



АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ IoT

А. И. Парамонов*, С. Н. Бушеленков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

* Адрес для переписки: alex-in-spb@yandex.ru

Аннотация—В статье приведен анализ задач повышения эффективности сетей Интернета вещей путем использования рациональных методов маршрутизации. Предложена модель описания эффективности, основанная на показателях качества обслуживания трафика, а также методы выбора маршрута и группы маршрутов, учитывающие взаимные влияния между узлами сети. **Предмет исследования.** Предметом исследования являются беспроводные сети Интернета вещей. **Метод.** В исследовании используются аналитические методы оценки задержки доставки данных с учетом взаимных влияний узлов сети, а также метод имитационного моделирования. В работе показано, что может быть произведен рациональный выбор транзитных узлов при котором достигается минимальное время доставки данных. **Основные результаты.** Результатами работы являются модель сети IoT в задачах выбора маршрутов в сети интерната вещей высокой плотности и метод построения группы маршрутов, позволяющий минимизировать их взаимную зависимость. **Практическая значимость.** Практическая значимость полученных результатов состоит в предложении метода выбора маршрутов в сети Интернета вещей высокой плотности.

Ключевые слова—Интернет вещей, маршрут, скорость передачи данных, оптимальная длина маршрута, транзитный узел.

Информация о статье

УДК 004.725.5

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 30.05.2022, принята к печати 30.06.2022.

Для цитирования: Парамонов А. И., Бушеленков С. Н. Анализ методов повышения эффективности сетей IoT // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 2. С. 36–52. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-2-36-52.



ANALYSIS OF METHODS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF IoT NETWORKS

A. Paramonov*, S. Bushelenkov

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: alex-in-spb@yandex.ru

Abstract—The article analyzes the problems of improving the efficiency of Internet of Things networks by using rational routing methods. A model for describing efficiency based on traffic quality of service indicators is proposed, as well as methods for choosing a route and a group of routes that take into account mutual influences between network nodes. Subject of study. The subject of the study is the wireless networks of the Internet of things. Method. The study uses analytical methods for estimating the delay in data delivery, taking into account the mutual influences of network nodes, as well as the simulation method. The paper shows that a rational choice of transit nodes can be made at which the minimum data delivery time is achieved. Main results. The results of the work are an IoT network model in the tasks of choosing routes in a high-density boarding network and a method for constructing a group of routes that minimizes their mutual dependence. Practical significance. The practical significance of the obtained results lies in the proposal of a method for choosing routes in a high-density Internet of Things network.

Keywords— Internet of Things, route, data transfer rate, optimal route length, transit node.

Article info

Article in Russia.

Received 30.05.2022, accepted 30.06.2022.

For citation: Paramonov A., Bushelenkov S.: Analysis of Methods to Increase the Efficiency of IoT Networks // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 2. pp. 36–523. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-2-36-52.



Введение

Развитие Интернета вещей¹ (ИВ) стало одним из основных трендов развития сетей связи в мире². Перспективные технологии предполагают выделение определенных ресурсов для обслуживания значительного количества подключенных к сети устройств. Для реализации концепции ИВ решаются различные задачи, в том числе и задачи развития сетей связи, реализующих услуги машина-машина (M2M) [1]. Наряду с технологиями, используемыми (интегрированными) в сетях подвижной связи четвертого и более поздних поколений, развиваются технологии организации автономных или комбинированных сетей M2M – технологии беспроводных сенсорных сетей (БСС) [2].

Технологии БСС позволяют строить достаточно сложные сети различного масштаба для решения различных прикладных задач. Это могут быть сети с различной структурой, количеством узлов и способом их взаимодействия. Как правило, такие сети используют технологии самоорганизации и позволяют обеспечить функционирование в условиях изменяющегося окружения и структуры [3].

С точки зрения самоорганизации и гибкости наибольший интерес представляют mesh сети, т. е. сети в которых узлы наделены функциями маршрутизации сообщений. Такие сети позволяют гибко управлять маршрутизацией трафика и структурой. Такие возможности обеспечивают их высокую живучесть и простоту развертывания и эксплуатации. Области применения mesh сетей могут быть самыми различными, теоретически, от частных сетей до сетей глобального масштаба. Однако существует ряд определенных проблем, которые препятствуют достижению высоких показателей пропускной способности и времени доставки в таких сетях.

Существенные сложности представляет собой процесс маршрутизации, который, фактически, решает задачу самоорганизации сети. Для решения задачи маршрутизации требуется произвести значительную работу по обмену служебной информацией, что снижает эффективность использования ресурсов. Увеличение длины маршрута (в количестве участков), которое происходит при росте масштабов сети, неизбежно приводит к снижению скорости передачи данных.

Наряду с указанными проблемами рост плотности сети может привести к некоторой избыточности ресурсов, которые при необходимости можно использовать для повышения показателей качества сети. Высокая плотность сети также расширяет возможности в выборе логической структуры сети. Имеет смысл используя имеющиеся достоинства сети высокой плотности снизить влияние отрицательных факторов на качество обслуживания [4].

Целью данной работы является анализ возможностей повышения эффективности использования сетевых ресурсов в условиях высокой плотности узлов сети ИВ, а также качества обслуживания трафика.

В данной работе будем полагать, что качество обслуживания определяется двумя такими показателями как время доставки сообщения и скорость передачи

¹ Рекомендация МСЭ-Т Y.2060, Обзор Интернета Вещей. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>.

² IoT Analytics/ URL: <https://iot-analytics.com/iot-market-size/#:~:text=ln%20short,plays%20in%20reaching%20sustainability%20goals>.



данных. Поэтому повышение качества будем связывать с уменьшением времени доставки сообщения (пакета) и/или повышением скорости передачи данных.

