

Научная статья

УДК 04.77

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-75-85



Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа

Анастасия Вячеславовна Марочкина✉, anastasiy1996@mail.ru

Александр Иванович Парамонов, alex-in-spb@yandex.ru

Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 123232, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи:* эволюция инфокоммуникационной системы сопровождается развитием технологий и услуг связи. Общие тенденции этого процесса выражаются в трех основных направлениях: повышении пропускной способности, уменьшении задержки доставки данных и массовых коммуникациях. Последнее характеризуется развитием Интернета вещей (ИВ). Сети ИВ строятся с использованием различных технологий. Большое количество подключенных устройств требует применения новых подходов к моделированию и методов построения и управления такими сетями. Для моделирования сетей с высокой плотностью устройств часто недостаточно применения плоских моделей, а приходится прибегать к построению моделей в трехмерном пространстве. Для функционирования сетей с большим количеством узлов необходимы эффективные методы выбора их структуры, такие как выбор головных узлов, кластеризация и выбор маршрутов доставки трафика. Задача маршрутизации является классической задачей построения логической структуры сети связи, однако в условиях сетей высокой плотности необходимо использовать дополнительные возможности повышения эффективности ее решения. Классические методы и алгоритмы маршрутизации оперируют, как правило, одним критерием выбора, что может оказаться не эффективным решением в таких условиях. В беспроводных сетях ИВ высокой плотности необходимо учитывать большее количество параметров, так как качество маршрута в них зависит от многих факторов. Таким образом, для повышения эффективности сетей ИВ актуальна разработка метода маршрутизации по ряду критериев. Этой задаче и посвящена настоящая работа. **Целью работы** является разработка метода многокритериальной маршрутизации трафика в сети ИВ высокой плотности. Для достижения цели в работе предлагается подход к использованию серого реляционного анализа, позволяющего эффективно решать задачу многокритериальной оптимизации маршрута, в том числе при малом объеме исходных данных. **Объектом исследования** является сеть Интернета вещей высокой плотности. **Предметом исследования** является метод многокритериальной маршрутизации, реализованный с использованием серого реляционного анализа. Результаты имитационного моделирования показали эффективность предложенного метода по сравнению с методами однокритериального выбора маршрутов. **Используемым методом** является метод серого реляционного анализа, позволяющего решать задачи многокритериальной оптимизации. **Новизна работы** заключается в предложенном методе применения серого реляционного анализа для решения многокритериальной задачи маршрутизации в сети ИВ высокой плотности. **Результатом** работы является метод применения серого реляционного анализа в задаче многокритериальной маршрутизации трафика в сети ИВ высокой плотности. **Теоретическая/Практическая значимость.** Теоретическая значимость полученных результатов состоит в описании нового метода применения серого реляционного анализа в задаче маршрутизации и подтверждении результатами имитационного моделирования его эффективности. Практическая значимость состоит в том, что данный метод может быть использован в протоколах маршрутизации трафика в сетях ИВ высокой плотности.

Ключевые слова: сети интернета вещей высокой плотности, многокритериальная маршрутизация, серый реляционный анализ

Источник финансирования: Научное исследование в ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича выполнено в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-12-2023-1137.

Ссылка для цитирования: Марочкина А.В., Парамонов А.И. Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 75–85. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-75-85

A Method for Routing Traffic in a Three-Dimensional High-Density IoT Network Using Gray Relational Analysis

 Anastasia Marochkina✉, anastasiy1996@mail.ru

 Alexander Paramonov, alex-in-spb@yandex.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: *Statement of the problem:* the development of the infocommunication system is accompanied by the development of communication technologies and services. The general trends of this process are expressed in three main directions: the growth of throughput, reducing the delay in data delivery and mass communications. The latter is characterized by the development of the Internet of Things (IoT). IoT networks are built using various technologies. A large number of connected devices requires the use of new approaches to modeling and methods for building and managing such networks. To model networks with a high density of devices, it is often not enough to use flat models, but you have to resort to building models in three-dimensional space. For the functioning of networks with a large number of nodes, effective methods for choosing their structure are needed, such as choosing head nodes, clustering, and choosing traffic delivery routes. The task of routing is a classic task of building a logical structure of a communication network, however, in conditions of high density networks, it is necessary to use additional opportunities to increase the efficiency of its solution. Classical routing methods and algorithms operate, as a rule, with one selection criterion, which may not be an effective solution in such conditions. In high-density IoT wireless networks, more parameters must be taken into account, since the quality of the route in them depends on many factors. Thus, to improve the efficiency of IoT networks, it is important to develop a routing method according to a number of criteria. This problem is the subject of the present work. **The aim** of the work is to develop a method for multi-criteria traffic routing in a high-density IoT network. To achieve the goal, the paper proposes an approach to the use of Gray Relational Analysis, which makes it possible to effectively solve the problem of multi-criteria route optimization, including with a small amount of initial data. **The object** of the study is the Internet of Things network. The subject of the study is the multi-criteria routing method implemented using Gray Relational Analysis. The results of simulation modeling showed the effectiveness of the proposed method in comparison with the methods of single-criteria route selection. **The method** used is the method of Gray Relational Analysis, which allows solving problems of multicriteria optimization. **The novelty** of the work lies in the proposed method of applying Gray Relational Analysis to solve a multicriteria routing problem in a high-density IoT network. **The result** of the work is a method of applying Gray Relational Analysis in the problem of multi-criteria traffic routing in a high-density IoT network. **Theoretical/Practical significance.** The theoretical significance of the obtained results lies in the description of a new method of applying Gray Relational Analysis in the routing problem and confirmation of its effectiveness by simulation results. The practical significance lies in the fact that this method can be used in traffic routing protocols in high-density IoT networks.

