

УДК 681.518

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.29.2.038](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.29.2.038)

Выбор оптимального протокола маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях передачи данных

В.О. Ключников

*Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М.Буденного,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Резюме: В связи с бурным развитием беспроводных технологий, оптимальный выбор типов сетей и протоколов маршрутизации является актуальной задачей. Рассматривается современное состояние моделей трафика с точки зрения протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях (БСС). Класс соответствующих сетей с низким энергопотреблением (LLN) обеспечивает эффективную маршрутизацию при передаче пакетов данных в небольших локальных сетях. Протокол динамической маршрутизации AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector) в БСС минимизирует длину маршрута трафика. Моделирование трафика в БСС рассмотрено на примере передачи цветных изображений. Для агрегированных разнородных потоков трафика в сети применен критерий Колмогорова, и получены зависимости позволяющие рассчитать коэффициент Хёрста с помощью анализа вариации дисперсии $H = 0,768$. Этот же параметр рассчитан как оптимальный для пакета изображений на сенсорном поле $50 \times 50 \text{ м}^2$ в зависимости от количества передающих узлов и равен $H = 0,845$. Для БСС рассмотрены различные варианты подключений с различными вариантами подключения клиента и оператора при наличии или отсутствии базовой станции. Также для беспроводных сенсорных сетей выполнено сравнение протоколов RPL и AODV путем моделирования. Показано, первый является оптимальным. С точки зрения перспектив сетей 5-го поколения возможно применение D2D (device-to-device) подключения. В этом варианте из двух протоколов (AODV, DSDV) AODV более предпочтителен как по минимуму времени общей задержки, так и по минимуму количества шагов при передаче данных. Развитие беспроводных сетей 5-го поколения выведет трафик на уровень широкополосного проводного Интернета и обеспечит качественно новый уровень возможностей для клиентов этих сетей.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, RPL-протокол, AODV-протокол, D2D-подключения, коэффициент Хёрста, критерий Колмогорова, сеть 5G.

Для цитирования: Ключников В.О. Выбор оптимального протокола маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях передачи данных. Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/Klyuchnikov_2_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.038

Choosing the Best Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

V.O. Klyuchnikov

*Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenny
St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract: Due to the rapid development of wireless technologies, the optimal choice of network types and routing protocols is an urgent task. The current state of traffic models in terms of routing protocols in wireless sensor networks (WSN) is considered. The class of corresponding low-power network (LLN) provides efficient routing when transmitting data packets in small local networks. The AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector) dynamic routing protocol in the BSS minimizes the length of the traffic route. Modeling traffic in the FSU is considered using color images as an example. For aggregated

heterogeneous traffic flows in the network, the Kolmogorov criterion is applied, and dependences are obtained that allow one to calculate the Hurst coefficient using analysis of the variant variable $H = 0,768$. The same parameter is calculated as optimal for a packet of images on a sensor field of $50 \times 50 i^2$ depending on the number of transmitting nodes and is equal to $H = 0,845$. For the WSN, various connection options with various connection options for the client and operator in the presence or absence of a base station are considered. Also, for wireless sensor networks, the RPL and AODV protocols are compared by simulation. Shown, the first is optimal. From the perspective of the 5th generation networks, it is possible to use D2D (device-to-device) connections. In this version of the two protocols (AODV, DSDV), AODV is more preferable both for the minimum total delay time and the minimum number of steps in data transfer. The development of 5th generation wireless networks will bring traffic to the level of broadband wired Internet and provide a qualitatively new level of opportunities for customers of these networks.

Keywords: wireless sensor network, RPL protocol, AODV protocol, D2D connections, Hurst coefficient, Kolmogorov criterion, 5G network.

For citation: V.O. Choosing the optimal routing protocol in wireless sensor data networks.

Modeling, Optimization and Information Technology. 2020;8(2). Available from:

https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/Klyuchnikov_2_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.038 (In Russ).

Введение

Информация, данные и знания в современном, динамически меняющемся мире, являются неоспоримой ценностью и решающим фактором развития как для малого предприятия, так и для целой страны.

В результате развития вычислительной техники, а также за счет повсеместного внедрения средств мониторинга (датчики, программно-аппаратные автоматизированные системы) и учета поведенческой деятельности человека генерируется значительный поток данных, которые необходимо хранить и в последующем анализировать. Кроме того, поток данных ускорился благодаря использованию современных устройств связи для мобильных абонентов и всемирному успеху социальных платформ.

Это приводит к необходимости сбора огромного количества данных (объемы собираемых данных в хранилища, зачастую, превышают 10^{15} байт информации) как для решения стратегических задач анализа и принятия решений, так и для коммерческих целей по ведению учета и составлению отчетности [1].

Однако процесс принятия решений, основанный на обнаружении практически полезных и доступных интерпретации знаний, а также поиске скрытых закономерностей, становится эффективнее при использовании средств визуального моделирования данных, позволяющих эксперту-аналитику проверять гипотезы и выдвигать требования к данным, анализировать полученные результаты [2,3]. Для этого все чаще применяются системы бизнес-аналитики (Business Intelligence – BI), дающие возможность оперативной трансформации данных и предоставления этих данных в удобной для восприятия человеком форме посредством интерактивных визуализаций.

Системы BI, как класс систем реализующих принципы систем поддержки принятия решений (СППР) акцентируются на интеллектуальном управлении данными и подразумевают применение совокупности технологий, программного обеспечения и практик, направленных на достижение целей бизнеса[4].

Исходные детальные данные, которые необходимо анализировать, как правило, хранятся в транзакционных OLTP (On-Line Transaction Processing) системах. Для транзакционных систем, рассчитанных на выполнение операций в режиме реального

времени, основным приоритетом выполнения операций является обеспечение минимального времени отклика при максимальной загрузке системы.

