

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-62-72>

Модель и методы маршрутизации трафика в сети связи с использованием БПЛА

Константин Алексеевич Кузнецов, kuznetsov.sut@gmail.com

Александр Иванович Парамонов, paramonov@sut.ru

Аммар Салех Али Мутханна , muthanna.asa@sut.ru

Андрей Евгеньевич Кучерявый, akouch@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. Развитие сетей 5G и последующих поколений сопровождается развитием новых услуг, в частности, услуг виртуальной, дополненной реальности, а также телеприсутствия и сетей радиодоступа. В частности, происходит повышение рабочих частот, что ставит дополнительные задачи по организации сети, способной обеспечить требования к качеству обслуживания трафика со стороны новых услуг и обеспечению доступности связи пользователям. Эти задачи могут решаться различными способами размещения точек доступа, в том числе с использованием БПЛА. Такой подход обеспечивает оперативность построения и гибкость структуры сети доступа, но также требует применения методов размещения точек доступа по отношению к пользователям и другим элементам сети связи.

Постановка задачи: разработка методов размещения маршрутизаторов в рое БПЛА и выбора маршрутов пропуска трафика при организации сети доступа, в целях повышения эффективности функционирования сети связи.

Цель работы: повышение эффективности построения сети доступа с использованием БПЛА за счет разработки методов кластеризации и распределения маршрутизаторов в рое БПЛА.

Используемые методы. Исследования проводились с использованием положений теории информации, математических методов оптимизации, методов теории графов и методов кластеризации. Численные результаты получены методом численного моделирования на языке python.

Результат. Разработанная модель и методы позволяют произвести распределение маршрутизаторов (точек доступа) сети, размещенных на БПЛА с учетом качества обслуживания и обеспечения построения связной mesh-сети и ее связи с сетью подвижной связи, которые могут быть использованы как в современных, так и перспективных сетях связи.

Новизна: разработан модельно-методический аппарат, позволяющий повысить эффективность построения сетей беспроводного доступа с применением БПЛА, в частности позволяющий выбирать позиции размещения маршрутизаторов в рое БПЛА и логическую структуру сети. Разработанный модельно-методический аппарат решает задачу маршрутизации трафика с учетом качества его обслуживания.

Практическая значимость: предложенные модель и методы могут быть использованы при организации обслуживания в сетях 5G и последующих поколений. В частности, они позволяют обеспечить доступность связи и оперативность организации сети в случаях недостаточного покрытия, а также в случаях выхода из строя отдельных элементов сети. Возможность выгрузки трафика в локальную сеть позволяет повысить качество обслуживания трафика в сети оператора связи.

Ключевые слова: сети 5G и последующих поколений, кластеризация, БПЛА, трафик, маршрутизация, сеть доступа, качество обслуживания

Ссылка для цитирования: Кузнецов К.А., Парамонов А.И., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Модель и методы маршрутизации трафика в сети связи с использованием БПЛА// Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 62–72. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-62-72. EDN:VYMCTD

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-62-72>

Model and Methods of Traffic Routing in a Communication Network Using UAVs

✉ **Konstantin A. Kuznetsov**, kuznetsov.sut@gmail.com

✉ **Alexander I. Paramonov**, paramonov@sut.ru

✉ **Ammar S.A. Muthanna** ✉, muthanna.asa@sut.ru

✉ **Andrey E. Kucheryavy**, akouch@sut.ru

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

Annotation

Relevance. The development of 5G networks and subsequent generations is accompanied by the development of new services, in particular, virtual, augmented reality services, as well as telepresence, as well as radio access networks. In particular, there is an increase in operating frequencies, which poses additional challenges for organizing a network that can meet the requirements for the quality of traffic service from new services and ensure the availability of communication to users. These problems can be solved by various methods of placing access points, including using UAVs. This approach ensures the efficiency of construction and flexibility of the access network structure, but also requires the use of methods for placing access points in relation to users and other elements of the communication network.

Problem statement: development of methods for placing routers in a UAV swarm and selecting traffic routes when organizing an access network, in order to improve the efficiency of the communication network.

Purpose of the work: improving the efficiency of building an access network using UAVs through the development of clustering methods and distributing routers in a UAV swarm.

Methods. The studies were carried out using the provisions of information theory, mathematical optimization methods, graph theory methods and clustering methods. The numerical results were obtained using the numerical simulation method in Python.