Keywords: high-density IoT networks, multi-objective routing, Gray Relational Analysis

Funding: The studies at St. Petersburg State University of Telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruevich were supported by the Ministry of Science and High Education of the Russian Federation by the grant 075-15-2022-1137

For citation: Marochkina A., Paramonov A. A Method for Routing Traffic in a Three-Dimensional High-Density IoT Network Using Gray Relational Analysis. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):75–85. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-75-85

Введение

Интернет вещей (ИВ) стал неотъемлемой частью сетей связи, а количество интернет-устройств превысило численность жителей Земли. Сети ИВ становятся сетями высокой плотности [1], в которых в

малом объеме сосредоточено большое количество интернет-устройств. Часто для таких сетей уже нельзя применять простые плоские модели, а следует прибегать к моделям в трехмерном пространстве [2].

При организации сетей ИВ высокой плотности с применением технологий и протоколов сетей ad hoc требуется решить задачу построения логической структуры сети, которая бы в наибольшей степени эффективно решала задачу доставки данных. Под эффективностью здесь следует понимать достижение поставленной цели минимальными средствами. Целью является повышение вероятности доставки в заданный срок.

Эту задачу следует решать, снижая вероятности потерь и задержек на участках маршрутов доставки данных. Структура сети высокой плотности может быть весьма разнообразна и определяется выбором головных узлов кластеров [3] и маршрутов доставки данных до них. При этом различные участки оказываются в неравных условиях: некоторые из них обслуживают большую долю трафика, некоторые имеют большую протяженность, количество транзитов и др.

Логическая структура сети определяется выбираемыми в ней маршрутами (в большинстве случаев на основании количества участков/транзитов/скачков) [4]. Также авторы предлагают использовать и иные критерии, позволяющие повысить стабильность или другие качества соединения.

Наиболее распространенными протоколами маршрутизации в сетях ad hoc являются протоколы OLSR [5] и AODV [6] – проактивный и интерактивный протоколы, соответственно. Оба эти протокола осуществляют поиск маршрутов по массовой рассылке служебных сообщений узлам-соседям. По результатам рассылки может быть найдено множество маршрутов, выбирается один, который используется для передачи данных. Критерием выбора является количество участков (транзитных узлов) в маршруте. Однако не всегда такое правило позволяет выбрать лучший (наиболее качественный) маршрут. В большинстве случаев качество маршрута определяется не единственным критерием.

В сетях с высокой плотностью устройств велика вероятность перегрузки узлов трафиком из-за высокой их концентрации в пространстве [7]. Во многих приложениях узлы сети оснащены автономными (не возобновляемыми) источниками энергии, которые имеют ограниченный ресурс. Узлы с малым запасом энергии нежелательно использовать в качестве транзитных, так как это может привести к сокращению времени их функционирования, что, в свою очередь, приведет к сокращению времени «жизни» маршрута.

Значительный уровень взаимных влияний в сети высокой плотности приводит к росту вероятности потерь пакетов в разной степени на различных участках сети.

От протяженности участка маршрута зависит уровень сигнала, следовательно, скорость передачи данных и задержка. Без учета этого фактора

маршрут с меньшим числом участков может оказаться хуже маршрута с большим числом участков.

В качестве особенности сетей с высокой плотностью узлов стоит отметить ее положительное качество, которое заключается в том, что в такой сети велика вероятность найти узел рядом с любой выбранной точкой. Эта вероятность существенно выше, чем в обычной сети. Такая особенность несколько расширяет возможности по формированию структуры сети.

Выбор маршрута с учетом различных влияющих факторов является достаточно сложной задачей, для решения которой требуется осуществить его многокритериальную оптимизацию [8–10]. Решение осложняется еще тем, что объем исходных данных для его принятия ограничен и не достаточен для применения методов статистического анализа.

Целью данной работы является разработка метода, применимого для выбора маршрута в беспроводной сети высокой плотности, построенного на основе нескольких критериев с целью повышения эффективности функционирования сети связи.

Модель сети и постановка задачи

Будем полагать, что сеть ad hoc состоит из n узлов, имеющих равные функциональные возможности. Модель сети задана неориентированным взвешенным графом $G(V, E)$, где множество вершин $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ ассоциируется с узлами сети, а множество ребер $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – со связями между ними. Каждое из ребер характеризуется весом $W = \{w_1, \dots, w_m\}$. Будем полагать, что вес ребра задается вектором (набором из S) а сеть определена в трехмерном пространстве координатами узлов $V_C = \{(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)\}$.

Для иллюстрации фрагментов сети будем использовать проекцию узлов сети на горизонтальную плоскость. На рисунке 1а приведена модель трехмерной сети в пространстве, ограниченном кубом. Точки соответствуют узлам, в данном случае равномерно распределенным в трехмерном пространстве. На рисунке 1б приведена проекция фрагмента этой сети на горизонтальную плоскость, в которой изображен маршрут между двумя узлами этой сети.

Полагаем, что ребро графа существует между парой узлов, если они находятся в зоне связи друг друга, а зона связи представляет собой сферу радиуса R . Тогда условие существования ребра может быть записано в виде выражения:

$$d_{i,j} = \begin{cases} d(i,j) & d(i,j) \leq R \\ \infty & d(i,j) > R \end{cases}, \quad (1)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между узлами i и j .