Кроме того, исходные данные для анализа могут содержаться в файлах и во внешних системах, быть слабо структурированными (для обработки такие данные должны проходить через специальные процедуры структуризации). Как правило при использовании в компании разнородных источников для их объединения требуется ведение мастер данных: справочников, классификаторов и другой нормативно-справочной информации [5].

В следствие этого в современных системах ВІ применяется концепция использования хранилищ данных (ХД), которые решают задачи структуризации и объединения исходных данных с учетом их возможной недостоверности, противоречивости и быстроты изменений посредством выполнения ряда процедур: консолидации данных, трансформации, очистки и предобработки данных [5,6].

Широко применяемые в корпоративных хранилищах модели данных опираются на многомерное представление данных. Такие модели и схемы представления данных просты для понимания и построения запросов, оптимизированы для анализа и эффективны с точки зрения описания бизнес-процессов, но с точки зрения физического представления «больших данных» имеют ряд существенных недостатков. К недостаткам можно отнести невозможность загрузки всех данных в многомерную модель из-за их размера, сложность построения моделей для распределенных по узлам кластера данных, необходимость денормализации таблиц фактов, что может значительно увеличить объем обрабатываемых данных.

Немаловажным считается тот факт, что детальный и быстрый анализ исходных данных для извлечения скрытых знаний невозможен без «понимания» контекста данных. При сравнении различных моделей данных указывается, что отдельные единицы информации могут быть малозначимыми, с точки зрения восприятия конечным пользователем [6].

Информация может быть собрана в бесконечное количество наборов и информационных элементов, которые существуют одновременно в любом количестве разных информационных наборов. И чтобы довести информацию до уровня интеллектуальных знаний, эта информация должна быть контекстуализирована [7].

Таким образом при проектировании информационных структур для представления данных, призванных решать задачи для систем бизнес-аналитики необходимо учитывать объемы обрабатываемых данных, а также время, необходимое время на изменение аналитической модели при изменениях бизнес-задач, в том числе по причине изменений структуры данных на источнике.

Поэтому, в отличие от традиционного подхода использования хранилищ данных совместно с системами бизнес-аналитики, активно применяются: различные подходы к построению витрин данных, вычисления в памяти (In-Memory Computing) в системах бизнес-аналитики и использование ассоциативных моделей данных.

Предлагаемый в работе подход построения оперативно-аналитических витрин данных призван обеспечивать доступность источников, быстроту и структуризацию данных для решаемых задач.

Модели трафика и протоколы маршрутизации в БСС

Среди наиболее распространенных моделей трафика в БСС выделяют простейший поток, поток Эрланга и др. Первый характеризуется стационарностью, ординарностью и «отсутствием последствия» (т.е. в конкретный момент времени не зависит от того, что было в прошлом). Данная модель широко применима в сетях с

коммутацией каналов. В сетях с пакетной коммутацией применяют вторую модель с введением коэффициентов фрактальности или коэффициентов Хёрста со значениями от 0,5 до 1 и с разбросом во времени, отличающимся от экспоненциального [2].

В системах M2M-подключений можно выделить три типа трафика: опосредованный, детерминированный и служебный. Соответственно, для автоматических систем с редким случайным потоком событий, для систем с применением пассивных датчиков (например, сбор данных или диспетчерское управление), где интервалы между опросами не носят случайный характер, и для систем с активными датчиками, где необходимо решать задачи по устранению системных или аппаратных сбоев.

Одним из направлений БСС является класс сетей, характеризуемых низким потреблением энергии (LLN – Low power and lossy network). Тип LLN предназначен для сетей с небольшим трафиком, например, для «умного дома» или локальных вычислений. Трафик в таких типах сетей требует эффективной маршрутизации для передачи пакетов данных. Наиболее подходящим протоколом для обеспечения таких потребностей в персональных сетях IEEE 802.15 является IPv6 [3]. Сетевой уровень в них обеспечивает маршрутизацию и осуществляет перенаправление от одного узла к другому (Рисунок. 1).

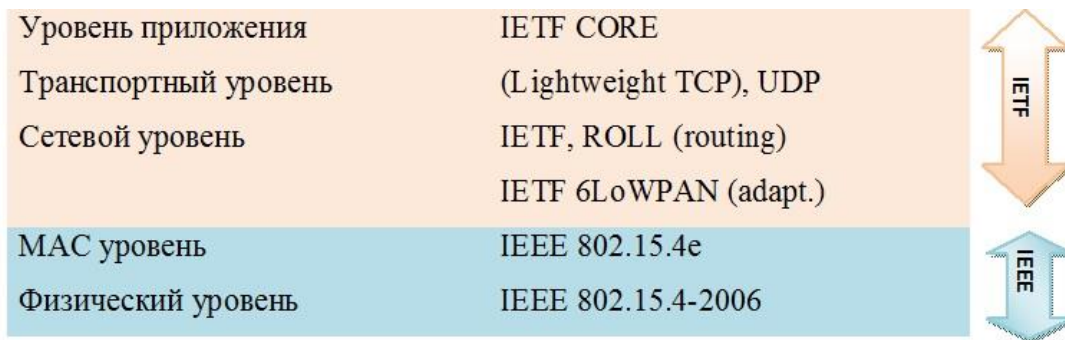


Рисунок 1 – Уровни взаимодействия в классе сетей LLN
 Figure 1 – Interworking Levels in the LLN Network Class

Другим решением в БСС является протокол динамической маршрутизации AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), который минимизирует время передачи информации от узла к узлу [5]. Такая топология позволяет осуществлять передачу данных путем выбора кратчайшего маршрута, в котором узлы пользователей способны динамически претерпевать изменения (Рисунок 2). Таблица маршрутизации в случае сбоя выбирает кратчайший путь без создания стационарных путей обмена данными (Рисунок 3).

