи в зависимости от вероятности успешного достижения пакетом цели ($Prob$) при различных BER

На рис. 6 показано, как потребление энергии изменяется в зависимости от вероятности успешного достижения пакетом цели. Можно видеть, что схема сквозной ретрансляции потребляет в среднем на 35,8% и 65,9% больше энергии, чем схема поэтапной передачи, когда величина BER составляет 10^{-4} и 10^{-3} , соответственно. Кроме того, можно заметить, что для схемы пошаговой передачи потребление энергии при высоком значении BER (10^{-3}) меньше, чем при низком значении BER (10^{-4}). Причина в том, что усилитель мощности потребляет больше энергии, чтобы гарантировать меньший уровень BER на приемнике.

Чтобы проверить результаты оценки временной задержки, сравнивались аналитические результаты с результатами моделирования с использованием пакета MATLAB для одних и тех же входных данных. Длина пути составляет 4 перехода, а величина BER составляет 5×10^{-4} . Другие параметры показаны в таблице. На рис. 7 видно, что все результаты моделирования находятся в пределах аналитических результатов. Это указывает на то, что сетевые вычисления хорошо справляются с ограничением длительностей задержек передачи пакетов. Для схем сквозной и пошаговой ретрансляции аналитические задержки на 4,3% и 5,8% больше, чем смоделированные максимальные задержки, соответственно.

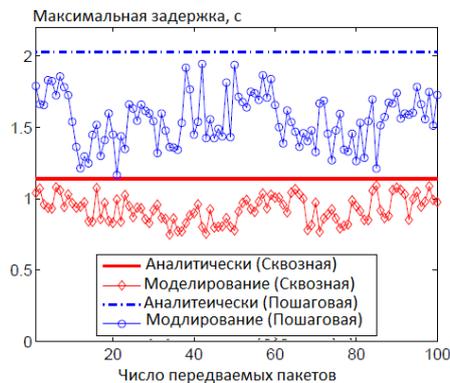


Рис. 7. Сравнение аналитически рассчитанных максимальных задержек передачи данных с результатами, полученными с помощью моделирования

Выводы. Из-за ненадежной беспроводной связи и ограниченного бюджета энергии обеспечение надежной передачи данных оказалось нетривиальной проблемой для БСД. Способ на основе повторной передачи был принят как один из наиболее распространенных схем решения этой проблемы. Впервые представлена модель трафика, модель обслуживания и модель энергии. На основе этих моделей разработаны аналитические методы оценки максимальной длительности задержки передачи и потребления энергии. Одновременно рассмотрена методология получения вероятностной оценки успешной передачи пакетов при схемах поэтапной и сквозной повторной передач.

Предложенный аналитический метод определения границ временной задержки передачи пакетов подтвержден результатами моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Stankovic J.A., Wood A.D., HeGreig D.* Realistic Applications for Wireless Sensor Networks // Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 835-863.
2. *Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E.* Wireless Sensor Networks: a Survey // Computer Networks. – 2002. – Vol. 38, No. 4. – P. 393-422.
3. *L'vov A.A., Klenov D.V., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A.* Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems // Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040/.
4. *Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Кузин С.А.* Распределенная система датчиков для авионики, управляемая по беспроводному радиоканалу // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2017. – С. 100-103.
5. *Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Кузин С.А., Светлов М.С.* Распределенная система датчиков для управления на основе беспроводного радиоканала связи // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. VIII Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 306-313.
6. *Кузин С.А., Соколов Д.Н., Ивженко С.П., Умнова Е.Г., Пчелинцева Е.Г., Фролова Н.Б.* Модель беспроводной сенсорной сети повышенной производительности и надежности // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2019. – С. 495-502.
7. *Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Светлова М.К.* Информационный канал повышенной помехоустойчивости в распределенных беспроводных бортовых системах // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. VIII Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 314-321.
8. *Львов А.А., Кузин С.А., Светлов М.С., Львов П.А.* Моделирование распределенной системы датчиков давления на основе беспроводного радиоканала связи // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Матер. V Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. Т. 1. – Тамбов: Изд. центр «ТГТУ», 2018. – Вып. 5. – С. 54-60.
9. *Кузин С.А., Аль-Таи О.Д.М., Белянская И.А.* Модельные исследования энергоэффективной передачи сигналов данных в беспроводной сенсорной сети // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2019. – С. 503-513.
10. *Алалван А.Р.Д., Львов П.А., Светлов М.С., Львов А.А., Миценко Д.А., Никифоров А.А.* Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. X Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 273-280.
11. *J., Mukherjee B., Ghosal D.* Wireless Sensor Network Survey // Computer Networks. – 2008. – Vol. 52. – P. 2292-2330.
12. *Prodanovic R., Rancic D., Vulic I., Zoric N., Bogicevic D., Ostojic G., Sarang S., Stankovski S.* Wireless Sensor Network in Agriculture: Model of Cyber Security // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (6747). – P. 1-22. – DOI: 10.3390/s20236747.

