



МЕТОД ВЫБОРА МАРШРУТА В СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

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 задачи выбора маршрута в сети Интернета вещей высокой плотности, предложена модель маршрута, описывающая эквивалентную скорость передачи данных, учитывающая взаимные влияния между узлами сети. **Предмет исследования.** Предметом исследования являются беспроводные сети Интернета вещей. **Метод.** В исследовании используются аналитические методы оценки скорости передачи данных с учетом взаимных влияний узлов сети, а также метод имитационного моделирования. В работе показано, что может быть произведен выбор оптимального количества транзитных узлов при котором достигается максимальная скорость передачи данных. **Основные результаты.** Результатами работы являются модель маршрута в сети интернета вещей высокой плотности и метод построения маршрута, позволяющий достичь близкой к максимальной скорости передачи данных. **Практическая значимость.** Практическая значимость полученных результатов состоит в предложении метода выбора маршрута 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 01.04.2022, принята к печати 01.06.2022.

Для цитирования: Парамонов А. И., Бушеленков С. Н. Метод выбора маршрута в сети интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 1. С. 34–44. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-1-34-44.



ROUTE SELECTION METHOD IN THE INTERNET OF THINGS

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 route selection problem in a high-density Internet of Things network, proposes a route model that describes the equivalent data transfer rate, taking 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 data transfer rate, taking into account the mutual influences of network nodes, as well as the simulation method. The paper shows that the choice of the optimal number of transit nodes can be made at which the maximum data transfer rate is achieved. Main results. The results of the work are a route model in a high-density internet-of-things network and a method for constructing a route that makes it possible to achieve data transfer rates close to the maximum. Practical significance. The practical significance of the results obtained lies in the proposal of a method for choosing a route 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 15.03.2022, accepted 01.06.2022.

For citation: Paramonov A., Bushelenkov S.: Route selection method in the Internet of Things // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 1. pp. 34–44. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-1-34–44.



Введение

Сети интерната вещей (ИВ) являются одним из наиболее массовых, с точки зрения количества подключенных к сети устройств, кластеров перспективных гетерогенных сетей связи. В настоящее время количество подключенных к сети устройств уже превышает количество жителей, а тенденция его роста сохранится в обозримом будущем [1, 2, 3]. Эти тенденции приводят к тому, что уже сейчас в ряде случаев плотность устройств достигает более одного устройства на квадратный метр, такие сети принято называть сетями с высокой плотностью пользователей.

При высокой концентрации устройств на малой площади или в малом объеме возникают естественные проблемы с взаимными влияниями узлов, что отражается на качестве обслуживания трафика [4]. В работах [3, 5] отмечается, что в сети высокой плотности наряду с указанными проблемами имеют место и качества, которые могут рассматриваться как положительные. В первую очередь, высокая плотность устройств обеспечивает потенциально большую вероятность связности сети, а во вторую очередь дает большую свободу в выборе логической структуры сети (для *mesh* сетей) [5].

Проявлением этих особенностей является то, что маршрут в *mesh* сети ИВ высокой плотности имеет сравнительно большую длину [4]. Использование транзитных узлов в сети беспроводной связи неизбежно приводит к потере скорости передачи данных. Это относится к большинству применяемых в настоящее время технологий построения беспроводных сенсорных сетей и обусловлено невозможностью одновременного приема и передачи данных одним узлом сети, т. е. необходимостью чередования режима передачи и приема. Эквивалентная скорость передачи данных по маршруту зависит, как от количества транзитов, так и от расстояний между узлами сети, из-за того, что последние влияют на отношение сигнал/шум, определяемое затуханием полезного сигнала и сигнала помех от соседних узлов.

Таким образом, в сети ИВ высокой плотности благодаря возможности выбора транзитных узлов появляется возможность оптимизации маршрута с точки зрения пропускной способности в отличие от сети обычной плотности, в которой структура, как правило, предопределена конкретными условиями применения, т. е. жестко заданным размещением узлов.