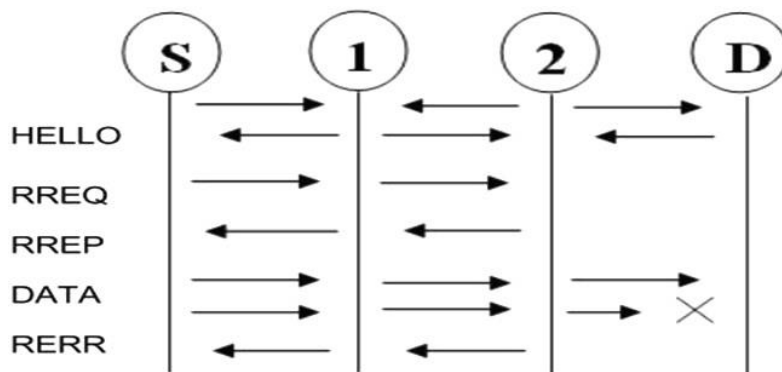


Рисунок 2 – Обмен сообщениями в протоколе AODV
 Figure 2 – AODV Messaging

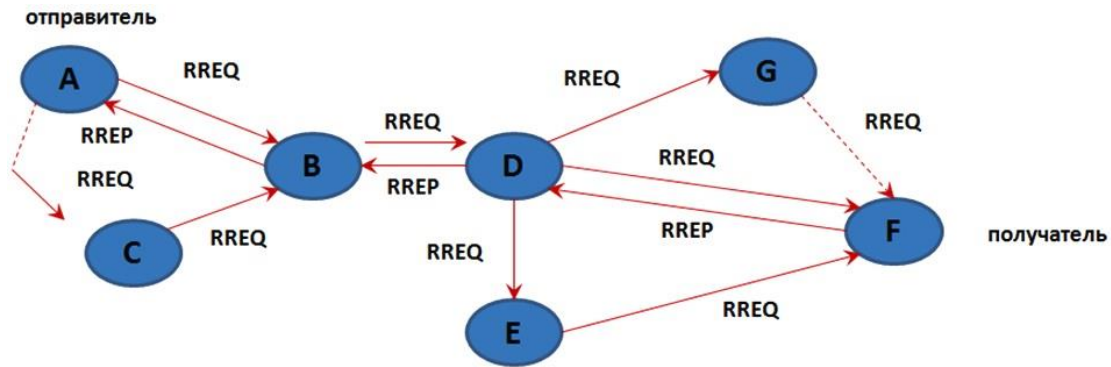


Рисунок 3 – Принцип работы протокола AODV.
Figure 3 – The principle of operation of the AODV protocol

Преимуществом протокола AODV в передаче данных с установленным маршрутом является отсутствие дополнительного трафика. К недостаткам относят наличие иерархии доменов, что снижает оптимальность маршрутизации и требует наличия служебного трафика.

Моделирование трафика в сетях БСС

Рассматривается процесс передачи цветных изображений в M2M-приложениях для сетей БСС [6]. Отличительной данной процесса особенностью является пошаговая передача данных через узлы сенсорной сети и сжатие размера изображения согласно стандарту JPEG путем кодировки и декодировки (Рисунок 4). Такой способ передачи не чувствителен к задержкам и гарантирует доставку изображения потребителю (клиенту).

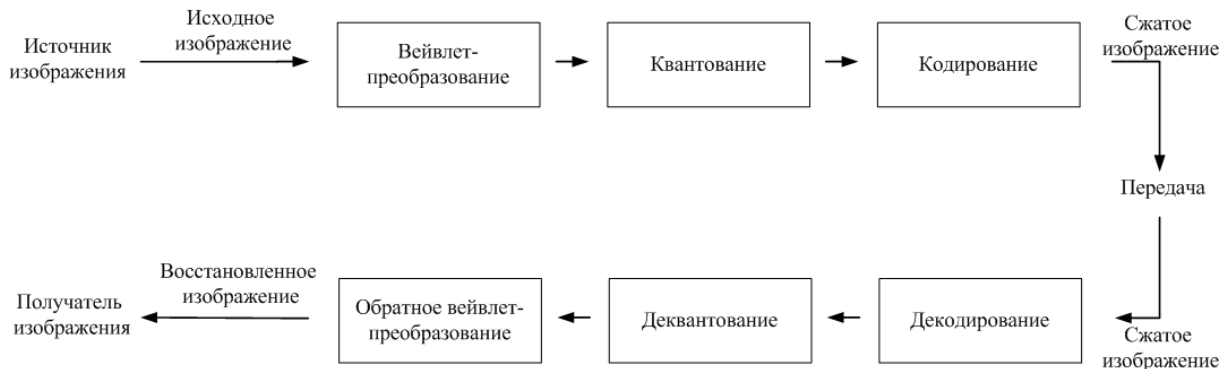


Рисунок 4 – Уменьшение изображения с помощью кодирования и декодирования
Figure 4 – Image reduction using encoding and decoding

Размер передаваемого JPEG-изображения, сжатого до размеров 640×480 , характеризуется уровнем качества от 0 до 100. Для оценки качества применялся критерий Колмогорова:

$$D = \max_{-\infty < x < +\infty} |F_n(x) - F(x)| \quad (1)$$

с условием неограниченного роста числа наблюдений ($n \rightarrow \infty$), при котором вероятность $P(D\sqrt{n} \geq \lambda)$ стремится к пределу:

$$P(\lambda) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} e^{-2k^2\lambda^2} \quad (2)$$