1 Модель сети высокой плотности

Будем полагать что узлы сети высокой плотности размещены случайным образом и образуют пуассоновское поле на плоскости или в пространстве. На рис. 1 приведена модель плоской сети, а также маршрут, построенный в ней между узлами s и t .

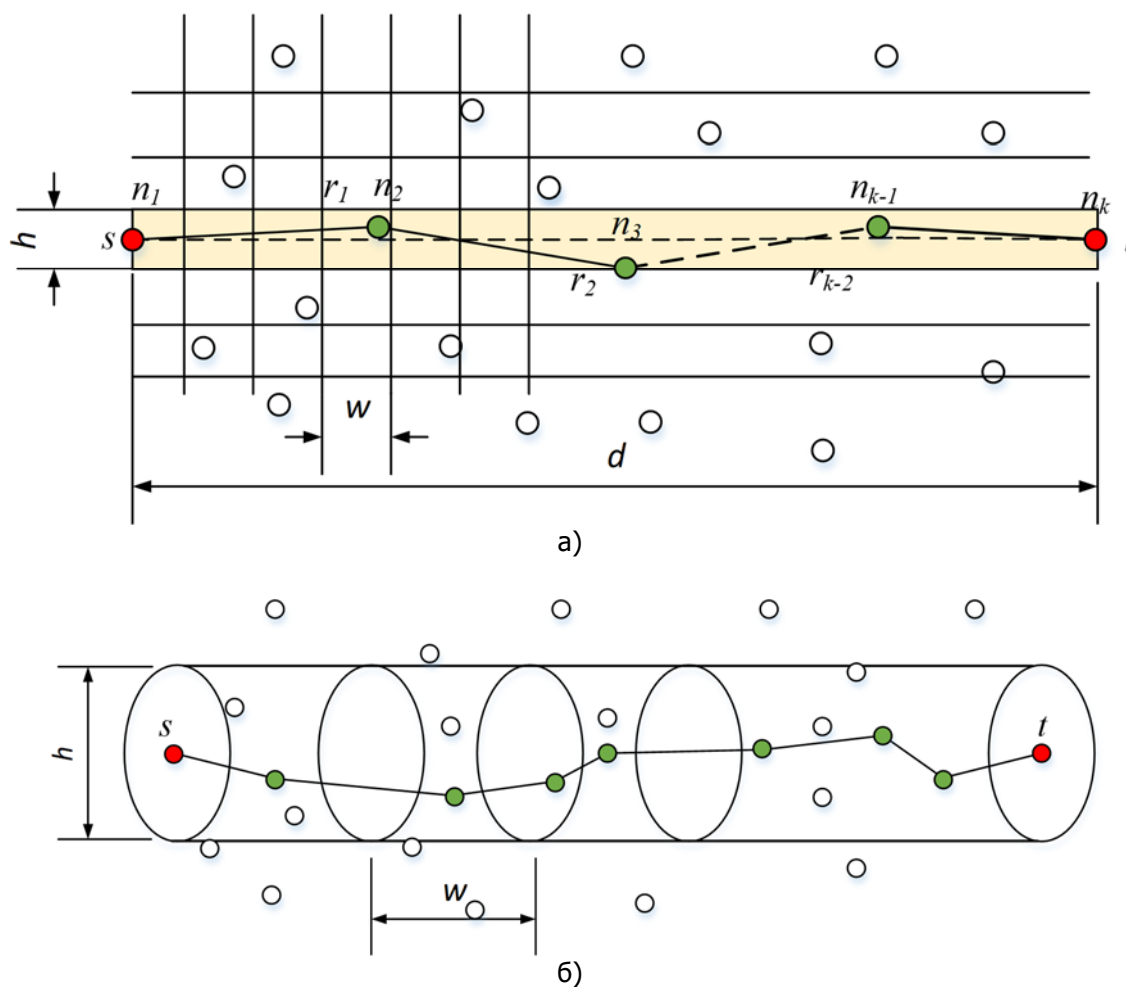


Рис. 1. Модель маршрута в сети высокой плотности

Вероятность попадания k узлов в плоскую область площади S или трехмерную область объемом V распределена по закону Пуассона [5]:

$$p_k(S) = \frac{(\rho S)^k}{k!} e^{-\rho S}. \quad (1)$$



В случае трехмерного пространства:

$$p_k(V) = \frac{(\eta V)^k}{k!} e^{-\eta V}, \quad (2)$$

где ρ и η – плотности (количество) узлов из расчета на единицу площади и на единицу объема, соответственно.

Кратчайшее расстояние между узлами s и t определяется длиной отрезка прямой между ними и равно d . При достаточно большой плотности узлов вероятно, что узлы маршрута лежат близко к этой прямой, а физическая длина маршрута близка к d .

Построим прямоугольник на отрезке между s и t со сторонами h и d . Если разбить его на прямоугольники со сторонами h и w , то с помощью (1) можно оценить вероятность попадания хотя бы одного узла в такой прямоугольник

$$p_{>0}(wh) = 1 - p_0(wh) = 1 - e^{-\rho wh}. \quad (3)$$

Например, при $\rho = 1 \text{ 1/м}^2$, $w = h = 1 \text{ м}$ $p_{>0}(1) \approx 0,63$, а при $w = h = 3 \text{ м}$, $p_{>0}(9) \approx 1$.

Аналогичным образом можно подтвердить данное утверждение и для трехмерного пространства. Например, при $\eta = 1 \text{ 1/м}^3$, $w = h = 3 \text{ м}$ $p_{>0}(21,2) \approx 1$.

Размер выбранной области $3 \times 3 \text{ м}$ достаточно мал, по сравнению с размером зоны связи, практически, для любой из современных технологий организации сети. Эти примеры демонстрируют, что вероятность того что в нужном месте окажется узел сети достаточно велика (близка к единице).

В общем случае между узлами s и t может быть найдено несколько маршрутов, рис. 2.