Result. The developed model and methods allow for the distribution of network routers (access points) located on UAVs taking into account the quality of service and ensuring the construction of a connected mesh network and its connection with the mobile network, which can be used in both modern and future communication networks.

Novelty: a modeling and methodological apparatus has been developed that allows for increasing the efficiency of building wireless access networks using UAVs, in particular, allowing for selecting the placement positions of routers in a UAV swarm and the logical structure of the network. The developed modeling and methodological apparatus solves the problem of traffic routing taking into account the quality of its service.

Practical significance: the proposed model and methods can be used to organize service in 5G networks and subsequent generations. In particular, they allow for ensuring the availability of communication and the efficiency of network organization in cases of insufficient coverage, as well as in cases of failure of individual network elements. The ability to unload traffic to a local network allows for improving the quality of traffic service in the operator's network.

Keywords: 5G and next generation networks, clustering, UAVs, routing, access network, quality of service

For citation: Kuznetsov K.A., Paramonov A.I., Muthanna A.S.A., Kucheryavy A.E. Model and Methods of Traffic Routing in a Communication Network Using UAVs. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(4):62–72. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-62-72. EDN:VYMCTD

Введение

Развитие сетей связи направлено на повышение основных показателей качества, таких как достижимая скорость передачи данных, задержка до-

ставки, емкость сети [1–5]. Сети 5G и последующих поколений ориентированы на предоставление услуг, чувствительных к задержкам и скорости передачи данных. Рост проникновения услуг виртуальной и дополненной реальности, а в послед-

ствии и услуг телеприсутствия [6] приводит к необходимости обеспечения высокого качества обслуживания трафика в сети.

В частности, возникает необходимость передачи трафика голографических изображений [7], а также трафика, производимого костюмами телеприсутствия, обеспечивающими интерфейс взаимодействия с метавселенной [8]. Метавселенная направлена на создание виртуального мира для всех видов деятельности, включая образование, торговлю и игры, и считается следующим поколением Интернета. При поддержке AR/VR-приложений онлайн-пользователям предоставляются услуги, схожие с очными. Работа приложений метавселенной обеспечивается синхронизацией данных и широким покрытием беспроводной сети – две практические проблемы, которые необходимо решить, поскольку в сервисах телеприсутствия обычно задействованы носимые беспроводные устройства. Ввиду повышения частотного диапазона, используемого в сетях 5G и выделяемого для 6G, стремительно возрастает затухание сигнала. Таким образом, развертывание базовых станций в пригородах с низкой плотностью населения становится экономически неэффективно [9]. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются экономически более выгодным решением для организации покрытия сети и синхронизации данных метавселенных в пригородной зоне.

Применение костюмов телеприсутствия или подобных им устройств, обеспечивающих получение информации о динамике движения людей или иных объектов, существенно отличается от сбора информации с помощью изображений и в значительной степени дополняет «картину» состояния и изменения окружающего нас мира. Трафик, производимый упомянутыми услугами, должен обслуживаться с тем уровнем качества, который требуется для их реализации. Одним из методов решения данной задачи является применение выгрузки трафика или выделения дополнительных ресурсов для его обслуживания.

Повышение основных показателей качества достигается внедрением новых технических решений, а также новых моделей и методов организации сетей связи. Одним из «узких мест» для решения задачи повышения показателей качества являются сети доступа. В сетях подвижной связи они ограничены из-за конечного объема используемого радиочастотного ресурса. Наиболее эффективным методом является повышение достижимой скорости передачи данных. В ходе эволюции сетей подвижной связи можно наблюдать процесс повышения полосы частот, занимаемых каналом связи и повышения рабочих частот. Это естественный процесс, который происходит из-за необходимости повышения пропускной способности.

Согласно известному выражению К. Шеннона [10], достижимая скорость передачи определяется по выражению: $b = w \log_2(1 + SNR)$ бит/с, где w – полоса пропускания канала; SNR – отношение сигнал/шум. Несмотря на некоторое уменьшение SNR с увеличением полосы пропускания, это является наиболее «простым» методом увеличения скорости. Слово «простым» взято в кавычки потому, что увеличение полосы пропускания связано с повышением рабочей частоты и необходимостью решения многих задач, связанных с этим.