Критическое значение $\lambda_{\epsilon\delta}$ определяется уровнем значимости α из выражения:

$$P(\lambda) = \alpha \quad (3)$$

Для построения распределения (Рисунок 5) применяется следующий алгоритм:

1. строятся теоретическая функция $F(x)$ и эмпирическая функция $F_n(x)$;
2. по формуле (1) вычисляется мера расхождения между указанными распределениями;
3. на уровне значимости α проверяются нулевая гипотеза $H_0 : F_1(x) = F_2(x) \cdot (\lambda \leq \lambda_{\epsilon\delta})$ против конкурирующей гипотезы $H_1 : F_1(x) \neq F_2(x) \cdot (\lambda > \lambda_{\epsilon\delta})$. В первом случае нулевая гипотеза принимается, во втором – отвергается.

Коэффициент Хёрста определялся методом анализа вариации дисперсии. Из зависимости дисперсии от величины размера блока пакета передачи данных (Рисунок 6) определялся наклон кривой, и значение для потока цветных изображений $H = 0,768$.

Было выполнено моделирование передачи потока цветных изображений на плоскости (сенсорном поле) размера $50 \times 50 \text{ i}^2$, и определялся оптимум – максимальное значение коэффициента Хёрста в зависимости от числа узлов (датчиков) в системе. Оптимум равен $H = 0,845$ (Рисунок 7).

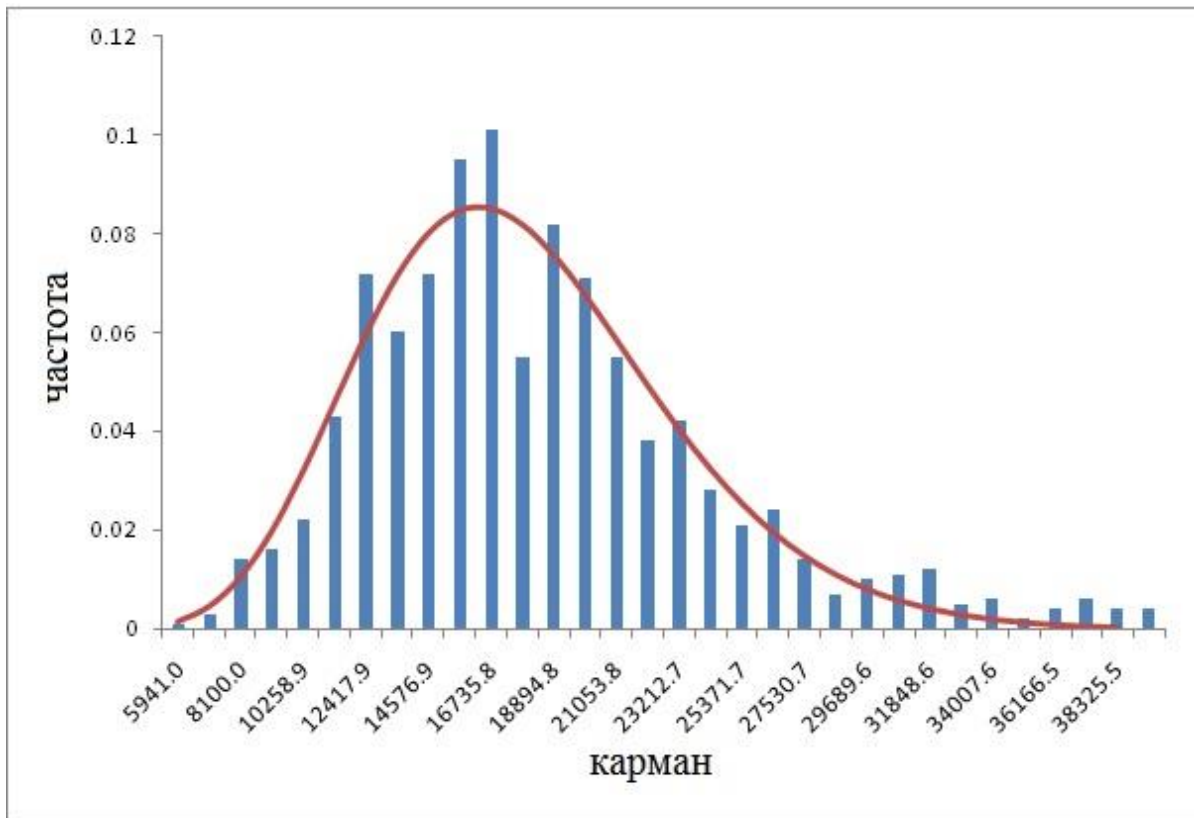


Рисунок 5 – эмпирическое распределение массива данных при передаче цветного изображения
 Figure 5 – Empirical distribution of the data array when transmitting a color image