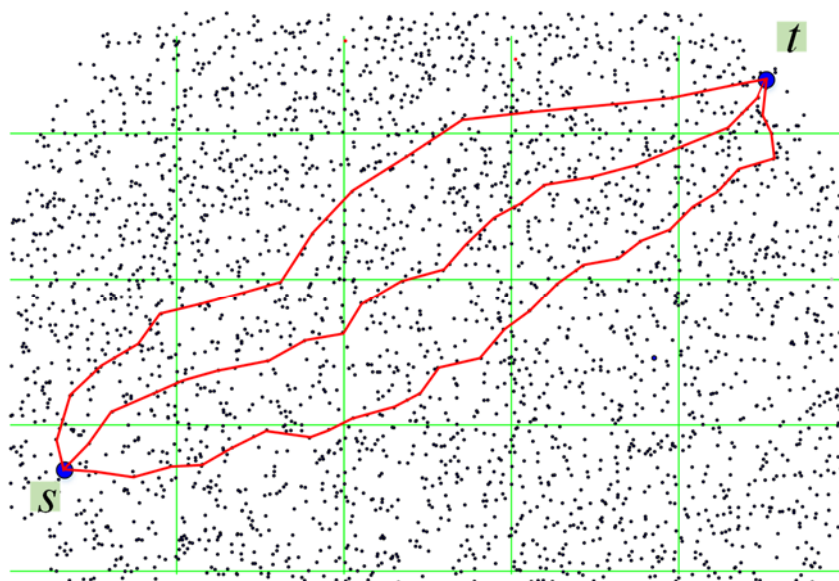


Рис. 2. Много-путевая маршрутизация



В таком случае маршруты могут быть зависимыми и независимыми. Под зависимыми маршрутами будем понимать такие маршруты в которых имеются общие или влияющие друг на друга узлы. Строго говоря, в такой структуре не может быть независимых маршрутов, поскольку в зоне связи узлов источника и назначения находятся первые и последние транзитные узлы всех маршрутов, следовательно, они все зависимы. Поэтому в данном случае правильнее говорить о степени зависимости (или независимости). Степень зависимости можно характеризовать, например, долей узлов маршрута, находящихся в зоне связи узлов, входящих в другие маршруты.

Траектории прохождения всех маршрутов, по крайней мере кроме одного, должны достаточно отклоняться от прямой, проведенной через узлы источника и назначения.

2 Повышение эффективности сети

2.1 Показатели качества маршрута

Под показателями качества маршрута будем понимать эквивалентную скорость передачи данных по маршруту b_e и задержку доставки сообщения τ_d .

В общем случае, модель процесса передачи по маршруту опишем как показано на рис. 3.

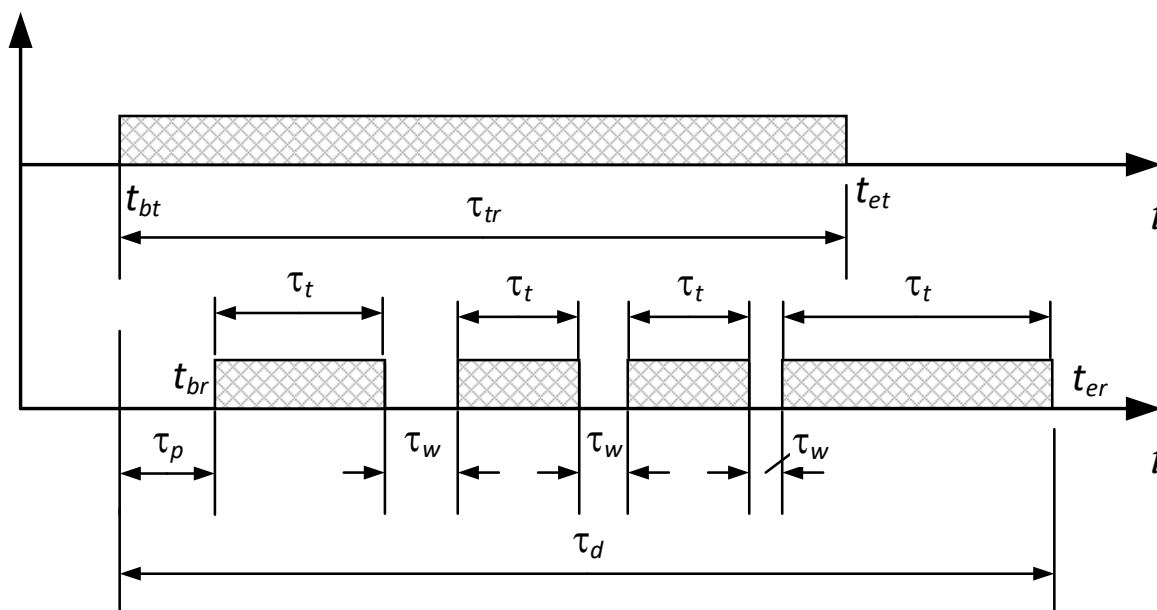


Рис. 3. Модель процесса передачи данных по маршруту

На рисунке t_{bt} и t_{et} моменты времени начала передачи данных и окончания передачи данных отправителем, соответственно. Продолжительность передачи отправителем τ_{tr} . Моменты t_{br} и t_{er} – моменты времени начала приема данных и окончания приема данных узлом получателем, соответственно. Интервал вре-



мени τ_d – это время доставки. Он включает в себя интервалы передачи на участках маршрута τ_t и интервалы ожидания начала передачи в узлах маршрута τ_w и интервал времени распространения сигнала τ_p .

Под эквивалентной скоростью передачи будем понимать величину равную отношению числа переданных данных (бит) к продолжительности интервала времени, который потребовался для их полной передачи от отправителя к получателю:

$$b_e = \frac{V}{\tau_d} \text{ бит/с}, \quad (3)$$

где V – объем переданных данных (бит), τ_d – продолжительность интервала времени (с).