В данной работе предлагается метод выбора параметров маршрута в сети ИВ, обеспечивающий близкую к максимальной скорость передачи данных.

Модель маршрута

Рассмотрим модель маршрута в сети ИВ как множество узлов сети между узлом источником s и узлом назначения t . Промежуточные узлы l являются транзитными узлами.

Полагаем, что используемая технология организации радиоканала предполагает работу с разделением времени приема и передачи. Это характерно для большинства современных технологий организации беспроводных сенсорных сетей (IEEE 802.11, IEEE 902.15.4, LoRA и другие).

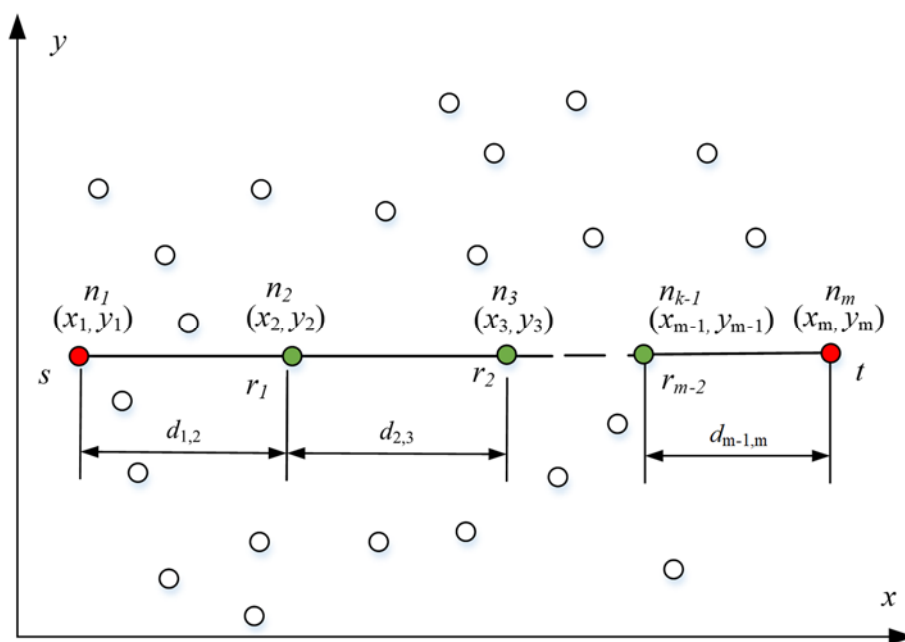


Рис. 1. Модель маршрута в сети ИВ

Устройства приемника и передатчика функционируют в режиме транзита только в симплексном режиме. Мы полагаем, что работа устройств осуществляется только на одном радиочастотном канале, т. к. это наиболее распространенный режим работы mesh сети. Транзитный узел чередует интервалы приема данных от предшествующего узла маршрута и передачи следующему узлу. При передаче данных узел не может производить прием т. к. как правило, приемник и передатчик находятся в непосредственной близости или даже работают с одной общей антенной. Кроме соседнего (ближайшего в маршруте узла) функционирование других узлов маршрута также оказывает влияние на процесс передачи, т. к. любой сторонний сигнал в точке приема приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и как следствие к уменьшению скорости пебрдачи данных.

Таким образом, эффективная скорость передачи данных в маршруте уменьшается с увеличением количества транзитных узлов, т. е. зависит как от количества, так и расположения.

Будем рассматривать следующую модель маршрута. Маршрут, который состоит из k узлов, включая узлы источника и получателя сообщения s и t . Узел s передает по маршруту кадры размера L , полагаем, что их размер неизменен на всех участках. Полагаем также, что узел s передает кадры непрерывным потоком, т. е. интервалы времени между окончанием одного и началом следующего кадра можно считать равными нулю.