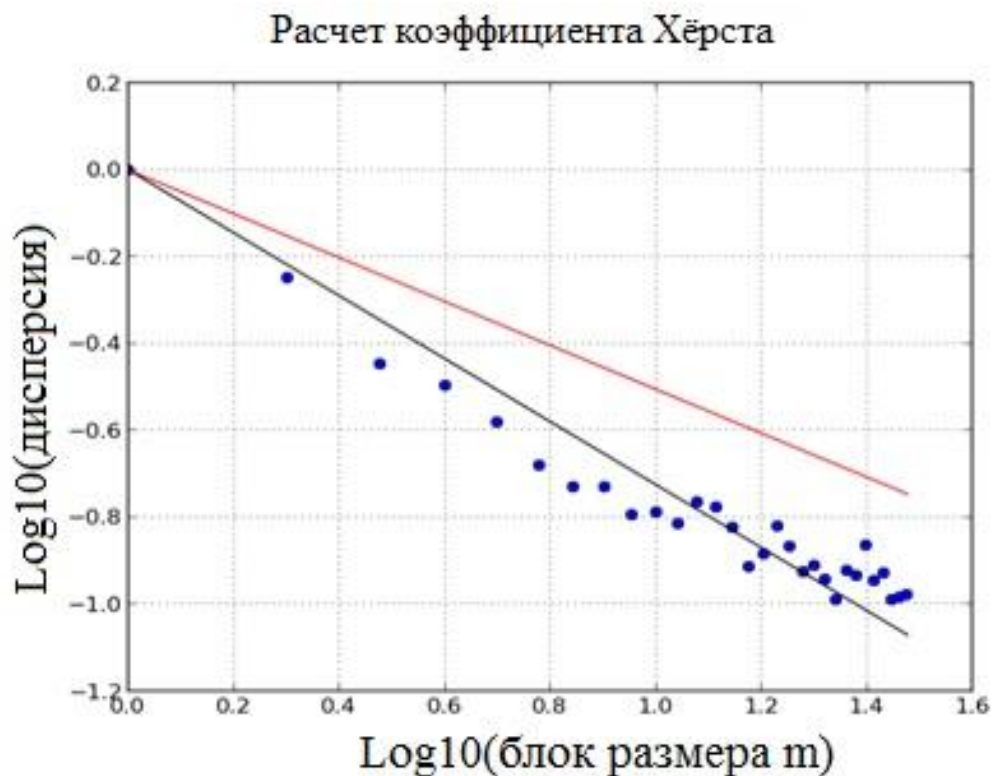


Рисунок 6 – Расчет коэффициента Хёрста для пакета изображений.
Figure 6 - Calculation of the Hurst coefficient for a packet of images

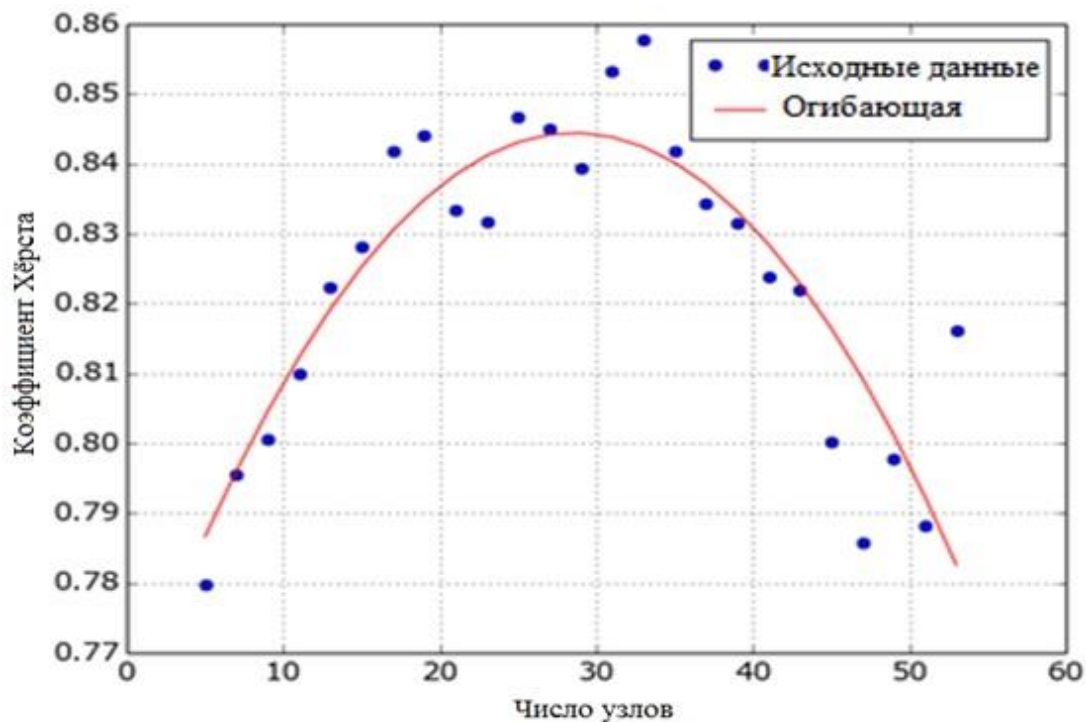


Рисунок 7 – Аппроксимация зависимости коэффициента Хёрста от количества передающих узлов.
Figure 7 – Approximation of the dependence of the Hurst coefficient on the number of transmitting nodes

Перспективные технологии маршрутизации для сетей БСС и 5G

Протокол маршрутизации RPL (Routing protocol for low power and lossy network) обеспечивает соединение с низким энергопотреблением и высоким уровнем шифрования [8]. Его основой является такой набор показателей, при котором узлы строятся в виде ациклического графа, что определяет конвергентный характер сенсорной сети RPL с корневым и родительским узлами (Рисунок 8). Физически родительский узел инициализируется в сети, опрашивает соседей и ожидает от них отклик. Ацикличность одно- или многоадресностью сообщений. С установлением стабильности графа частота сообщений уменьшается, и объем сигнального трафика снижается.