Предполагается что интервал времени, в течение которого производится оценка скорости передачи τ_d достаточно велик, поэтому время распространения сигнала τ_p , которое входит в этот интервал и определяется скоростью распространения электромагнитного сигнала, которая близка к скорости света, чаще всего пренебрежимо мало по отношению к τ_d .

Время передачи зависит от многих факторов, таких как скорости передачи данных на участках всех маршрута, задержки пакетов на ожидание передачи в узлах маршрута (маршрутизаторах). В общем случае эти величины случайны и в свою очередь зависят от параметров маршрута, таких как количество узлов в маршруте и скорости передачи данных между ними, а также интенсивность обслуживаемого трафика. Интенсивность трафика на различных участках маршрута может быть различна и зависит от потребителей услуг. В данном случае будем рассматривать потенциальные возможности маршрута только для сквозного трафика, производимого узлом источником и направленным к узлу получателю. В таком случае параметрами маршрута будут только количество узлов и скорости передачи между ними

$$b_e = b_e(k, b_{i,j} | i, j = 1 \dots k, i \neq j), \text{ бит/с}. \quad (4)$$

Таким образом, способ построения маршрута отражается на эквивалентной скорости передачи данных, которую он может обеспечить.

Время доставки сообщения t_d , как правило, ассоциируют с временем доставки пакета которое, в общем случае зависит от таких факторов как: размер пакета, скорости передачи на участках маршрута, их количество, задержки в узлах маршрута на ожидание передачи и задержка распространения сигнала в среде распространения.

$$\tau_d = \tau_d(V, k, b_{i,j}, t_p | i, j = 1 \dots k, i \neq j), \text{ бит/с}. \quad (5)$$



Задержка доставки связана с эквивалентной скоростью передачи через скорость передачи на участках маршрута, их количество и время ожидания в узлах маршрута.

Если представить, что передается только один пакет, то эквивалентная скорость передачи и задержка доставки связаны однозначно и могут быть получены одна из другой.

Можно предположить, что имеет смысл говорить о задержке доставки принимая во внимание только задержки, обусловленные временем ожидания в узлах маршрута и временем распространения сигнала, т. е. без учета времени передачи на участках маршрута. В ряде случаев такую величину можно ввести, однако в общем случае, время ожидания в узле будет зависеть от времени передачи, которое в свою очередь, зависит от количества данных.

Таким образом, говорить о времени доставки не принимая во внимание количество доставляемых данных не имеет смысла. Этот показатель имеет смысл для единичного пакета (минимального количества данных) который при реализации интерактивных услуг может нести быстро устаревающую информацию. Таким образом, говоря далее о времени доставки (задержке доставки) будем понимать время доставки одного пакета данных некоторого, возможно среднего, размера.

2.2 Эффективность

Под эффективностью сети будем понимать эффективность использования ее ресурсов, т. е. достижение цели при минимуме затрат ресурсов. Эффективность в контексте данной работы – это численная величина, характеризующая сравнительный выигрыш (прирост) какого-либо показателя от использования модели или метода.

Ресурсы сети связи измеряются такими характеристиками как: скорость передачи данных на участках маршрута, количество используемых узлов, ширина полосы радиочастотного спектра, занимаемая передаваемым сигналом. Также можно говорить и о степени использования ресурса, которая характеризуется интенсивностью нагрузки. Обозначим используемые ресурсы как множество R .

Целью, как правило является предоставление услуги с заданным уровнем качества обслуживания. В данной работе под качеством мы понимаем эквивалентную скорость передачи или время доставки данных. Обозначим рассматриваемые показатели качества как множество Q .

Задачу повышения эффективности можно сформулировать как повышение качества при объеме ресурсов, отвечающему заданному критерию или как снижение объема ресурсов при заданном критерии качества.

В первой постановке задачу можно записать как:

$$M = \max_{R \in D} Q, \quad (6)$$

где D – область допустимого использования ресурсов.



Во второй постановке, задачу можно сформулировать как:

$$\tilde{M} = \min_{Q \in \Psi} R, \quad (7)$$

где Ψ – область допустимых значений показателей качества.

Тогда эффективность решения задачи (6) методом m_1 по отношению к методу m_2 можно оценить как $|R_1 - R_2|$ в абсолютных значениях или как:

$$e_{1,2} = \frac{|R_1 - R_2|}{|R_2|} \quad (8)$$

Эффективность решения задачи (6) методом m_1 по отношению к методу m_2 можно оценить как $|Q_1 - Q_2|$ в абсолютных значениях или как:

$$\tilde{e}_{1,2} = \frac{|Q_1 - Q_2|}{|Q_2|} \quad (9)$$

Поскольку как ресурсы, так и показатели качества определяются группами параметров, то в общем случае задачи (6) и (7) многокритериальные. В данном случае прямые скобки в (8) и (9) обозначают некоторую скалярную количественную меру ресурсов или показателей качества.

2.3 Метод выбора маршрута

Будем полагать, что при выборе узлов для построения маршрута между узлами источника s и назначения t следует руководствоваться показателями качества, т. е. повышением скорости передачи или уменьшением величины задержки в контексте задачи (6).

Как показано в [6] эквивалентная скорость передачи данных по маршруту зависит от взаимного положения узлов маршрута, что оказывает влияние на скорость передачи на участках маршрута и задержки, обусловленные ожиданием в узлах начала передачи (освобождения канала). Будем в данном случае рассматривать задержку доставки как она была определена выше.

Время доставка одного пакета, в отличие от передачи последовательности пакетов определяется только задержками на передачу по участкам маршрута и не включает в себя задержки на ожидание:

$$\tau_d^{(1)} = \sum_{i=1}^k \tau_t^{(i)} + \tau_p = \sum_{i=1}^k \frac{1}{b_i} + \tau_p, \quad c, \quad (10)$$

где b_i – скорость передачи на участке маршрута i .