Под скоростью передачи данных по маршруту будем понимать величину равную отношению переданного объема данных к времени его передачи:

$$b = \frac{L}{t_d}, \text{ бит/с} \quad (1)$$



где t_d – время передачи данных (с); L – количество передаваемых данных (бит).

Если в маршруте имеется один транзитный участок, то время доставки данных может быть определено следующим образом:

$$t_d = \frac{L}{b_{sr}} + \frac{L}{b_{rt}}, \quad (2)$$

где b_{sr} и b_{rt} – скорости передачи данных на первом и втором участках маршрута соответственно.

В этом случае скорость передачи данных по маршруту может быть определена как:

$$B = \frac{L}{t_d} = \frac{b_{sr} b_{rt}}{b_{sr} + b_{rt}}. \quad (3)$$

Если скорости передачи данных на первом и втором участках равны b , то эквивалентная скорость будет равна $B = \frac{b}{2}$.

В общем случае при k транзитных участках:

$$B = \frac{\prod_{i=1}^k b_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1, j \neq i}^k b_{j,j+1}}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) справедливы для идеального случая, когда отсутствуют сторонние сигналы, создаваемые, как узлами маршрута, так и иными источниками уровень которых достаточен для того, чтобы повлиять на функционирование узлов маршрута, т. е. привести к сокращению времени передачи.

При равенстве скоростей передачи на всех участках маршрута выражение (4) упрощается до:

$$B = \frac{b}{k+1}, \quad (5)$$

Выражение показывает, что скорость передачи по маршруту обратно пропорциональна количеству транзитов.

Заметим также, что скорость передачи на участке маршрута зависит от отношения сигнал/шум, например, для стандарта IEEE 802.11n эта зависимость приведена на рис. 2.

Зависимость отношения сигнал шум в точке расположения узла сети:

$$SNR = p_{TX} - a(d) - n_s, \text{ дБ}, \quad (6)$$



где $a(d)$ – модель зависимости затухания от расстояния (дБ); d – расстояние между узлами (м), n_s – суммарный уровень мощности помех (дБм), p_{TX} – уровень мощности на выходе передатчика (дБм).

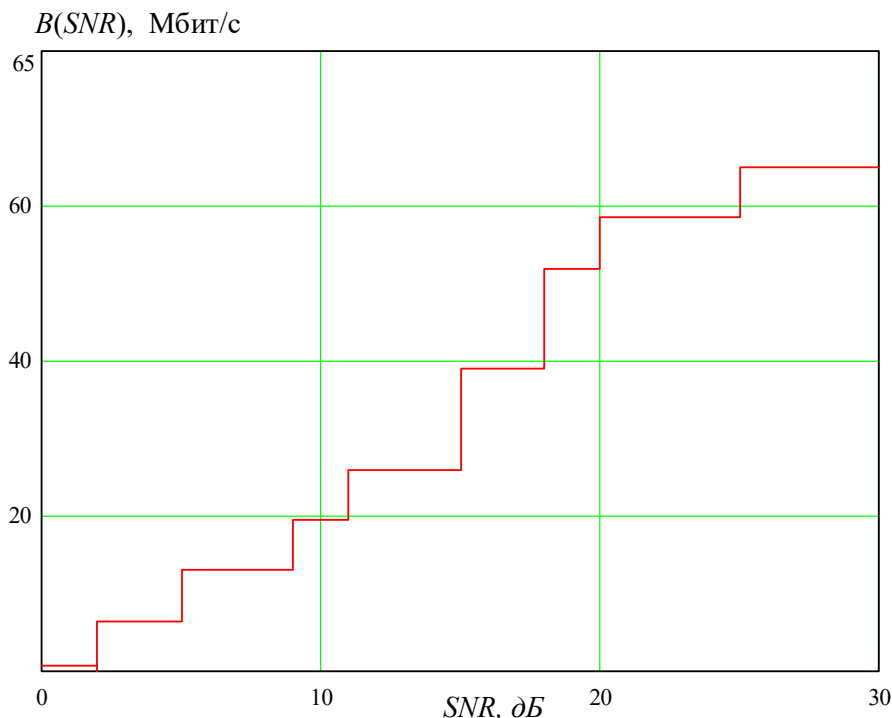


Рис. 2. Зависимость скорости передачи на участке от отношения сигнал/шум

Модель зависимости затухания от расстояния может быть различна, например, могут быть выбраны модели, рекомендованные в Рекомендации МСЭ-R P.1238-8¹ или Рекомендации МСЭ-R P.1238-10².