Однако каждое последующее поколение сетей связи предполагает повышение полосы частот и увеличение рабочих частот. Так, в сетях 6G уже предполагается использование субмиллиметрового диапазона и рабочих частот вплоть до 1 ТГц. Особенности распространения сигналов в этом диапазоне волн таковы, что эффективно они могут быть использованы только на относительно малых расстояниях между приемником и передатчиком и в зоне прямой видимости между ними. Свойства сигналов в этом диапазоне волн приближаются к свойствам распространения света.

В настоящее время являются открытыми задачи создания электронных приборов, позволяющих реализовать устройства для генерации, модуляции, приема и обработки таких сигналов. Также открыты вопросы создания антенных устройств в этом диапазоне частот. Тем не менее, исследования [11, 12] позволяют ожидать, что такие элементы будут созданы и они позволят использовать особенности данного диапазона для повышения эффективности сети связи.

Впрочем, задачи, связанные с особенностями распространения сигналов в субмиллиметровом диапазоне волн, требуют решения на уровне организации сети доступа. В частности, «затенение» окружающими объектами, в том числе человеческим телом, может приводить к полной потере связи. Это требует использование большего числа базовых станций (антенн) и соответствующего управления ими.

Одним из подходов к решению задачи организации покрытия в сетях 5G и 6G может быть использование мобильных маршрутизаторов. Уже сейчас производители оборудования выпускают 5G-маршрутизаторы с автономным питанием [13], которые позволяют организовать локальную сеть стандарта IEEE 802.11. Основной задачей применения такого устройства является обеспечение достаточно высокой скорости передачи на уровне подключения к сети 5G.

При работе в перспективных сетях на частотах субмиллиметрового диапазона нужно обеспечить достаточно малое расстояние и прямую видимость между маршрутизатором и антенной базовой стан-

ции. Одним из способов достижения этого является применение БПЛА [14–16]. В данной работе предлагается метод применения БПЛА или группы БПЛА для размещения маршрутизаторов и организации обслуживания пользователей, находящихся в сложных условиях для приема сигналов сети.

Модель и постановка задачи

В общем случае, при размещении маршрутизатора на БПЛА необходимо решить задачу выбора точки его размещения. При этом возможны варианты, когда БПЛА является неподвижным, например, привязным [17], и когда БПЛА может перемещаться как относительно пользователей, так и относительно других БПЛА. Эти варианты отличаются характером движения БПЛА, если для первого варианта структуру сети перестраивать не требуется из-за изменения позиций узлов сети, то во втором варианте такая потребность может иметь место. Однако, и первый и второй варианты требуют решения двух основных задач:

- выбора позиций БПЛА относительно пользователей и базовых станций сети связи;
- выбора логической структуры сети, т.е. маршрутов пропуска трафика в mesh-сети.

Условная модель сети приведена на рисунке 1. На рисунке показаны одиночный БПЛА и группа (рой) БПЛА. Маршрутизатор, размещенный на одиночном БПЛА, выполняет роль точки доступа, обслуживая пользователей в своей зоне связи. Маршрутизаторы, размещенные на БПЛА роя, организованы в mesh (ячеистую) сеть. Один или несколько маршрутизаторов из этой группы могут взаимодействовать с базовыми станциями сети подвижной связи. Маршрутизаторы в рое, в зависимости от условий, могут выполнять функции связи с базовой станцией сети подвижной связи, с другими маршрутизаторами группы, с пользователями.

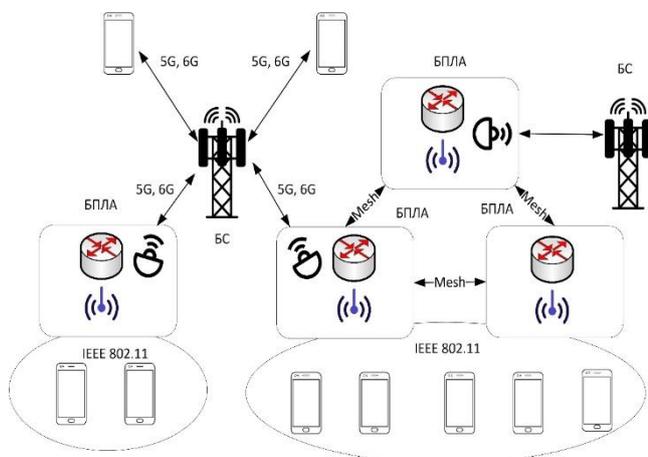


Рис. 1. Модель сети с использованием маршрутизаторов на БПЛА

Fig. 1. Network Model Using Routers on UAVs

Применение группы БПЛА позволяет покрыть связью пользователей, распределенных в некотором пространстве и организовать пропуск трафика между ними и сетью подвижной связи.