Если b_i зависит от взаимного положения узлов, например, от расстояния между ними, то задачу минимизации задержки можно сформулировать следующим образом:

$$M = \max_{R \in D} Q = \min_{x_i, y_i, k \in D} \left\{ \sum_{i=1}^k \frac{1}{b_i} \mid i = 1 \dots k, 2 < k \leq n \right\}, \quad (11)$$

где x_i, y_i – координаты узла i , D – множество узлов сети.

Для формального решения задачи (11) может потребоваться перебор C_n^k вариантов построения маршрута, где n – количество узлов сети, k – количество узлов в маршруте. В реальной сети нет необходимости в переборе всех вариантов, т. к. представляют интерес только те узлы, которые находятся в зоне связи. К тому же для минимизации числа транзитов и длины маршрута целесообразно выбирать узлы вблизи прямой, проходящей через узлы отправителя и получателя.

Для определения зависимости скорости передачи данных от положения узлов маршрута воспользуемся выражениями К. Шеннона [7] и Г. Фрииса [8]:

$$b_i = \eta B \log_2 \left(1 + \frac{P_{Si}}{P_{Ni}} \right) \quad (12)$$

где P_{Si} – мощность сигнала (Вт), P_{Ni} – мощность шума (Вт), B – полоса частот (Гц), η – коэффициент, учитывающий не идеальность реализации ($0 < \eta \leq 1$).

$$P_S = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (13)$$

где P_{TX} – излучаемая мощность (Вт), G_{TX} и G_{RX} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, λ – длина волны (м), d – расстояние (м).

С учетом (10), (12) и (13) можно получить зависимость времени доставки от количества транзитных участков. Эта зависимость приведена на рис. 4. Для примера выбрана технология IEEE 802.11n при значении коэффициента $\eta = 0,25$.

Из рисунка виден характер изменения времени доставки, который имеет явно выраженный минимум при $k = 4$, при этом расстояние между узлами s и t выбрано равным 2 000 м, а размер пакета 250 байт. Это значение является решением задачи (11), в данном случае, она может быть решена простым перебором возможных значений k от нуля до значения, при котором начинается увеличение времени доставки.

При большом диапазоне возможных значений k , для сокращения количества операций поиска оптимального значения, может быть использован метод дихотомии.

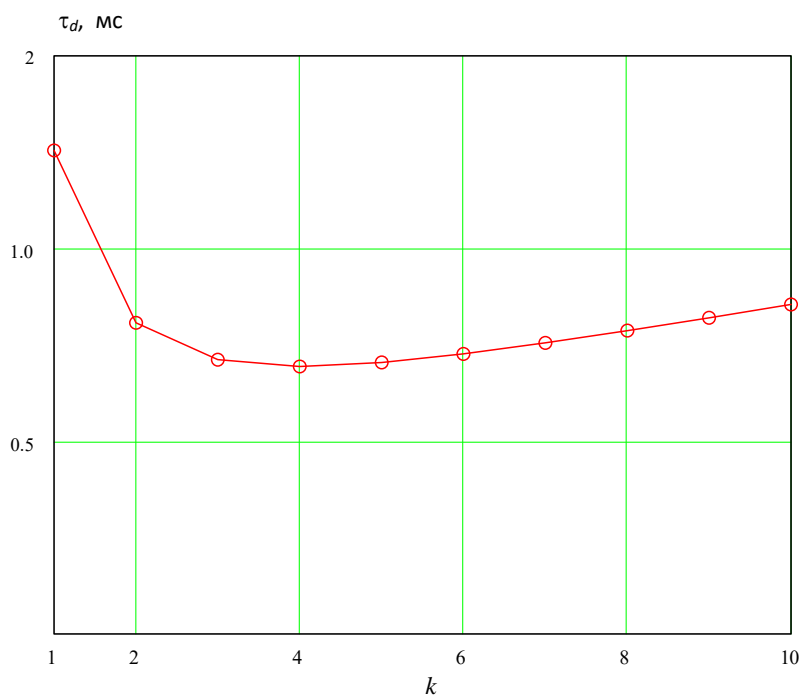


Рис. 4. Зависимость времени доставки от количества узлов в маршруте

Таким образом оптимальный выбор маршрута в сети ИВ высокой плотности может быть сведен к решению задачи выбора оптимального количества транзитных узлов (количества участков) расположенных вблизи прямой, проходящей через узлы отправителя и получателя, при котором достигается минимальная величина задержки доставки сообщения.

2.4 Задача много-путевой маршрутизации

Сеть ИВ, построенная как mesh сеть имеет широкие возможности по изменению структуры и решению задач покрытия территории, однако, она имеет недостатки, связанные со снижением пропускной способности маршрутов при росте числа узлов сети. Это существенно ограничивает масштабы таких сетей. Много-путевая маршрутизация, в ряде случаев, может быть решением, позволяющим снизить величину задержки доставки сообщения или повышения эквивалентной скорости передачи данных [5].

Описанные в [9] решения позволяют снизить задержку доставки сообщения при увеличении объема используемых ресурсов. Эффективность же решения обеспечивается оптимальным или близким к нему выбором маршрутов.

Описанное в [10] решение позволяет повысить величину пропускной способности (эквивалентной скорости передачи) благодаря близкому к оптимальному выбору маршрутов и перераспределению трафика, передаваемого по ним.

Предложенные решения не учитывают особенностей маршрутов с точки зрения их независимости, а учитывают только их временные характеристики.

В данной работе будем рассматривать маршруты с учетом их взаимных влияний. Выше было сказано, что взаимные влияния элементов маршрутов (их зави-



симость) снижает их показатели качества. В связи с этим можно говорить о задаче выбора независимых маршрутов или маршрутов с наименьшими взаимными влияниями (наименьшей степенью зависимости).