Суммарный уровень мощности помех определяется как сумма мощностей всех сигналов, кроме полезного, в рассматриваемой точке.

$$\tilde{n}_s = \sum_{i=1}^m I_i 10^{\frac{1}{10}[p_{TXi} - a(d_i)]} + 10^{\frac{1}{10}p_N} + 10^{\frac{1}{10}p_A}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

где p_{TXi} – уровень мощности источника помехи (дБм), d_i – расстояние до источника помехи (м), p_N – уровень мощности теплового шума (дБм), p_A – уровень мощности сторонних помех (дБм), I_i – индикаторная функция, учитывающая особенности функционирования протокола.

¹ Рекомендация МСЭ-R P.1238-8 (ITU-R P.1238-8), Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц – 100 ГГц. Серия Р. 2015 г.

² Рекомендация МСЭ-R P.1238-10. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в диапазоне частот 300 МГц – 450 ГГц. Международный союз электросвязи, 2019.



$$I_i = \begin{cases} 1 & p_{TXi} - a(d_i) \leq p_0 \\ 0 & p_{TXi} - a(d_i) > p_0 \end{cases} \quad (8)$$

Функция (8) учитывает особенность функционирования приемопередатчика, которая состоит в том, что передача может быть начата в том случае, когда уровень сигнала от источника помехи не превышает величины p_0 , в противном случае предполагается, что канал занят другим устройством, и передача не начинается. Следует отметить, что это относится к сигналам, которые могут быть распознаны, т. е. созданы узлами сети.

Сигналы иной природы в модели (7) учитываются, как величины p_A . Далее делается предположение, что они пренебрежимо малы.

$$n_s = 10 \lg \frac{\tilde{n}_s}{0,001}, \text{ дБм.} \quad (9)$$

Учитывая (4), (6) и (7), а также зависимость скорости передачи, приведенную на рис. 2, можно заметить, что скорость передачи по каналу будет зависеть от количества транзитов и расстояний между узлами маршрута.

Предположим, что узлы сети распределяются между узлом источником s и узлом назначения t равномерно, т. е. на равных расстояниях друг от друга. Такое предположение вполне допустимо в сети высокой плотности, т. к. в такой сети высока вероятность того, что вблизи любой заданной точки возможно найти узел, который может выполнять функции транзита. Тогда расстояние между транзитными узлами будет зависеть от их количества.

Минимально допустимое количество определяется особенностями используемой технологии организации канала (дальностью связи), максимальное же количество ограничено только количеством доступных в сети узлов.

На рис. 3 приведена зависимость скорости передачи данных от количества транзитных узлов, полученная с учетом (4), (6) и (7), а также зависимости скорости передачи, приведенной на рис. 2.

Из приведенных результатов моделирования видно (рис. 3), что она представляет собой нелинейную функцию, имеющую несколько локальных минимумов и максимумов. На рис. 3 приведены три кривые для разных значений p_0 , равного -70 , -80 и -90 дБм, соответственно. Заметно, что при увеличении пороговой величины p_0 увеличивается достижимая скорость передачи, что объясняется сокращением времени «простоя» из-за занятости канала при относительном уменьшении отношения сигнал/шум.

Как было отмечено выше скорость передачи на участке маршрута зависит от отношения сигнал/шум, последнее же зависит от условий распространения сигнала и является случайной величиной. В данном случае следует полагать, что канал является многолучевым, в котором имеют место быстрые замирания.