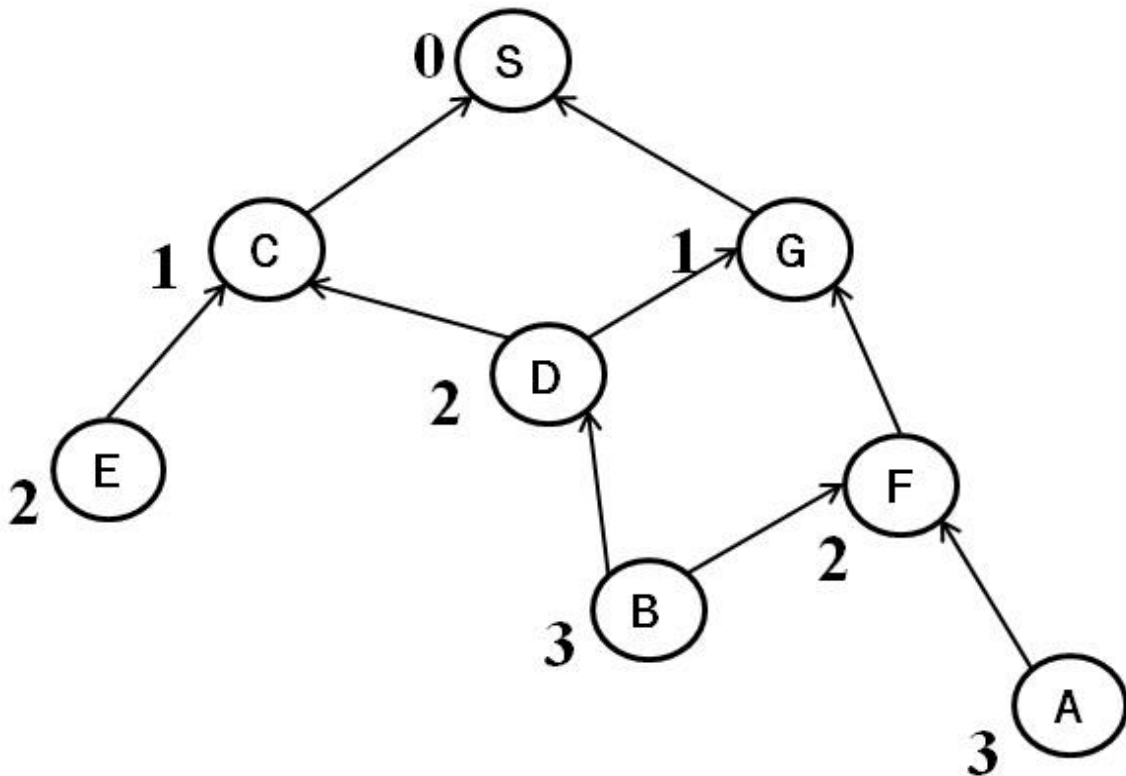


Рисунок 8 – топология RPL в виде ациклического графа
 Figure 8 – RPL topology in the form of an acyclic graph

Альтернативой RPL является протокол маршрутизации AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector) [5]. Сравнение эффективности обоих протоколов было выполнено на сенсорном поле $50 \times 50 \text{ м}^2$ с различной плотностью расположения на нем узлов. Результат моделирования показал, что для обеих сетей при малом числе узлов (10) количество шагов от удаленного узла до маршрутизатора приблизительно одинаково. В то же время с увеличением числа узлов до 100 протокол RPL требует прохождения меньшего числа шагов (Рисунок 9).

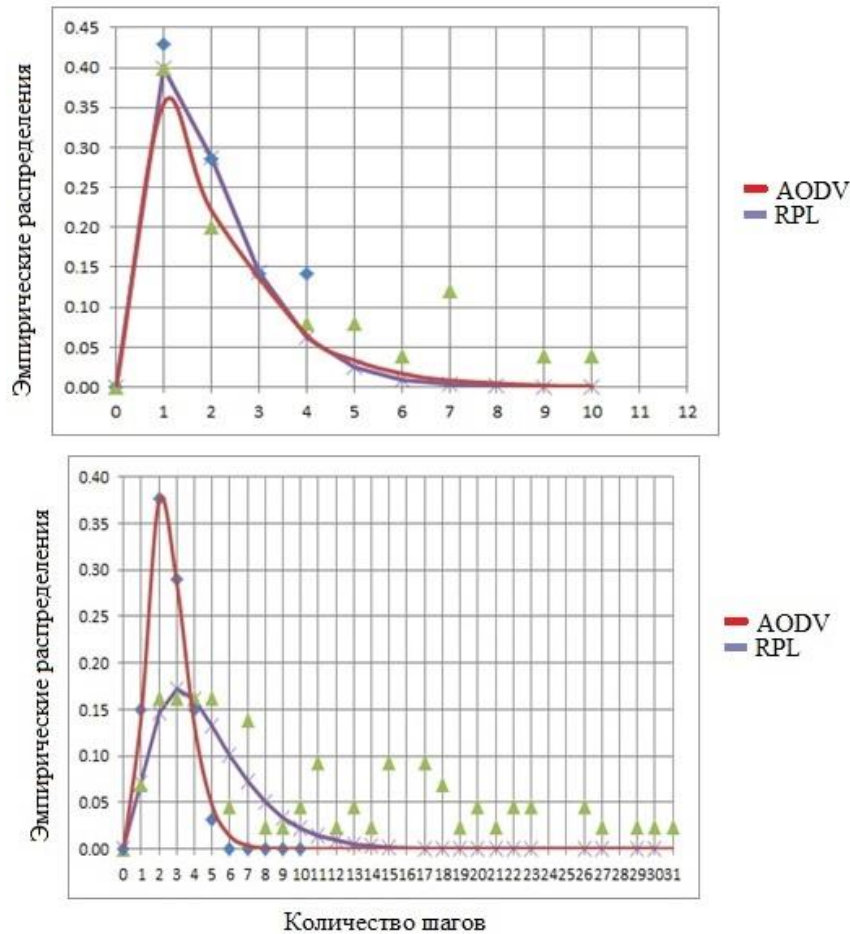


Рисунок 9 – Распределение количества шагов для AODV и RPL для 10 и 100 узлов
 Figure 9 – Distribution of the number of steps for AODV and RPL for 10 and 100 nodes