Будем описывать маршрут множеством входящих в него узлов сети как $R_i = \{r_1^{(i)}, r_2^{(i)}, \dots, r_k^{(i)}\}$, узлы отправителя и получателя это $r_1^{(i)}$ и $r_k^{(i)}$, соответственно. Такой маршрут имеет $k-1$ участок и $k-2$ транзитных узлов.

Все множество узлов сети $N = \{n_1, n_2, \dots, n_M\}$, где M – общее количество узлов сети.

Если выполняются приведенные ниже условия, то маршруты i и j будем считать зависимыми.

$$\exists s = 1 \dots k_i, g = 1 \dots k_j \quad | \quad r_s^{(i)} \equiv r_g^{(j)} \equiv n_v \vee D_s^{(i)} \cap D_g^{(j)} \neq \emptyset, \quad (14)$$

$$i, j = 1 \dots m, v = 1 \dots M$$

где $D_s^{(i)}$ и $D_g^{(j)}$ – зоны связи узлов s и g маршрутов i и j .

Иными словами, маршруты зависимы если в них имеется хотя бы один общий узел или хотя бы один из узлов одного маршрута попадает в зону связи другого маршрута. Степень зависимости определяется тем насколько сильно эти узлы оказывают влияние на узлы данного маршрута. Согласно (13) влияние обратно пропорционально квадрату расстояния

Степень зависимости маршрутов i и j определим, как среднеквадратическое расстояние между узлами i -го j -го маршрутов.

$$z_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{k_i k_j} \sum_{s=1}^{k_j} \sum_{v=1}^{k_i} d_{v,s}^2} \text{ м}^2, \quad (15)$$

где d_{vs} – расстояние между узлами v и s .

Будем полагать, что условие зависимости является симметричным, т. е.

$$z_{i,j} = z_{j,i}. \quad (16)$$

В данном случае, будем рассматривать в качестве зависимости только приведенные выше условия. Например, если зоны связи узлов описать, кругом с диаметром D , который выбран из условия «сильного сигнала» наличие которого рассматривается как занятие канала, то (15) будет отражать степень влияния, обусловленную использованием общего ресурса. В таком случае уменьшение z_{ij} за счет увеличения расстояния между узлами маршрутов приведет и к уменьшению влияний, вызванных помехами от соседних узлов, порождаемых «слабыми сигналами», влияющими на отношение сигнал/шум.



На рис. 5 приведены два маршрута, построенные с учетом сделанных допущений и имеющие минимальную степень зависимости.

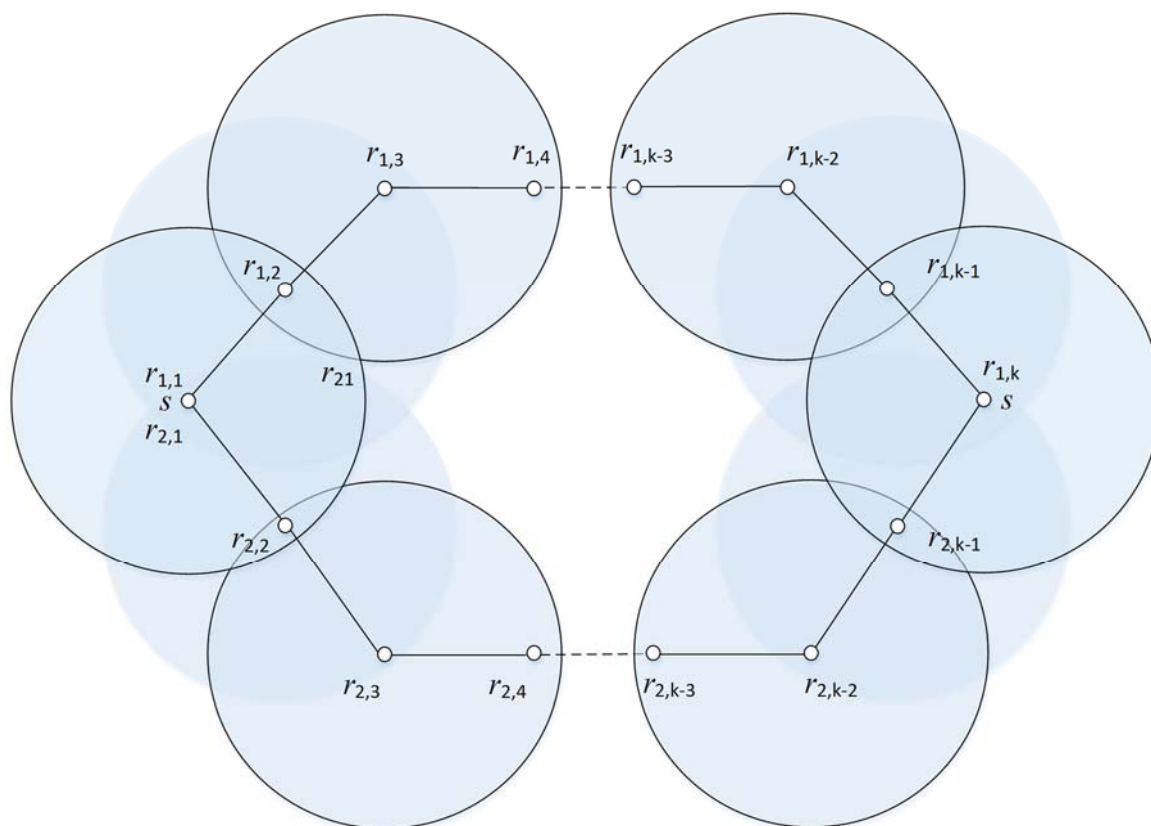


Рис. 5. Пример двух маршрутов с минимальной степенью зависимости

Задача поиска маршрута в таком случае должна учитывать два условия: минимальной длины (или минимального времени задержки) и минимальной степени зависимости от других маршрутов.

$$R_i = \arg \min_{r \in N} \{ \tau_{di}, z_{i,j} \mid j = 1 \dots m \}, \quad (17)$$

где m – количество выбранных маршрутов.