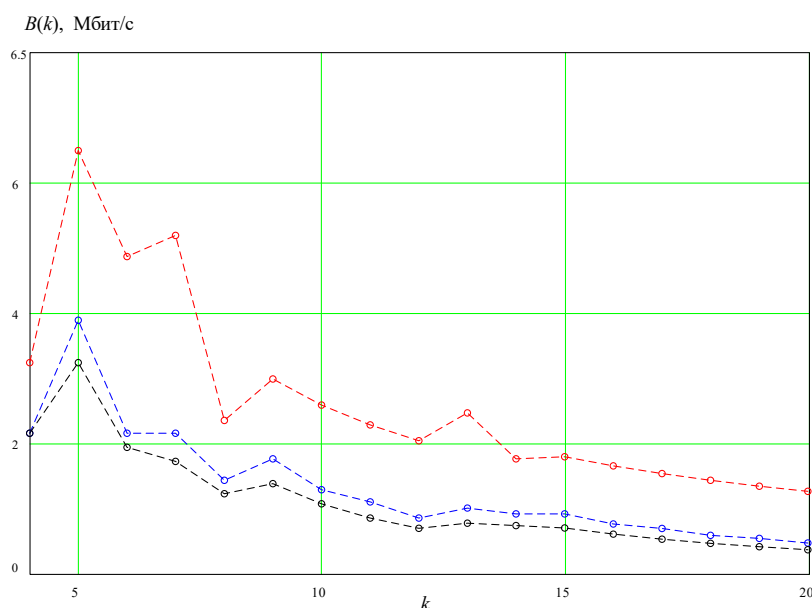


Рис. 3. Зависимость скорости передачи данных по маршруту от количества транзитов

В следующей модели учитывается случайный характер отношения сигнал/шум³, следовательно, и скорости передачи на каждом из участков маршрута. Результатом моделирования также является время доставки и скорость передачи по маршруту, которые также представляют собой случайные величины.

Приведенные ниже результаты получены с помощью имитационного моделирования маршрута. На рис. 4 приведена плотность вероятности скорости передачи данных в маршруте при $k=4$ и использовании стандарта IEEE 802.11n.

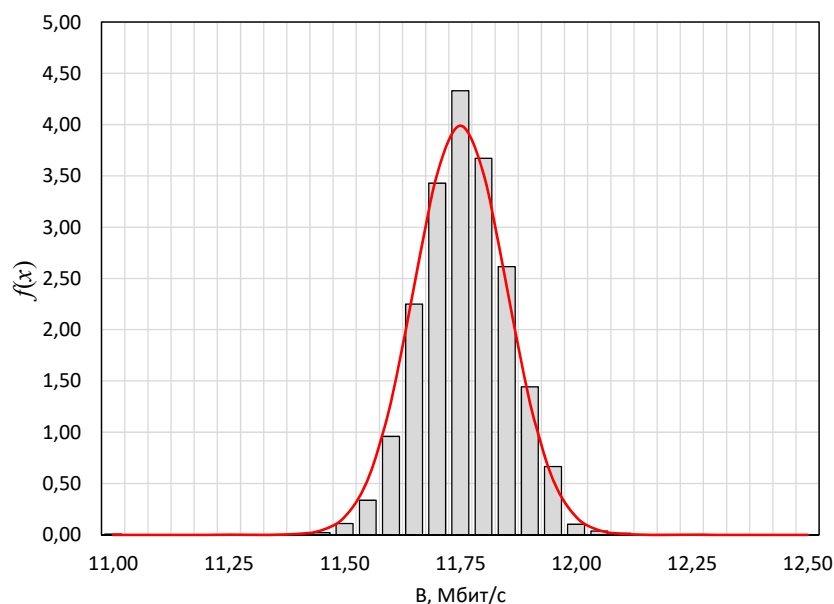


Рис. 4. Плотность вероятности скорости передачи данных в маршруте

³ Рекомендация МСЭ-R P.1057-4. Распределения вероятностей, касающихся моделирования пространства радиоволн. Серия P. Распространение радиоволн. Женева, 2016 г.