Стандарт 5G является представляет собой интегрированный набор радиоточек, которые обмениваются информацией с высокой скоростью [9]. Предполагается, что к 2025 году в нашей стране на пятое поколение будет приходиться 15-20% мобильной телефонии. Коммуникации D2D, позволяющие устройствам обходиться без маршрутизации данных, дают преимущества не только в сверхплотной сетевой архитектуре, но и в помехозащищенности и в управлении мобильными данными (Рисунок 10) с высоким качеством обслуживания QoS[10]. На рисунке 10 показаны типы коммуникаций D2D. Частичный или полный контроль оператора (базовой станции) над установленным соединением характеризует первый вариант D2D- коммуникации (Рисунок 10а), в то время как второй вариант обходится без базовой станции, однако при ее координации (Рисунок 10б). Третий вариант представляет собой координацию устройств абонента и источника без участия оператора (Рисунок 10в). В четвертом варианте представлено потребление коммуникационного ресурса между клиентом и источником. Такой вариант требует особого внимания к помехозащищенности в ограниченной координатной ячейке.

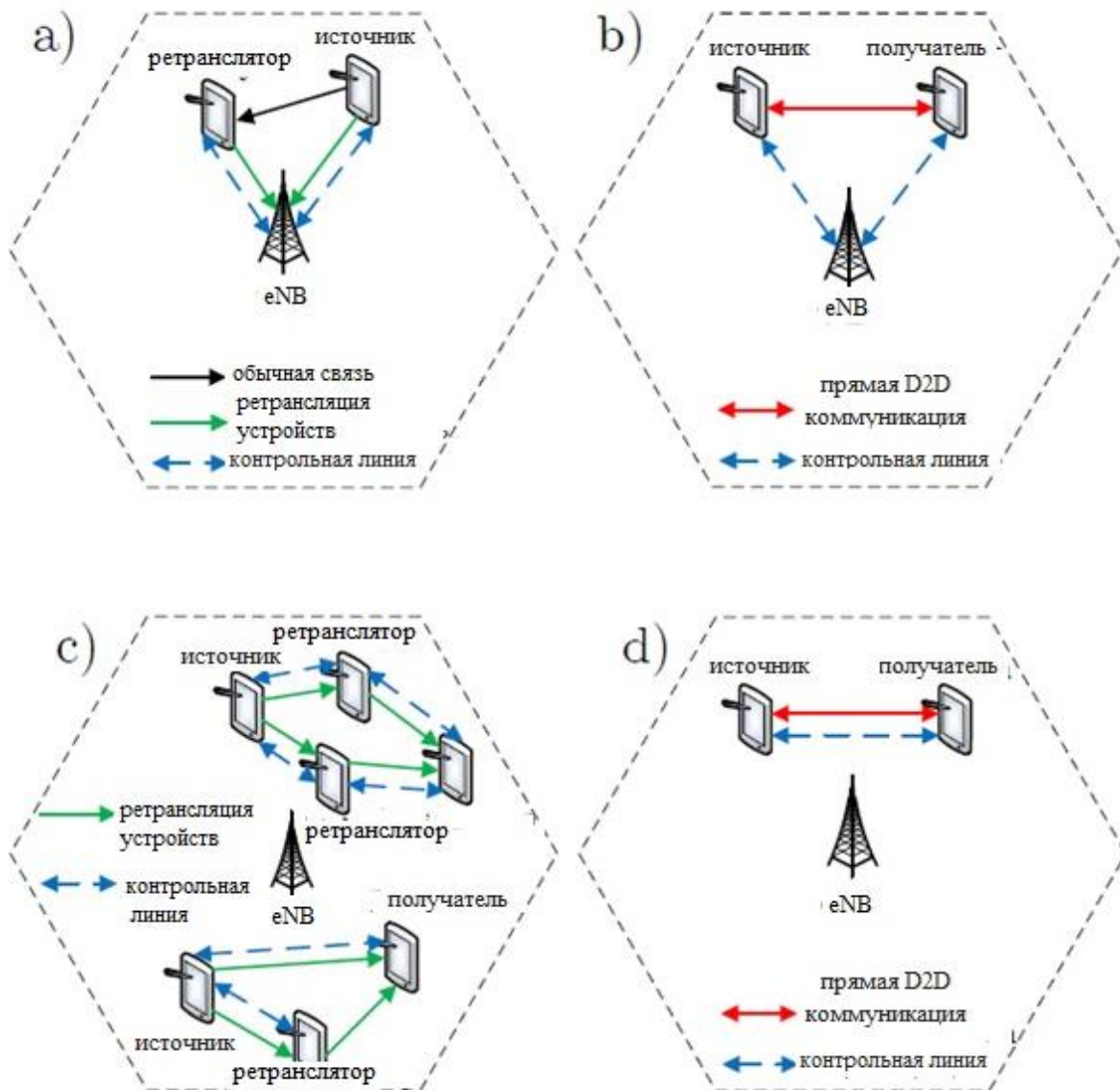


Рисунок 10 – Варианты D2D- коммуникации
 Figure 10 – D2D communication options

D2D-коммуникации предполагают использование протоколов маршрутизации AODV или DSDV. Для сценария 20 узлов на сенсорном поле моделирование с вариантом маршрутизации DSDV показало общую задержку 450 мс (D2D + сотовая связь соединение с удаленным хостом в интернете), в то время как для AODV показал общую задержку 85 мс. Моделирование количества шагов для обоих вариантов маршрутизации также показало преимущество AODV протокола маршрутизации (Рисунок 11). Таким образом, для системы D2D-коммуникаций протокол AODV является более предпочтительным.