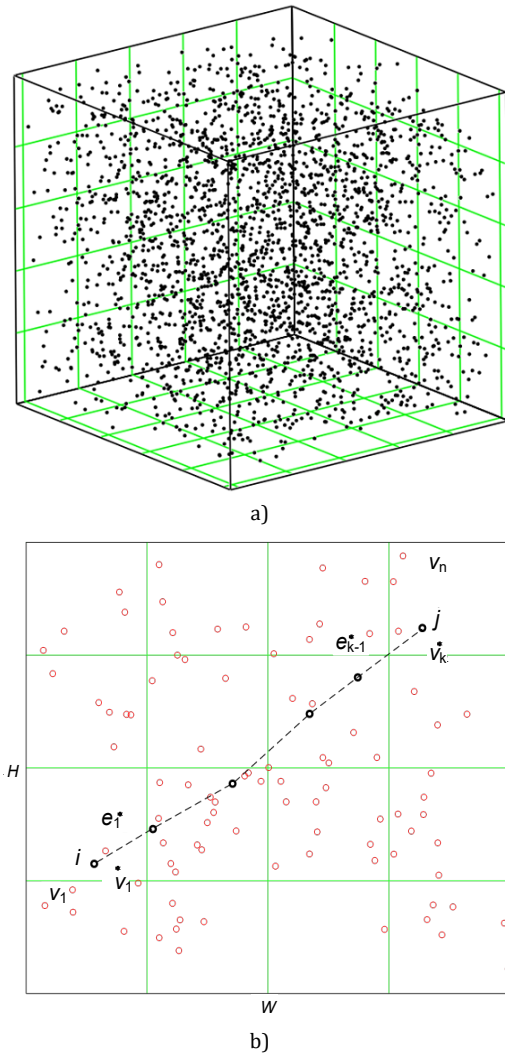


Рис. 1. Модель сети высокой плотности в трехмерном пространстве

Fig. 1. High Density Network Model in 3D Space

Требуется найти путь между вершинами i и j , $i, j = 1, \dots, n$, который характеризуется рядом показателей, определяющими его качество Q :

$$P_{i,j} = \{e_r, v_r^*, e_{r+1}, \dots, e_{k-1}, v_k^*\}, \\ e_r \in E, v_r^* \in V, r = 1, \dots, k.$$

Длина пути L определяется количеством входящих в него ребер или на единицу меньше количества входящих в него вершин $L = k - 1$.

Качество пути определяется как некоторая функция от весов ребер, входящих в него:

$$Q_{i,j}(W_{i,j}) = f(W_{i,j}),$$

где $W_{i,j} = \{w_1, \dots, w_{k-1}\}$.

Если вес задается вектором, состоящим из S показателей $w_r = (w_r^{(1)}, \dots, w_r^{(S)})$, $r = 1, \dots, k - 1$, тогда решение задачи выбора пути можно формально описать как решение задачи оптимизации целевой функции $Q(W_{i,j})$:

$$R_{i,j} = \arg \max_{R_{i,j} \in H} Q(W_{i,j}), \quad (2)$$

$$\phi_z(\cdot) = \text{true}, \quad z = 1, \dots, S,$$

где $H_{i,j} = \{h_1, \dots, h_N\}$ множество всех возможных путей между вершинами i и j ; $\phi_i(\cdot)$ ограничения для показателей качества $W_{i,j}$.

Задачу (2) можно решать, как задачу поиска кратчайшего пути на графе с использованием известных из теории алгоритмов [11, 12]. Однако для их использования необходим метод, позволяющий учесть множество критериев.

Метод многокритериального выбора пути

Решение задачи (2) заключается в выборе наилучшего, с позиции оценки его качества, пути. Для случая, когда качество пути определяется скалярными коэффициентами ребер, применимы классические методы теории графов, реализуемые алгоритмами поиска кратчайших путей [12]. В данном случае их нельзя применить напрямую, без приведения показателей качества ребер к скалярной форме. В общем случае задача (2) является многокритериальной.

Будем использовать пять показателей качества: количество участков, уровень сигнала (RSSI, от англ. Received Signal Strength Indicator), остаточный запас энергии, коэффициент потерь и задержку. Определим правила агрегирования показателей участков. Будем исходить из тех соображений, что качество маршрута во многом определяется «наихудшим» участком (в зарубежной литературе часто используют фразеологизм – бутылочное горлышко). «Наихудшим» участком обозначается пропускная способность (достижимая скорость передачи), следовательно, задержка также во многом определяется «наихудшим» звеном: надежность маршрута меньше, чем надежность самого ненадежного звена.

Исходя из сказанного выше, будем использовать в качестве значения для таких показателей как уровень сигнала, запас энергии, вероятность потерь пакета и длина очереди «наихудшие» показатели, имеющие место на участках маршрута. В таблице 1 приведены выбранные показатели и правила их вычисления.

ТАБЛИЦА 1. Правила вычисления показателей

TABLE 1. Rules for Calculating Indicators

Показатель	Значения на участках	Значение для маршрута
w_1 (количество участков)	1	k
w_2 (уровень сигнала)	$s_1, \dots, s_k$	$\min(s_1, \dots, s_k)$
w_3 (запас энергии)	$e_1, \dots, e_k$	$\min(e_1, \dots, e_k)$
w_4 (коэффициент потерь)	$p_1, \dots, p_k$	$\max(p_1, \dots, p_k)$
w_5 (размер очереди)	$L_1, \dots, L_k$	$\max(L_1, \dots, L_k)$

Применяемые на практике алгоритмы выбора маршрутов основаны на известных из теории графов алгоритмах выбора кратчайших путей, которые выстроены на одном критерии – условной длине маршрута (стоимости или весе). Для того, чтобы перейти к нескольким критериям необходимо реализовать метод преобразования вектора показателей к единичному коэффициенту, который позволит сделать выбор в пользу того или иного маршрута.

Следует отметить, что существенным моментом приведения коэффициентов к скалярной форме является то, что они являются случайными числами, т. е. оценками, полученными по конечным выборкам. Размер этих выборок может быть недостаточно велик, чтобы получить надежные статистические оценки, а также различными являются размерность и диапазон принимаемых значений. Для этой цели применим серый реляционный анализ (GRA, *аббр. от англ.* Gray Relational Analysis) [13–16], разработанный Дэнг Джулуном из Хуачжунского университета науки и технологий в Китайской Народной Республике. Название «Серый» происходит из теории «серых» систем, т. е. систем с неполной информацией. Данный метод можно сравнить с методом нечетких множеств в задачах управления, которые также позволяют принимать решения при малом объеме исходных данных.