Полученная гистограмма достаточно хорошо аппроксимируется усеченным нормальным распределением:

$$f(B) = \begin{cases} K + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{B-b_0}{\sigma}\right)^2}, & B \geq 0, \\ 0, & B < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где b_0 – математическое ожидание скорости передачи данных в маршруте; K – коэффициент, определяемый из условия равенства единице интеграла от плотности вероятности

$$K = 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{B-b_0}{\sigma}\right)^2} bB.$$

Задержка доставки пакета также случайна. Эмпирическая гистограмма задержки доставки и ее аппроксимация усеченным нормальным законом (10) приведена на рис. 5.

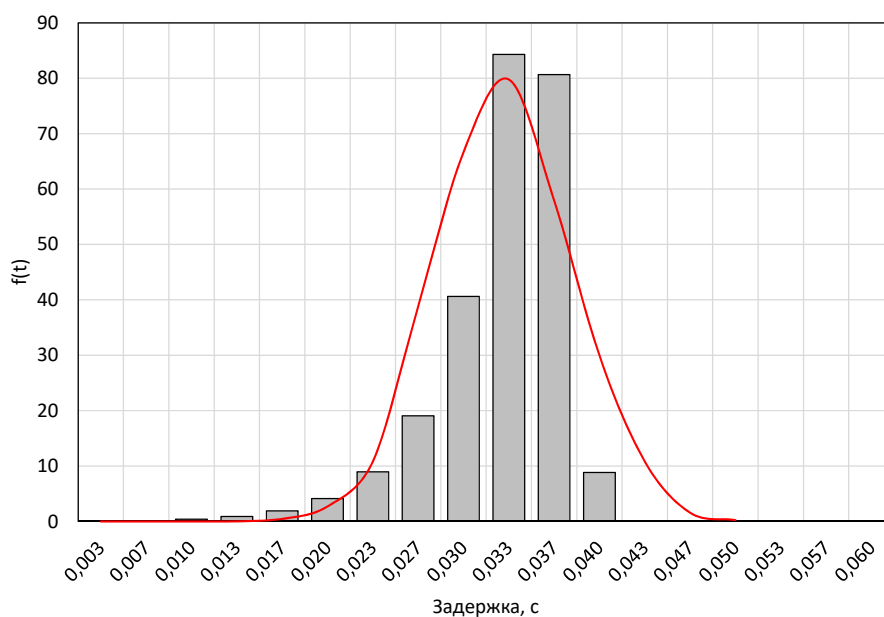


Рис. 5. Плотность вероятности времени доставки

Как видно из приведенных графиков, как распределение скорости передачи, так и времени доставки достаточно хорошо можно описать усеченным нормальным распределением. Исследования показали, что близость распределения к нормальному тем выше, чем больше транзитных участков в маршруте.



Метод выбора маршрута

Критерий выбора маршрута можно сформулировать как повышение скорости передачи данных по маршруту путем выбора количества транзитов при равных расстояниях между транзитными узлами. Критерий может быть записан как

$$R = \arg \max_R B(R), \quad (11)$$

где R – множество узлов маршрута, $B(R)$ – зависимость скорости передачи данных от выбранного множества узлов.

В качестве $B(R)$ может быть использовано выражение (4) с учетом зависимости скорости от отношения сигнал/шум, т.е. с учетом выражений (6), (7) и (8).

В таком случае метод выбора маршрута может быть записан в виде последовательности из трех шагов.

1. Задать исходные данные: координаты узлов сети $C = \{c_1, c_1, \dots, c_N\}$, где N – количество узлов сети; m_1 и n_k – начальный и конечный узлы маршрута; $d_{1,k}$ – расстояние между ними.