Выбор позиций маршрутизаторов

Рассмотрим вариант, когда имеется группа из n маршрутизаторов. В общем случае $n \in N$ и может быть задано или ограничено $n \leq n_{max}$. Для выбора позиций размещения точек доступа чаще всего применяют различные методы кластеризации [18]. При этом объектами кластеризации являются пользователи, а за позицию размещения точек доступа принимаются центры найденных кластеров.

Задача кластеризации, как правило, решается с помощью таких алгоритмов, как k -средних, DBSCAN, FOREL [19]; в работе [20] построен алгоритм с использованием фрактальных свойств сети. Каждый из этих алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки. Например, алгоритм k -средних целесообразно применять при равномерном распределении пользователей и заранее известном числе кластеров (форма кластера при росте количества объектов стремится к форме многогранника). DBSCAN уместен при выраженных скоплениях пользователей, причем плотность пользователей в зоне кластеров должна быть примерно одинаковой (кластер может иметь произвольную форму). FOREL позволяет найти решения как при выраженных скоплениях пользователей, так и при их равномерном распределении (форма кластера стремится к форме круга); алгоритм применим при выраженных скоплениях пользователей.

В данной задаче алгоритм кластеризации должен, наряду с выделением групп пользователей (кластеров), учитывать их взаимное расположение, т.к. маршрутизаторы в центрах кластеров должны образовывать связную сеть, а сама эта сеть должна быть связана с сетью подвижной связи.

Далее предлагается алгоритм, построенный на основе алгоритма кластеризации FOREL [21]. Идея данного алгоритма предпочтительна по ряду причин. Во-первых, в данном методе задается размер кластера R , который фактически является максимально возможным размером выделяемого кластера. В задаче построения сети это позволяет определить размер кластера через достижимую скорость передачи данных b на участке пользователь-точка доступа. Если определена зависимость $b = f(R)$, то:

$$R = \arg\{b_{min} = f(R)\}, \tag{1}$$

где b_{min} – минимально допустимая скорость передачи данных, задаваемая в качестве параметра при построении сети.

Функциональная зависимость $f(R)$ специфична для применяемого стандарта или группы стандартов и может быть определена на их основе, например в [22].

Для большей общности эту функцию можно аппроксимировать с помощью известного выражения К. Шеннона, с учетом корректирующего коэффициента α :

$$b(R) = \alpha w \log_2(1 + \gamma(R)), \quad (2)$$

где α – корректирующий коэффициент, учитывающий отличие используемой технологии от аналитической модели (теоретически достижимой скорости); γ – отношение сигнал/шум; w – полоса пропускания (Гц).

В общем случае $0 < \alpha < 1$. Если не применяются методы пространственно-временного уплотнения (MIMO) – $0 < \alpha < 1$. При применении таких методов коэффициент может превышать единицу.

Отношение сигнал/шум, как функция расстояния, может быть определено как:

$$\gamma(R) = \frac{S_{RX}}{p_n} = \frac{1}{p_n} a(R) S_{TX}, \quad (3)$$

где $a(R)$ – зависимость затухания сигнала от расстояния, в качестве зависимости может быть принята одна из известных моделей [23].

Зависимость скорости передачи данных от расстояния, согласно стандарту IEEE 802.11ac, при $w = 20$ МГц, приведена на рисунке 1 (синяя линия). Красная кривая получена согласно выражению (2): $w = 20$ МГц, $\alpha = 0,5$.

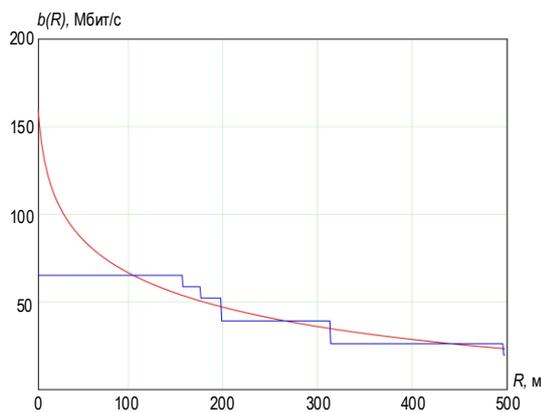


Рис. 2. Зависимость скорости передачи данных от расстояния между оборудованием пользователя и точкой доступа

Fig. 2. Data Transfer Rate Dependence on the Distance Between the User Equipment and the Access Point

Приведенный график показывает достаточно высокую близость модели (2) к зависимости, полученной по данным стандарта. Наибольшая ошибка наблюдается при малых расстояниях, т. е. при высоких значениях отношения сигнал/шум. Это мож-

но объяснить технологическими возможностями, которые учитываются в данном стандарте.