Модель GRA удобна, когда по некоторым причинам применение статистических методов затруднено. Кроме того, вычислительная сложность метода невелика, он может быть реализован практически на любых вычислительных средствах. Идея GRA заключается в использовании степени подобия последовательностей данных для определения степени их сходства. Модель GRA также является популярным методом оптимизации по многим критериям. Перечисленные качества дают основания предположить возможность применения GRA для решения задачи маршрутизации.

GRA включает в себя следующие основные этапы: нормирование исходных данных, вычисление последовательности отклонений, серых реляционных коэффициентов, серых реляционных оценок (GRG, *аббр. от англ.* Gray Relational Grade), на основании которых может быть произведен выбор. Как вспомогательный этап, можно произвести ранжирование полученных оценок.

Этап нормирования параметра w заключается в следующем. Если увеличение значения параметра w приводит к повышению качества Q (например, для RSSI *аббр. от англ.* Receiving Signal Strength Indicator или SNR *аббр. от англ.* Signal to Noise Ratio), или его уменьшение – к повышению качества Q , то нормализованное значение параметра определяется как:

$$\bar{w}_{i,j} = \begin{cases} \frac{w_{i,j} - \min_j(w_i)}{\max_j(w_{i,j}) - \min_j(w_{i,j})} & |\uparrow w \rightarrow Q \uparrow \\ \frac{\max_j(w_i) - w_{i,j}}{\max_j(w_{i,j}) - \min_j(w_{i,j})} & |\downarrow w \rightarrow Q \uparrow \end{cases}, \quad (3)$$

где $w_{\max}$ и $w_{\min}$ – максимально и минимально возможные значения параметра w , соответственно.

Последовательность отклонений для нормализованных данных:

$$\delta_{i,j} = \max_i \bar{w}_{i,j} - \bar{w}_{i,j}. \quad (4)$$

Серые реляционные коэффициенты $\gamma_{i,j}$ оцениваются как:

$$\gamma_{i,j} = \frac{\max_i \delta_{i,j} + \zeta \min_i \delta_{i,j}}{w_{i,j} + \zeta \max_i \delta_{i,j}}, \quad (5)$$

где ζ – коэффициент различия или идентификации; $\zeta \in [0, 1]$, в большинстве случаев используется значение 0,5 [13].

На основе (5) вычисляются серые реляционные оценки:

$$G_i = \sum_{j=1}^s \eta_j \gamma_{i,j}, \quad (6)$$

где $\eta_j \in [0, 1]$ – весовые коэффициенты значимости соответствующих параметров, характеризующих качество маршрута, $\sum_{j=1}^s \eta_j = 1$. Значения этих коэффициентов могут быть получены методами экспертных оценок или иными методами. В рассмотренных примерах они были выбраны равнозначными $\eta_j = \frac{1}{s}$, $j = 1, \dots, S$.

Большинство известных алгоритмов поиска кратчайшего пути/путей (алгоритмы Дейкстры, Беллмана – Форда, Флойда – Уоршелла и др.) циклически выполняют трехместную операцию [12], которая в общем виде может быть записана как:

$$d_{i,j} = \text{opt}\{d_{i,j}, d_{i,k} \otimes d_{k,j}\}, \quad (7)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между вершинами i и j ; opt – операция взятия минимума или максимума, а символ $\otimes$ обозначает операцию, производимую с весовыми коэффициентами ребер.

С учетом описанного выше метода GRA трехместная операция будет иметь следующий вид:

$$w_{i,j} = \text{GRA}\{w_{i,j}, w_{i,k} \otimes w_{k,j}\}, \quad (8)$$

где $w_{i,j}$ – элемент матрицы показателей; GRA – операция выбора с использованием метода серого реляционного анализа; символ $\otimes$ – операцию, производимую с весовыми коэффициентами ребер, согласно таблице 1.

Данная модификация алгоритма не изменяет его сложности, в смысле количества выполняемых при поиске пути операций.

Пример решения

Ниже приведен пример выбора варианта маршрута на основе данных о количестве транзитов, уровне сигнала, остаточной энергии, коэффициенте потерь пакетов и задержке. Для агрегирования показателей используются правила из таблицы 1. Для уровня сигнала выбирается наименьшее значение из тех, которые имеют место на

участках маршрута. Аналогично в качестве показателя остаточной энергии используется наименьший уровень из тех, которые имеются в узлах маршрута. В качестве показателя задержки может быть принято среднее значение длины очереди в узлах маршрута или значение задержки, если его возможно измерить. Исходные данные приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Исходные данные

TABLE 2. Initial Data

№ п/п	Количество транзитов	RSSI, дБм	Запас энергии, %	Коэффициент потерь	Длина очереди
1	10	-58	100	0,009	9
2	10	-13	11	0,192	0
3	1	-32	29	0,009	5
4	8	-74	100	0,134	8
5	9	-38	82	0,481	15
6	1	-26	42	0,259	14
7	4	-64	77	0,344	8
8	9	-49	55	0,459	14
9	3	-57	26	0,334	9
10	1	-13	58	0,232	6
11	7	-54	87	0,265	17
12	8	-22	8	0,198	20
13	10	-35	12	0,275	10
14	10	-59	64	0,107	15
15	4	-52	16	0,014	1

В таблице 3 приведены нормализованные данные, полученные с использованием выражения (3), а также (через дробь) отклонения, вычисленные с помощью (4). Данные в этой таблице характеризуют разброс полученных параметров, которые могут быть сравнимы из-за того, что построены по нормализованным данным. Наименования полей отличаются от предшествующей таблицы, так как они уже не имеют того натурального выражения, а лишь характеризуют соответствующую величину.

В таблице 4 приведены значения серых реляционных коэффициентов, вычисленных, согласно (5), и серых реляционных оценок (колонка серого цвета), вычисленных, согласно (6), а также приведены значения ранга оценки (колонка голубого цвета).