13. *Muduli L., Mishra D.P., Jana P.K.* Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2018. – Vol. 106. – P. 48-67.
14. *Culler D., Estrin D., Srivastava M.* Overview of Sensor Networks // *IEEE Computer*. – 2004. – Vol. 37, No. 8. – P. 41-49.
15. *Park S.J., Vedantham R., Sivakumar R., Akyildiz I.F.* A Scalable Approach for Reliable Downstream Data Delivery in Wireless Sensor Networks // *Proc. of the 5th ACM Int. Symp. on Mobile ad hoc Networking and Computing*. – 2004. – P. 78-89.
16. *Wan C.Y., Campbell A.T., Krishnamurthy L.* PSFQ: a Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks // *Proc. of the 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. – 2002. – P. 1-11.
17. *Pai H., Sung J., Han Y.S.* Adaptive Retransmission for Distributed Detection in Wireless Sensor Networks // *IEEE Int. Conf. on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'06)*. – 2006. – P. 2-7.
18. *Boudec J., Thiran P.* Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet, Springer: LNCS 2050, 2004.
19. *Schmitt J.B., Roedig U.* Sensor Network Calculus – a Framework for Worst Case Analysis // *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05)*. – 2005. – P. 141-154.
20. *Koubaa A., Alves M., Tovar E.* Modeling and Worst-case Dimensioning of Cluster-tree Wireless Sensor networks // *Proc. 27th IEEE Int. Real-time Systems Symp. (RTSS'06)*. – 2006. – P. 412-421.
21. *Roedig U., Gollan N., Schmitt J.B.* Validating the Sensor Network Calculus by Simulations // *Proc. 2nd Performance Control in Wireless Sensor Networks Workshop at the 2007 WICON Conf.* – 2007. – Article No. 34. – P. 1-8.
22. *Liu B., Ren F., Lin C., Ouyang Y.* Performance Analysis of Retransmission and Redundancy Schemes in Sensor Networks // *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC'08)*. – 2008. – P. 4407-4413.
23. *Schmitt J.B., Zdarsky F.A., Thiele L.* A Comprehensive Worst Case Calculus for Wireless Sensor Networks with In-network Processing // *Proc. 28th IEEE Int. Real-time Systems Symposium (RTSS'07)*. – 2007. – P. 193-202.
24. *Xia F.* QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8, No. 2. – P. 1099-1110.
25. *Raghunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M.B.* Energyaware Wireless Microsensor Networks // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2002. – Vol. 19, No. 3. – P. 40-50.
26. *Taddia C., Mazzini G.* On the Retransmission Method in Wireless Sensor Networks // *28th IEEE Int. Real-Time Systems Symp.* – 2007. – P. 193-202.
27. Crossbow Technology. Mica2 Data sheet. – Режим доступа: [http://www.xbow.com/products/Product pdf files /Wireless pdf/MICA2 Datashet.pdf](http://www.xbow.com/products/Product%20pdf%20files/Wireless%20pdf/MICA2%20Datashet.pdf) (дата обращения: 12.05.2021).