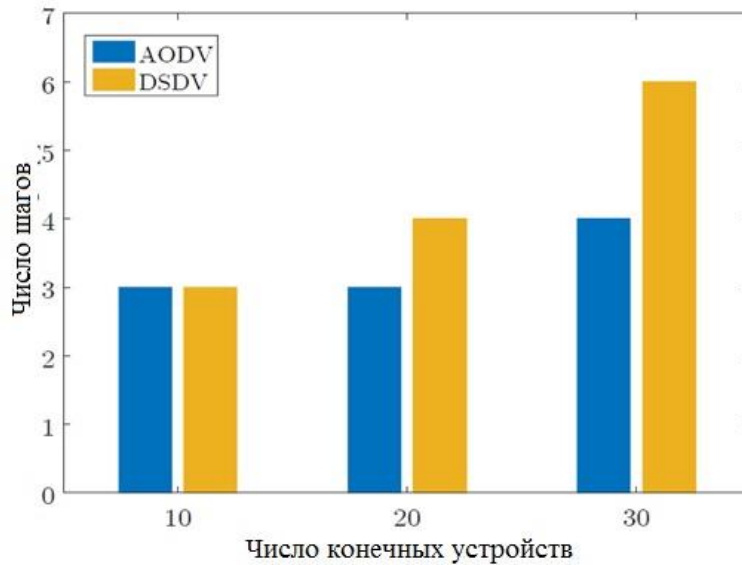


Рисунок 11 – Число шагов в маршрутизации в зависимости от числа конечных устройств для двух протоколов передачи данных

Figure 11 – The number of steps in routing depending on the number of end devices for two data transfer protocols

Повышение пропускной способности сетей 5-го поколения ценно не только с точки зрения возрастания их пропускной способности с качеством широкополосного оптоволоконного Интернета, но и создать новую качественную повседневную реальность в области «умных вещей», беспилотного транспорта, контактов между людьми, обществом и властью. Выгода от их применения многократно превысит издержки их создания.

Заключение

Для беспроводных сенсорных сетей (БСС) выявлены оптимальная структура на основе низкого потребления энергии и оптимальный протокол маршрутизации AODV. Проведено моделирование вариантов БСС на основе сенсорного поля $50 \times 50 \text{ м}^2$ с использованием критерия Колмогорова. Определено оптимальное для таких сетей значение коэффициента Хёрста, равное $H = 0,845$. Рассмотрены перспективные технологии маршрутизации для сетей БСС и 5G. Показано, что для беспроводных сенсорных сетей оптимальным является использование RPL-протокола, а для D2D-коммуникаций, которые могут быть применимы в сетях 5-го поколения – AODV протокол маршрутизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е., Гольдштейн Б.С. *Сети связи пост-NGN*. С. Петербург: БХВ, 2013:160.
2. Tang S. An Analytical Traffic Flow Model for Cluster-Based Wireless Sensor Networks. *1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 2006.
3. Шелухин О.И. Мультифракталы. *Информационные приложения*. М: Горячая линия - Телеком, 2011:314.
4. Выборнова А.И. *Модели беспроводных сенсорных сетей для различных применений*. Электросвязь. 2013;1:24-27.
5. Perkins C. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. RFC 3561, July 2003.

6. Muthanna A., Koucheryavy A., Muthanna A., Prokopiev A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Image Applications. *Internet of Things and its Enablers. Conference, State University of Telecommunication*, St. Petersburg, Russia, June 3-4, 2013:124-132.
7. Andreev S. Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections. *IEEE Communications Magazine*, 2014;52(4):20–31.
8. Winter T. RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. draft-ietf-roll-rpl-19, March 2011.
9. Osseiran A. Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. *IEEE Communications Magazine*, 2014;52(5):26–35.
10. Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, Halim Yanikomeroglu Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions. *IEEE Communications Magazine*, May 2014.

REFERENCES

1. Goldshtein B.S., Kucheryavii A.E. *Seti svyazi post NGN*. SPb. BHV 2013:160.
2. Tang S. An Analytical Traffic Flow Model for ClusterBased Wireless Sensor Networks. *1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing* 2006.
3. Sheluhin O.I. Multifraktali. *Informacionnie prilozheniya*. M Goryachaya liniya Telekom 2011:314.
4. Vybornova A.I. *Modeli besprovodnykh sensrnykh setei dlya razlichnykh primeneniy*. Elektrosvyaz. 2013;1:24-27.
5. Perkins C. *Ad hoc OnDemand Distance Vector AODV, Routing*. RFC 3561, July 2003.
6. Muthanna A., Koucheryavy A., Prokopiev A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Image Applications. *Internet of Things and its Enablers. Conference State University of Telecommunication*, St. Petersburg Russia, June 3-4, 2013:124-132.
7. Andreev S. Cellular traffic offloading onto networkassisted devicetodevice connections. *IEEE Communications Magazine*, 2014;52(4):20–31.
8. Winter T. RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. draft-ietf-roll-rpl-19, March 2011.
9. Osseiran A. Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. *IEEE Communications Magazine*, 2014;52(5):26–35.
10. Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, Halim Yanikomeroglu Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions. *IEEE Communications Magazine*, May 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ключников Виктор Олегович, адъюнкт, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М.Буденного, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: klyuchnikovvo@yandex.ru

Viktor O. Klyuchnikov, Postgraduate Student, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenny, St. Petersburg, Russian Federation.