Серые реляционные коэффициенты необходимы для сравнения полученных результатов.

Количество оценок равно количеству сравниваемых наборов данных. Величина оценки характеризует, насколько данный набор близок к желаемому результату. Для выбора лучшего варианта следует выбрать набор данных, соответствующий наибольшему значению оценки.

Значения ранга оценки показывают порядковый номер соответствующего набора данных, если эти наборы отсортировать от наиболее предпочтительных к наименее. Данные результаты могут быть полезны при использовании многопутевой маршрутизации, так как позволяют охарактеризовать группу известных маршрутов степенью их предпочтительности. Из таблицы 4 видно, что наилучшим является вариант 3, с серой оценкой 0,739.

На рисунках 2а и 2б приведены иллюстрации примеров построения маршрута в сети при различных условиях моделирования с использованием маршрутизации по количеству транзитов (рисунок 2а) и с использованием предложенного метода (рисунки 2б–2д). Результат выбора маршрута, приведенный на рисунке 2б, получен при увеличении количества узлов с малым запасом энергии. При построении маршрута предпочтение было отдано узлам с относительно высоким запасом энергии, при этом длина маршрута существенно выросла с 5 до 18 участков. Результат, приведенный на рисунке 2с, получен при увеличении обслуживаемого узлами трафика (средней длины очереди) в условиях малого запаса энергии. Длина маршрута также возросла до 20 участков.

ТАБЛИЦА 3. Нормализованные данные и последовательность отклонений

TABLE 3. Normalized Data and Sequence of Deviations

№ п/п	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка
1	0,000/1,000	0,262/0,738	1,000/1,000	1,000/0,000	0,550/0,450
2	0,000/1,000	1,000/0,000	0,110/0,890	0,612/0,388	1,000/0,000
3	1,000/0,000	0,689/0,311	0,290/0,710	0,999/0,001	0,750/0,250
4	0,222/0,778	0,000/1,000	1,000/0,000	0,734/0,266	0,600/0,400
5	0,111/0,889	0,590/0,410	0,820/0,180	0,000/1,000	0,250/0,750
6	1,000/0,000	0,787/0,213	0,420/0,580	0,469/0,531	0,300/0,700
7	0,667/0,333	0,164/0,836	0,770/0,230	0,289/0,711	0,600/0,400
8	0,111/0,889	0,410/0,590	0,550/0,450	0,047/0,953	0,300/0,700
9	0,778/0,222	0,279/0,721	0,260/0,740	0,310/0,690	0,550/0,450
10	1,000/0,000	1,000/0,000	0,580/0,420	0,527/0,473	0,700/0,300
11	0,333/0,667	0,328/0,672	0,870/0,130	0,456/0,544	0,150/0,850
12	0,222/0,778	0,852/0,148	0,080/0,920	0,600/0,400	0,000/1,000
13	0,000/1,000	0,639/0,361	0,120/0,880	0,436/0,564	0,500/0,500
14	0,000/1,000	0,246/0,754	0,640/0,360	0,791/0,209	0,250/0,750
15	0,667/0,333	0,361/0,639	0,160/0,840	0,989/0,011	0,950/0,050

ТАБЛИЦА 4. Серые реляционные коэффициенты и оценки

TABLE 4. Gray Relational Coefficients and Scores

№ п/п	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка	GRG	Ранг
1	0,333	0,404	0,333	1,000	0,526	0,519	8
2	0,333	1,000	0,360	0,563	1,000	0,651	4
3	1,000	0,616	0,413	0,999	0,667	0,739	1
4	0,391	0,333	1,000	0,653	0,556	0,587	6
5	0,360	0,550	0,735	0,333	0,400	0,476	13
6	1,000	0,701	0,463	0,485	0,417	0,613	5
7	0,600	0,374	0,685	0,413	0,556	0,526	7
8	0,360	0,459	0,526	0,344	0,417	0,421	15
9	0,692	0,409	0,403	0,420	0,526	0,490	10
10	1,000	1,000	0,543	0,514	0,625	0,737	2
11	0,429	0,427	0,794	0,479	0,370	0,500	9
12	0,391	0,772	0,352	0,555	0,333	0,481	12
13	0,333	0,581	0,362	0,470	0,500	0,449	14
14	0,333	0,399	0,581	0,705	0,400	0,484	11
15	0,600	0,439	0,373	0,979	0,909	0,660	3

Полученные результаты ожидаемы и демонстрируют способность предложенного метода выбирать альтернативное решение, в данном случае, ценой увеличения длины маршрута.

Результат, приведенный на рисунке 2d, получен при увеличении потерь на участках маршрута в условиях предыдущего эксперимента, т. е. в еще более худших условиях. Как можно заметить, маршрут близок к исходному (полученному только с учетом критерия длины), его длина снизилась до 10 участков. Такой результат можно объяснить тем, что условия оказались настолько плохи, что иных вариантов «улучшения» маршрута за счет увеличения его длины нет.

Эффективность метода

Для оценки эффективности предложенного метода необходимо определить само понятие эффективности и определить ряд условий, согласно которым будет возможно выбрать способ оценки. Следует отметить, что рассматриваемый метод является приближенным решением задачи оптимизации. Для сравнения получаемых результатов с оптимальными значениями пришлось бы выполнить полный перебор всех вариантов, что является слишком сложной задачей, поэтому целесообразно сравнить его с известным методом.