REFERENCES

1. *Stankovic J.A., Wood A.D., HeGreig D.* Realistic Applications for Wireless Sensor Networks, *Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 835-863.
2. *Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E.* Wireless Sensor Networks: a Survey, *Computer Networks*, 2002, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422.
3. *L'vov A.A., Klenov D.V., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A.* Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems, *Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. Minsk, Belarus, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040/.
4. *L'vov A.A., L'vov P.A., Svetlov M.S., Kuzin S.A.* Raspredelyonnaya sistema datchikov dlya avioniki, upravlyaemaya po besprovodnomu kanalu [Distributed sensor system for avionics, wirelessly controlled], *Nadezhnost' i kachestvo* [Reliability and Quality]: TRudy' Mezhdunar. Symp. [Proc. of Int. Symp.]. Penza: PSU, 2017, Vol. 1, pp. 100-103.
5. *Klenov D.V., L'vov A.A., L'vov P.A., Kuzin S.A., Svetlov M.S.* Raspredeleonnaya sistema datchikov dlya upravleniya na osnove besprovodnogo radiokanala svyazi [Distributed sensor system for control based on wireless radio communication channel], *Sistemnyy sintez i*

- prikladnaya sinergetika: Sb. tr. VIII Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, pp. 306-313.
6. Kuzin S.A., Sokolov D.N., Ivzhenko S.P., Umnova E.G., Pchelintseva E.G., Frolova N.B. Model' besprovodnoy sensornoy seti povyshennoy proizvoditel'nosti i nadezhnosti [A model of a wireless sensor network of increased performance and reliability], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of control, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP «Lodi», 2019, pp. 495-502.
 7. Klenov D.V., L'vov A.A., L'vov P.A., Svetlov M.S., Svetlova M.K. Informatsionnyy kanal povyshennoy pomekhoustoychivosti v raspredelennykh besprovodnykh bortovykh sistemakh [Information channel of increased noise immunity in distributed wireless onboard systems], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. VIII Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and applied synergetics: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, pp. 314-321.
 8. L'vov A.A., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A. Modelirovanie raspredelennoy sistemy datchikov davleniya na osnove besprovodnogo radiokanala svyazi [Modeling a distributed system of pressure sensors based on a wireless radio communication channel], *Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizayn: Mater. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the V International scientific-practical conference]: in 3 vol. Vol. 1. Tambov: Izd. tsentr «TGTU», 2018, Issue 5, pp. 54-60.
 9. Kuzin S.A., Al'-Tai O.D.M., Belyanskaya I.A. Model'nye issledovaniya energoeffektivnoy peredachi signalov dannykh v besprovodnoy sensornoy seti [Model studies of energy-efficient transmission of data signals in a wireless sensor network], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP «Lodi», 2019, pp. 503-513.
 10. Alalvan A.R.D., L'vov P.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Nikiforov A.A. Problemy obespecheniya nadezhnosti besprovodnykh setey datchikov [Problems of ensuring the reliability of wireless sensor networks], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. X Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, pp. 273-280.
 11. J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless Sensor Network Survey, *Computer Networks*, 2008, Vol. 52, pp. 2292-2330.
 12. Prodanovic R., Rancic D., Vulic I., Zoric N., Bogicevic D., Ostojic G., Sarang S., Stankovski S. Wireless Sensor Network in Agriculture: Model of Cyber Security, *Sensors*, 2020, Vol. 20 (6747), pp. 1-22. DOI: 10.3390/s20236747.
 13. Muduli L., Mishra D.P., Jana P.K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review, *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, Vol. 106, pp. 48-67.
 14. Culler D., Estrin D., Srivastava M. Overview of Sensor Networks, *IEEE Computer*, 2004, Vol. 37, No. 8, pp. 41-49.
 15. Park S.J., Vedantham R., Sivakumar R., Akyildiz I.F. A Scalable Approach for Reliable Downstream Data Delivery in Wireless Sensor Networks, *Proc. of the 5th ACM Int. Symp. on Mobile ad hoc Networking and Computing*, 2004, pp. 78-89.
 16. Wan C.Y., Campbell A.T., Krishnamurthy L. PSFQ: a Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proc. of the 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, 2002, pp. 1-11.
 17. Pai H., Sung J., Han Y.S. Adaptive Retransmission for Distributed Detection in Wireless Sensor Networks, *IEEE Int. Conf. e on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'06)*, 2006, pp. 2-7.
 18. Boudec J., Thiran P. Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Springer, LNCS 2050, 2004.
 19. Schmitt J.B., Roedig U. Sensor Network Calculus – a Framework for Worst Case Analysis, *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05)*, 2005, pp. 141-154.