2. Найти оптимальное количество узлов в маршруте k решением задачи (4) при предположении, что расстояния между узлами маршрута одинаковы.

3. Выбрать узлы, ближайšie к найденным координатам и оценить качество маршрута (скорость передачи данных). Если не ниже требуемого, то задача решена. Останов.

4. Если качество маршрута ниже требований, то оценить маршруты с $k+1$ и $k-1$ транзитами и выбрать наилучший. Если не ниже требуемого, то задача решена. Останов.

5. Если шаг 4 не дает желаемого результата, то произвести поиск кратчайшего маршрута используя классический алгоритм поиска, например, алгоритм Дейкстры [6], используя в качестве метрики время передачи.

Оценка качества на шаге 3 необходима на тот случай, когда рядом с вычисленными координатами не окажется узла сети, способного выполнять функции транзита, в таком случае выполняется шаг 4, на котором количество транзитных узлов корректируется на единицу в сторону увеличения и уменьшения. Если на шаге 4 не достигается нужный результат, это говорит о том, что плотность узлов на данном участке сети недостаточна для реализации данного метода и следует произвести классический поиск кратчайшего пути.

Выводы

1. Особенности построения маршрутов в сетях ИВ высокой плотности состоят в сильных взаимных влияниях между узлами сети, с одной стороны и в более широких возможностях выбора структуры маршрута, с другой стороны.

2. Наличие транзитных узлов приводит к снижению эквивалентной скорости передачи данных по маршруту, которая обратно пропорциональна количеству транзитных участков.

3. На скорость передачи данных по маршруту влияет не только количество транзитов, но и отношение сигнал/шум, которое зависит от взаимного расположения узлов маршрута.



4. При построении маршрута имеет место оптимальное количество транзитов, при котором достигается максимальное значение скорости передачи данных.

5. Случайный характер скорости передачи на отдельных участках маршрута приводит к тому, приводит к тому, что эквивалентная скорость передачи по маршруту также случайна и с достаточной точностью может быть описана нормальным распределением.

6. Предложенный метод построения маршрута позволяет повысить качество предоставления услуг за счет близкого к оптимальному выбору количества транзитных участков.

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

Литература

1. Кучерявый А. Е., Киричек Р. В., Маколкина М. А., Парамонов А. И., Дунайцев Р. А., Пирмагомедов Р. Я., Бородин А. С., Владыко А. Г., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И., Владимиров С. С., Гришин И. В. Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2021-2024 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 3. С. 1-19.
2. Paramonov, A.; Koucheryavy, A.; Tonkikh, E.; Tatarnikova, T. M. High Density Internet of Things Network Analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12525 LNCS. PP. 307-316.
3. Бушеленков С. Н., Парамонов А. И. Анализ и формирование структуры сети интернета вещей на основе моделей решеток // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23-28.
4. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2020. № 1. С. 44-48.
5. 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.
6. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 429 с.

References

1. Koucheryavy A., Kirichek R., Makolkina M., Paramonov A., Dunaytsev R., Pirmagomedov R., Borodin A., Vladyko A., Muthanna A., Vybornova A., Vladimirov S., Grishin I.: Novel Prospects of Scientific Research in the Field of Telecommunications Networks for the 2021–2024 Years // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 3. pp. 1–19 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19.
2. Paramonov, A.; Koucheryavy, A.; Tonkikh, E.; Tatarnikova, T. M. High Density Internet of Things Network Analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12525 LNCS. pp. 307–316.
3. Bushelenkov S. N., Paramonov A. I. Analysis and formation of the structure of the internet of things network based on lattice models // Electrosvyaz. 2021. № 7. pp. 23–28 (in Russian).
4. Tonkikh E. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Analysis of wireless high-density iot network // Electrosvyaz. 2020. № 1. pp. 44–48 (in Russian).
5. 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.
6. Kristofides N. Teoriya grafov. Algoritmicheskij podhod. M.: Mir, 1978. 429 s.

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