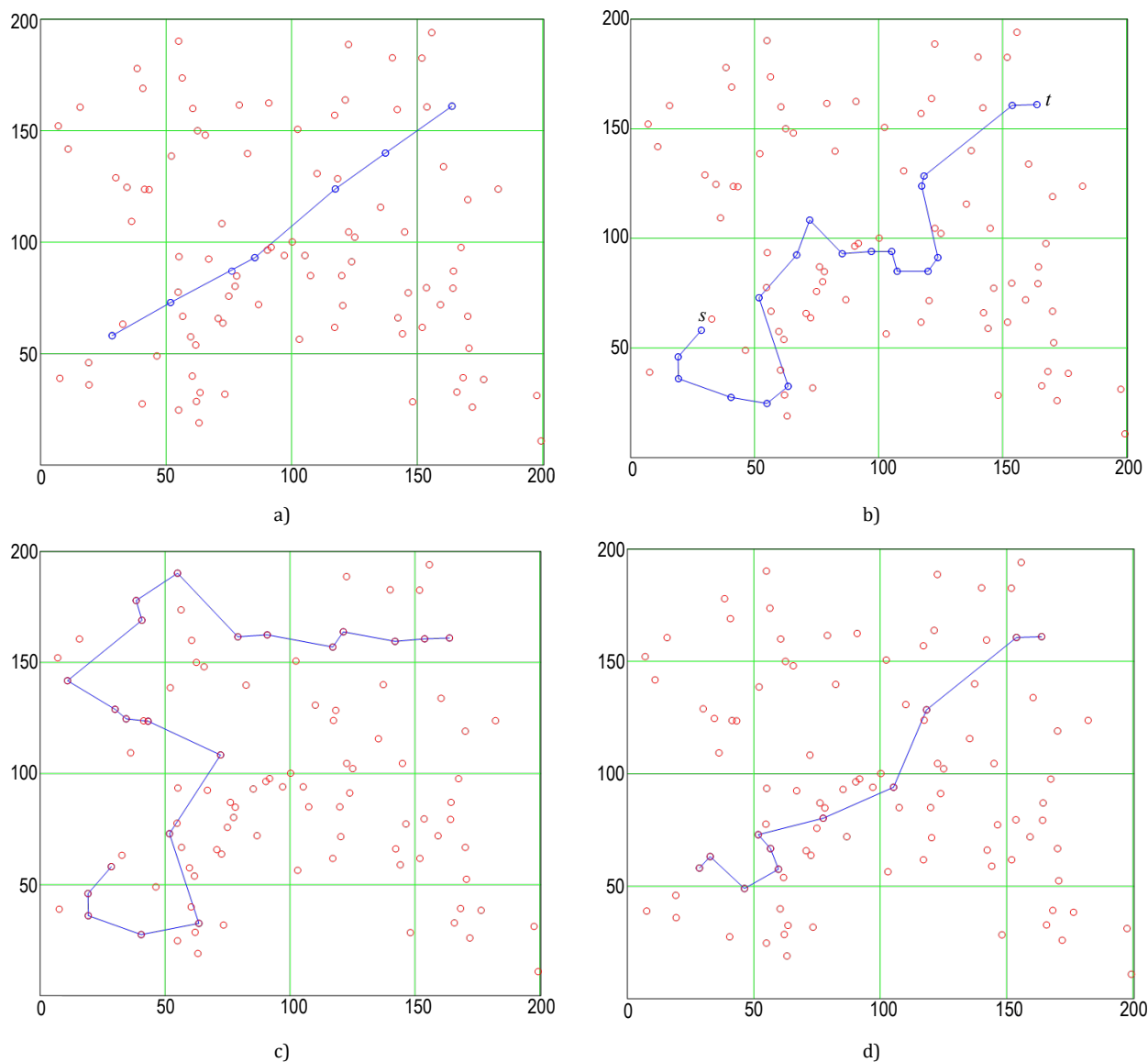


Рис. 2. Пример выбора маршрута по количеству транзитов (а) и с использованием GRA (b, c, d)

Fig. 2. An Example of Route Selection by the Number of Transits (a) and Using GRA (b, c, d).

Под эффективностью метода будем понимать его достоинства по отношению к однокритериальным методам маршрутизации, использующим в качестве критерия количество транзитных участков в маршруте. Под достоинствами метода будем понимать выигрыш в показателях качества, а именно: в коэффициенте потерь, величине задержки, потенциальной устойчивости маршрута. Потенциальную устойчивость будем характеризовать минимальным запасом энергии в узлах маршрута. Значения указанных показателей случайны, поэтому для их оценки необходимо провести серию имитационных экспериментов и сравнить полученные результаты.

Для оценки эффективности метода введем показатель, включающий в себя используемые для выбора параметры качества маршрута:

$$q = \eta_1 \tilde{k} + \eta_2 \tilde{r} + \eta_3 \tilde{e} + \eta_4 \tilde{p} + \eta_5 \tilde{t}, \quad (9)$$

где $\eta_1, \dots, \eta_5 \in [0,1]$, $\sum_{i=1}^5 \eta_i = 1$, в данном случае все коэффициенты равны 0,2; $\tilde{k}, \tilde{r}, \tilde{e}, \tilde{p}, \tilde{t}$ – нормированные, согласно (3), показатели качества маршрута, полученные в ходе моделирования: количество участков, минимальный уровень сигнала, минимальный запас энергии, коэффициент потерь пакетов и задержка, соответственно.

Значение для однокритериального метода обозначим как q_0 , а для предложенного метода – q^* . В качестве однокритериального метода рассматривается выбор маршрута протоколом AODV. В данном случае величина (9) отражает, насколько выбранный маршрут отвечает желаемым характеристикам при допущении, что они имеют равное значение.

Из полученных результатов, приведенных на рисунке 3, видно, что при использовании в качестве критерия минимума участков распределение q имеет дисперсию и меньшее среднее значение $\bar{q}_0 \approx 0,45$, $\sigma_0 \approx 0,2$. Распределение q при использовании предложенного метода имеет среднее значение $\bar{q}_* \approx 0,69$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_* \approx 0,36$. Применение t -критерия Стьюдента [17] подтверждает гипотезу о том, что средние значения статистически различны с доверительной вероятностью 0,95. Полученные распределения аппроксимированы Нормальным распределением и Бета-распределением с соответствующими параметрами (синяя и красная сплошные линии).