20. Koubaa A., Alves M., Tovar E. Modeling and Worst-case Dimensioning of Cluster-tree Wireless Sensor networks, *Proc. 27th IEEE Int. Real-time Systems Symp. (RTSS'06)*, 2006, pp. 412-421.
21. Roedig U., Gollan N., Schmitt J.B. Validating the Sensor Network Calculus by Simulations, *Proc. 2nd Performance Control in Wireless Sensor Networks Workshop at the 2007 WICON Conf.*, 2007, Article No. 34, pp. 1-8.
22. Liu B., Ren F., Lin C., Ouyang Y. Performance Analysis of Retransmission and Redundancy Schemes in Sensor Networks, *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC'08)*, 2008, pp. 4407-4413.
23. Schmitt J.B., Zdarsky F.A., Thiele L. A Comprehensive Worst Case Calculus for Wireless Sensor Networks with In-network Processing, *Proc. 28th IEEE Int. Real-time Systems Symposium (RTSS'07)*, 2007, pp. 193-202.
24. Xia F. QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks, *Sensors*, 2008, Vol. 8, No. 2, pp. 1099-1110.
25. Raghunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M.B. Energyaware Wireless Microsensor Networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, Vol. 19, No. 3, pp. 40-50.
26. Taddia C., Mazzini G. On the Retransmission Method in Wireless Sensor Networks, *28th IEEE Int. Real-Time Systems Symp.*, 2007, pp. 193-202.
27. Crossbow Technology. Mica2 Data sheet. Available at: [http://www.xbow.com/products/Product pdf files /Wireless pdf/MICA2 Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/products/Product%20pdf%20files/Wireless%20pdf/MICA2%20Datasheet.pdf) (accessed 12 May 2021).

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Д.А. Зимняков.

Алалван Амин Раад Джихад – Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина; e-mail: ameenraad2@gmail.com; г. Саратов, Россия; тел.: 79915003091; аспирант.

Шаммари Наджм Абед Мандила – e-mail: najim.abd55@yahoo.com; аспирант.

Мищенко Дмитрий Алексеевич – e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; тел. +79093353999; аспирант.

Львов Алексей Арленович – e-mail: alvova@mail.ru; тел.: +79172015675; кафедра радиоэлектроники и телекоммуникации; д.т.н.; профессор.

Светлов Михаил Семенович – Институт проблем точной механики и управления РАН; e-mail: svetlovms@yandex.ru; г. Саратов, Россия; тел.: +79878263745; лаборатория системных проблем управления и автоматизации в машиностроении; д.т.н.; в.н.с.

Alalvan Amin Raad Jihad – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: ameenraad2@gmail.com.ru; Saratov, Russia; phone: +79915003091; postgraduate student.

Shammari Najim Abed Mandila – e-mail: najim.abd55@yahoo.com; postgraduate student.

Mishchenko Dmitriy Alexeevich – e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; phone: +79093353999; postgraduate student.

L'vov Alexey Arlenovich – e-mail: alvova@mail.ru; phone: +79172015675; the department of radioelectronics and telecommunications; dr. of eng. sc.; professor.

Svetlov Michael Semenovich – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; Saratov, Russia; phone: +79878263745; laboratory of system problems of control and automation in mechanical engineering;; dr. of eng. sc.; leading researcher.