Задача (17) также многокритериальная. Для ее приближенного решения предлагается метод. Исходные данные для решения задачи задаются матрицей расстояний между узлами сети

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \dots & c_{1,M} \\ \vdots & c_{i,j} & \vdots \\ c_{M,1} & \dots & c_{M,M} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где c_{ij} – расстояние между узлами i и j .



Метод заключается в последовательном поиске маршрутов, удовлетворяющих требуемым критериям. После нахождения очередного маршрута матрица \mathbf{C} модифицируется таким образом, чтобы выбор узлов, находящихся вблизи уже выбранных узлов для найденных маршрутов узлов, стал менее привлекателен для алгоритма поиска кратчайшего маршрута. Для этой цели производится увеличение расстояний c_{ij} обратно пропорционально расстоянию узлов i и j к узлам выбранных маршрутов («штрафование» узлов).

$$\tilde{c}_{i,j} = \omega_{i,j} c_{i,j}, \quad (19)$$

где

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} 1 & c_{i,v} \geq R, v = 1 \dots k_s, s = 1 \dots m \\ \prod_{v=1}^{k_s} I_{i,v} \left(\frac{R}{c_{i,v} + \varepsilon} \right)^\alpha & \end{cases}, \quad (20)$$

где $\varepsilon > 0$ – константа, введенная для исключения равенства знаменателя нулю, $\alpha \geq 0$ – константа определяющая степень влияния расстояния до узлов выбранных маршрутов, R – радиус зоны связи узла.

$$I_{i,v} = \begin{cases} 0 & c_{i,v} \geq R \\ 1 & c_{i,v} < R \end{cases}. \quad (21)$$

Выражения (19) и (20) увеличивают длину ребер, инцидентных вершинам (узлам), находящимся вблизи уже выбранных вершин (узлов).

После модификации матрицы \mathbf{C} с помощью выражений (19) и (20) выбор зависимых маршрутов становится менее «привлекательным» с позиции построения кратчайшего пути. Процедура модификации повторяется после выбора каждого очередного маршрута.

Данный подход не исключает выбор зависимых маршрутов, или одинаковых маршрутов в случае отсутствия альтернативы. Поэтому, каждый новый найденный маршрут должен сравниваться с найденными ранее. Повторение маршрута свидетельствует об исчерпании возможных решений.

Данный алгоритм может быть описан следующей блок-схемой, рис. 6.

На рис. 7 (см. ниже) приведен пример последовательного выбора маршрутов согласно предложенному методу.

В приведенном примере количество узлов сети 100, радиус связи узла 40 м, размер зоны обслуживания 200x200 м.

Наименьшую длину имеет первый найденный путь (6 транзитных узлов), среднюю – второй найденный путь (8 транзитных узлов) и максимальную – третий (12 транзитных узлов). Согласно (15) степень зависимости полученных маршрутов $z_{1,2} \approx 89,3$; $z_{1,3} \approx 96,0$; $z_{2,3} \approx 97,9$.