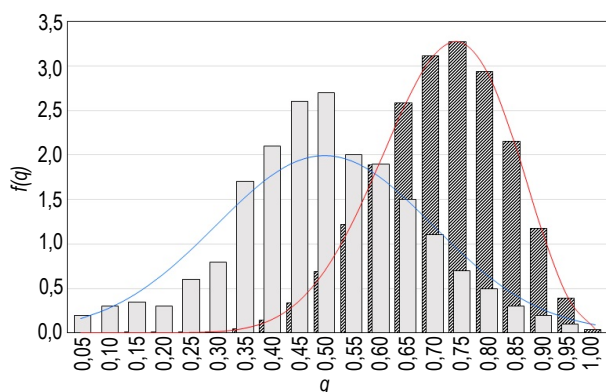


Рис. 3. Распределение показателя качества маршрута при использовании выбора по минимальному количеству участков (синяя кривая) и GRA (красная кривая)

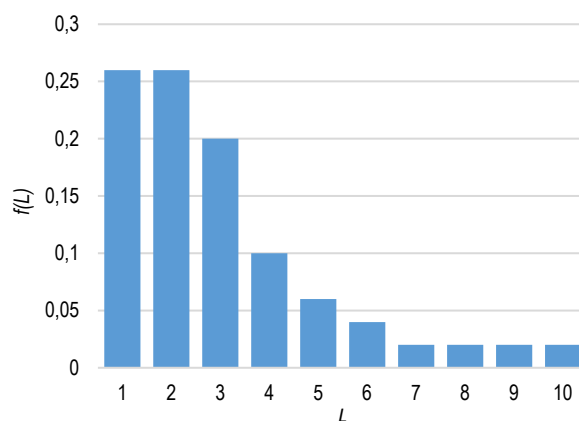
Fig. 3. Distribution of the Route Quality Index When Using Selection by the Minimum Number of Sites (Blue Curve) and When Using GRA (Red Curve)

Оценим эффективность как разницу между средними значениями показателя q :

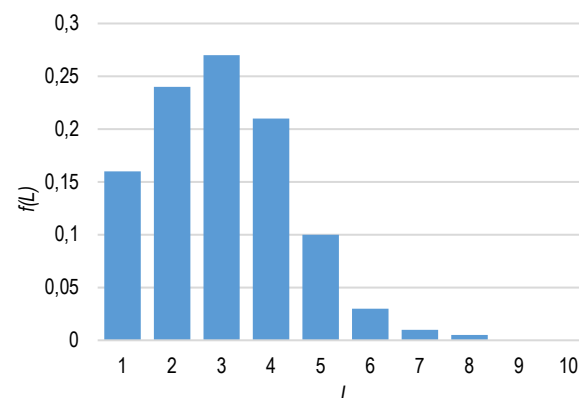
$$e = 100 \frac{\bar{q}_* - \bar{q}_0}{\bar{q}_0} \% \quad (10)$$

По результатам проведенных экспериментов значение составляет $e = 53,3 \%$. Такой результат можно интерпретировать следующим образом: более чем в половине случаев предложенный метод дает более приемлемое решение в части выбора маршрута, чем метод, основанный на выборе самого короткого маршрута.

На рисунке 4 приведено распределение длины пути, полученное по результатам экспериментов. Средняя длина пути L при выборе по количеству транзитов (см. рисунок 4а) равна 2,96, при выборе предложенным методом 3,00 (см. рисунок 4б). Предложенный метод несколько повышает среднее количество транзитов (в данном случае на 1,4 %). Также отличается распределение длины пути, которое имеет более длинный хвост. Максимальная длина пути в первом случае составил 8 участков, а во втором – 10 участков. Максимальная длина пути в данном случае увеличилась на 25 %.



a)



b)

Рис. 4. Распределение длин путей

Fig. 4. Distribution of Path Lengths

Применение нескольких критериев увеличивает объем служебных данных, необходимых для выбора маршрута. Это увеличение зависит от количества используемых критериев. Также следует отметить, что фактического роста объема служебного трафика можно избежать за счет того, что при многокритериальном выборе достигается уменьшение интенсивности перестроения структуры сети, благодаря выбору более стабильных маршрутов. Основное достоинство данного метода, по сравнению с многокритериальным методом [9, 10] состоит в том, что он требует меньшего объема исходных данных и имеет меньшую вычислительную сложность, выигрыш в части качества решения составляет (1–1,5 %).

Следует заметить, что эффективность метода зависит от степени влияния тех факторов, которые учитываются при выборе маршрута и их реальных значений. Например, если все узлы сети имеют равный запас энергии, то эффективность метода, согласно определению (9), меньше.

Выводы

Приведенный выше анализ позволяет сделать вывод, что предложенный метод выбора маршрута

с учетом нескольких параметров качества повышает эффективность функционирования сети и имеет преимущества, по сравнению с методами выбора маршрута по критерию минимума количества участков.

Предложенный метод дает возможность учесть существенные для конкретного случая параметры качества, набор которых может быть расширен по сравнению с использованным в данной работе. Следует отметить, что расширение набора параметров качества также потребует расширение набора правил их вычисления для маршрута.

Эффективность предложенного метода тем выше, чем шире набор значений используемых параметров в конкретной сети (расширяется выбор).

При близости значений параметров для всех участков сети эффективность метода падает из-за снижения возможности выбора. Следует отметить, что она не ниже эффективности метода выбора по одному критерию.

По результатам имитационных экспериментов эффективность метода составила 53 % по отношению к однокритериальному методу.

Недостатками предложенного метода являются необходимость получения исходных данных о показателях качества и выполнения дополнительных вычислений.

Предложенный метод маршрутизации может быть применен при реализации протоколов одно- или многопутевой маршрутизации.

Список источников

1. Кучерявый А.Е. Интернет вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
2. Кучерявый А.Е., Пармонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А. и др. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1–12. DOI:10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12
3. Марочкина А.В. Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности // Электросвязь. 2023. № 6. С. 60–66. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.008
4. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2016. 992 с.
5. RFC 3626. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). Network Working Group. October, 2003.
6. RFC 3561. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Network Working Group. July, 2003.
7. Бушеленков С.Н., Пармонов А.И. Анализ и формирование структуры сети интернета вещей на основе моделей решеток // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23–28. DOI:10.34832/ELSV.2021.20.7.002
8. Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks // Proceedings of the IEEE International Multi Topic Conference on Technology for the 21st Century (IEEE INMIC 2001, Lahore, Pakistan, 30 December 2001). IEEE Press, 2001. PP. 62–68. DOI:10.1109/INMIC.2001.995315
9. Zhiwei Y., Michael E., Thomas B., Joost K. Multicriteria Inventory Routing by Cooperative Swarms and Evolutionary Algorithms // Proceedings of the International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation (IWINAC 2015, Elche, Spain, 1–5 June 2015). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 9108. Cham: Springer, 2015. PP. 127–137. DOI:10.1007/978-3-319-18833-1_14
10. Tilwari V., Maheswar R., Jayarajan P., Sundararajan T.V.P., Hindia M.H.D.N., Dimyati K., et al. MCLMR: A Multicriteria Based Multipath Routing in the Mobile Ad Hoc Networks // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 112. Iss. 1. PP. 2461–2483. DOI:10.1007/s11277-020-07159-8
11. Берж К. Теория графов и ее приложения. М.: ИЛ, 1962. 320 с.
12. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
13. Liu S., Yang Y., Forrest J.Y.-L. Grey Systems Analysis: Methods, Models and Applications. Singapore: Springer, 2022. DOI:10.1007/978-981-19-6160-1
14. Patil A.N., Walke G., Mahesh G. Grey Relation Analysis Methodology and its Application // Research Review. 2019. Vol. 4. Iss. 2. PP. 409–411. DOI:10.5281/zenodo.2578088
15. Yang W., Wu Y. A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. Article ID 8761681. DOI:10.1155/2019/8761681
16. Hsiao S.-W., Lin H.-H., Ko Y.-C. Application of Grey Relational Analysis to Decision-Making during Product Development // Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. 2017. Vol. 13. Iss. 6. PP. 2581–2600. DOI:10.12973/eurasia.2017.01242a
17. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Издательство Юрайт, 2023. 538 с.

References

1. Koucheryavy A.E. Internet of Things. *Electrosvyaz*. 2013;1:21–24.
2. Koucheryavy A., Paramonov A., Makolkin A., Muthanna A.S.A., Vybornova A., Dunaytsev R., et al. 3 Dimension Multilayer Heterogenous Ultra Dense Networks. *Telecom IT*. 2022;10(3):1–12. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-1-12
3. Marochkina A.V. Modeling and Clustering a 3D Internet of Things Network Using the Fractal Dimension Estimation Method. *Electrosvyaz*. 2023;6:60–66. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.008
4. Olifer V.G., Olifer N.A. *Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols*. St. Petersburg: Peter Publ.; 2016. 992 p.
5. RFC 3626. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. Network Working Group. October, 2003.
6. RFC 3561. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Network Working Group. July, 2003.

7. Bushelenkov S.N., Paramonov A.I. Analysis and Formation of the Structure of the Internet of Things Network Based on Lattice Models. *Electrosvyaz*. 2021;7:23–28. DOI:10.34832/ELSV.2021.20.7.002
8. Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference on Technology for the 21st Century, IEEE INMIC 2001, 30 December 2001, Lahore, Pakistan*. IEEE Press; 2001. p.62–68. DOI:10.1109/INMIC.2001.995315
9. Zhiwei Y., Michael E., Thomas B., Joost K. Multicriteria Inventory Routing by Cooperative Swarms and Evolutionary Algorithms. *Proceedings of the International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, IWINAC 2015, 1–5 June 2015, Elche, Spain. Lecture Notes in Computer Science, vol.9108*. Cham: Springer; 2015. p.127–137. DOI:10.1007/978-3-319-18833-1_14
10. Tilwari V., Maheswar R., Jayarajan P., Sundararajan T.V.P., Hindia MHD N., Dimyati K., et al. MCLMR: A Multicriteria Based Multipath Routing in the Mobile Ad Hoc Networks. *Wireless Personal Communications*. 2020;112(1):2461–2483. DOI:10.1007/s11277-020-07159-8
11. Berge K. *Graph theory and its applications*. Paris: Dunod; 1958.
12. Christofides N. *Graph theory*. New York; 1975.
13. Liu S., Yang Y., Forrest J.Y.-L. *Grey Systems Analysis: Methods, Models and Applications*. Singapore: Springer; 2022. DOI:10.1007/978-981-19-6160-1
14. Patil A.N., Walke G., Mahesh G. Grey Relation Analysis Methodology and its Application. *Research Review*. 2019;4(2): 409–411. DOI:10.5281/zenodo.2578088
15. Yang W., Wu Y. A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;2019:8761681. DOI:10.1155/2019/8761681
16. Hsiao S.-W., Lin H.-H., Ko Y.-C. Application of Grey Relational Analysis to Decision-Making during Product Development. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 2017;13(6):2581–2600. DOI:10.12973/eurasia.2017.01242a
17. Kremer N.Sh. *Theory of Probabilities and Mathematical Statistics*. Moscow: Yurait Publ.; 2023. 538 p.

Статья поступила в редакцию 09.08.2023; одобрена после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 26.08.2023.

The article was submitted 09.08.2023; approved after reviewing 24.08.2023; accepted for publication 26.08.2023.

Информация об авторах:

МАРОЧКИНА
Анастасия Вячеславовна

ассистент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0001-6446-2237>

ПАРАМОНОВ
Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-4104-3504>