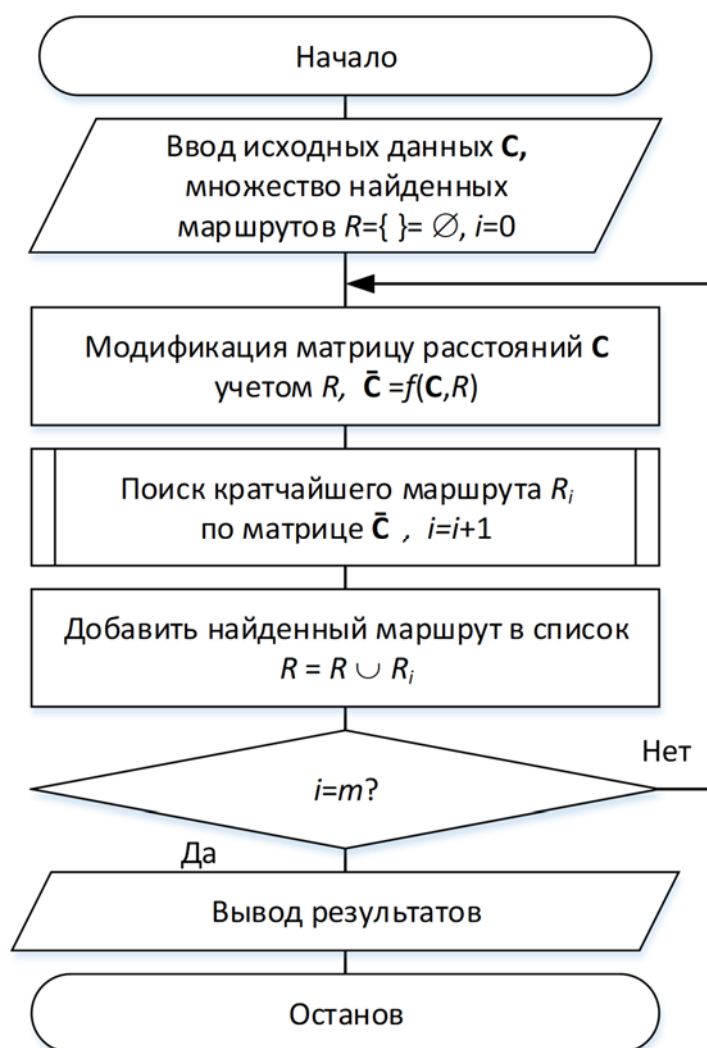


Рис. 6. Блок-схема алгоритма поиска путей

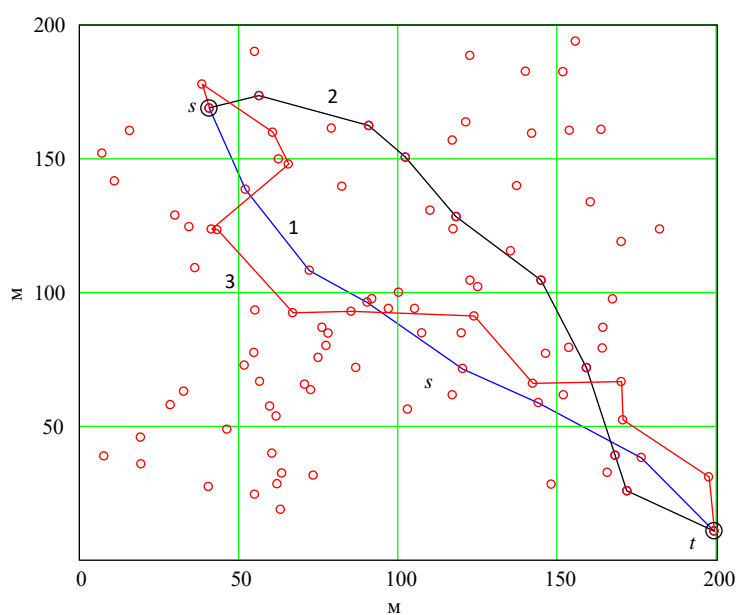


Рис. 7. Последовательный выбор трех маршрутов



Выводы

Приведенный выше анализ показал, что выбор маршрута в сети беспроводной связи влияет на эффективность использования ресурсов сети.

Для оценки эффективности решения задач необходимо определить показатели качества маршрута в сети связи. Такими показателями могут быть, например, эквивалентная скорость передачи данных и время (задержка) доставки сообщения.

Основным показателем качества для маршрута в рамках данной статьи выбрана величина задержки доставки сообщения. Выбор узлов для построения маршрутов может быть реализован, в частности, как решение задачи минимизации этой величины.

В ряде случаев, для решения задач уменьшения времени доставки может быть использована много-путевая маршрутизация. Повышение эффективности решения этой задачи достигается рациональным выбором маршрутов. Рациональный метод предполагает выбор маршрутов, имеющих по возможности меньшую взаимную зависимость (влияние).

Предложенный в работе метод позволяет получить производит выбор маршрутов с учетом их взаимных влияний. Оценка его эффективности по результатам имитационного моделирования составляет до 25 % при использовании для оценки эффективности показателя среднеквадратического удаления узлов маршрутов и равномерного распределения узлов по в зоне обслуживания.

Исследование выполнено в рамках выполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2022 год.

Литература

1. Парамонов А. И. Модели потоков трафика для сетей M2M // Электросвязь. 2014. № 4. С. 11-16.
2. Нуриллов И. Н., Парамонов А. И. Эффективная связность беспроводной сенсорной сети // Электросвязь. 2018. № 3. С. 68-74.
3. Нуриллов И. Н., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети // Электросвязь. 2017. № 7. С. 39-44.
4. Парамонов А. И., Бушеленков С. Н. Модель сети доступа интернета вещей на основе решетчатой структуры // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 37-46. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-37-46.
5. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.
6. Бушеленков С. Н., Парамонов А. И. Метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2021. № 12. С. 14-20.
7. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. 832 с.
8. Шахнович И. Миф о затухании свободного пространства: чего не писал Г. Т. Фриис // Первая миля. 2014. № 2. С. 40-45.
9. Кашкаров Д. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод повышения эффективности URLLC в перспективных сетях связи // Электросвязь. 2022. № 2. С. 32-37.
10. Бушеленков С. Н. Эффективный метод многопутевой маршрутизации трафика в сети Интернета вещей // Электросвязь. 2022. № 4. С. 8-14.



References

1. Paramonov A. I. The traffic flow models for M2M networks // *Electrosvyaz*. 2014. № 4. pp. 11-16.
2. Nurilloev I. N., Paramonov A. I. Effective connectivity parameter of the wireless sensor network // *Electrosvyaz*. 2018. № 3. pp. 68-74.
3. Nurilloev I. N., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Method of estimation and maintenance of connectivity of the wireless sensor network // *Electrosvyaz*. 2017. № 7. pp. 39-44.
4. Paramonov A., Bushelenkov S.: Model of the IoT access network based on the cell structure // *Telecom IT*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. pp. 37–46 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-37-46.
5. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. *Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya*. M.: Vysshaya shkola, 2000. 480 s.
6. Bushelenkov S. N., Paramonov A. I. Route selection method for high-density wireless IOT network // *Electrosvyaz*. 2021. № 12. pp. 14-20.
7. Shannon K. *Raboty po teorii informacii i kibernetike*. M.: Inostrannaya literatura, 1963. 832 s.
8. Shakhnovich I. The myth of free space decay: G. T. Friis did not touch upon this issue // *Last mile*. № 2. pp. 40-45.
9. Kashkarov D. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Efficiency improving for URLLC in advanced communication networks // *Electrosvyaz*. 2022. № 2. pp. 32-37.
10. Bushelenkov S. N. An efficient method of multipath traffic routing in the Internet of Things // *Electrosvyaz*. 2022. № 4. pp. 8-14.

Парамонов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
alex-in-spb@yandex.ru

Paramonov Alexander I.

doctor of engineering sciences, docent, professor
at the department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg
State University of Telecommunications,
alex-in-spb@yandex.ru

Бушеленков Сергей Николаевич

аспирант Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
bsn1980@yandex.ru

Bushelenkov Sergey N.

Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg
State University of Telecommunications,
bsn1980@yandex.ru