Применение выбранного подхода кластеризации решает задачу минимизации суммы расстояний между элементами и центрами кластеров. При описании системы приведенными выше выражениями целевая функция кластеризации будет выражаться как:

$$O = \max_{c_j, j=1 \dots n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} b(c_j, u_{ji}), \quad (4)$$

где $b(c_j, u_{ji}) = b(d(c_j, u_{ji}))$ – достижимая скорость передачи между центром j -го кластера и i -м элементом j -го кластера; $d(c_j, u_{ji})$ – расстояние между центром j -го кластера и i -м элементом j -го кластера.

Таким образом, применение данного метода позволяет выбрать позиции центров кластеров (позиций точек доступа) так, чтобы суммарная скорость передачи в сети была максимальна, при этом условие (1) обеспечивает минимально допустимую величину скорости передачи данных.

Решение (4) дает близкие к оптимальным позиции центров кластеров по отношению к элементам, которыми являются пользователи. Однако в данном случае необходимо учитывать положение центров кластеров относительно базовых станций сети подвижной связи и относительно друг друга.

Будем полагать, что R_c – радиус зоны связи кластера, R_m – радиус зоны связи маршрутизатора с базовой станцией сети подвижной связи. Эти параметры должны быть введены в виде ограничений в используемый алгоритм кластеризации.

Особенность данного алгоритма состоит в том, что выбор позиции центра кластера производится с учетом упомянутых ограничений, а именно:

$$\begin{aligned} \exists j \in \{1 \dots n\}, d(c_j, B) \leq R_m \\ \exists (j, i) \in \{1 \dots n\}, j \neq i, d(c_j, c_i) \leq R_c \end{aligned} \quad (5)$$

Эти ограничения фактически определяют то, что как минимум один из маршрутизаторов должен быть в зоне связи базовой станции сети подвижной связи, и каждый из маршрутизаторов должен быть в зоне связи хотя бы одного из соседних маршрутизаторов. Эти ограничения обеспечивают соединения между маршрутизаторами, расположенными на БПЛА, и с сетью подвижной связи.

Эти ограничения могут быть усилены заданием минимального количества связей между маршрутизаторами r_{\min} и с базовыми станциями сети подвижной связи M_{\min} (6).

Псевдокод предлагаемого алгоритма приведен ниже.

$$\begin{aligned} \exists J \in \{1 \dots n\}, |J| \geq M_{\min}, d(c_j \in J, B) \leq R_M \\ \exists L \in \{1 \dots n\}, |L| \geq r_{\min}, d(c_j \in L, c_i \in L) \leq R_C, j \neq i \end{aligned} \quad (6)$$

Исходные данные:

– множество объектов кластеризации (пользователей) $U = \{u_i\}$, $i = 1 \dots m$; каждому из объектов соответствует точка с заданными координатами $u_i \triangleq p(u_i) = (x_i^{(u)}, y_i^{(u)}, z_i^{(u)})$, $i = 1, \dots, m$;

– множество базовых станций сети подвижной связи $V = \{v_i\}$, $i = 1 \dots k$; каждому из объектов соответствует точка с заданными координатами $v_i \triangleq p(v_i) = (x_i^{(k)}, y_i^{(k)}, z_i^{(k)})$, $i = 1, \dots, M$;

– множество центров кластеров $C = \{c_i\}$, $i = 1, \dots, n$

Каждому из центров кластеров c_j при $j = 1, \dots, n$ соответствует точка с заданными координатами $c_i \triangleq p(c_i) = (x_i^{(c)}, y_i^{(c)}, z_i^{(c)})$, $i = 1, \dots, n$.

Алгоритм

```

U0 = {ui}, i = 1 ... m; // Множество некластеризованных объектов
C = ∅ // Множество кластеров
i=1;
//Случайная точка в зоне обслуживания
p(ci) = {randomPos(x,y,z) ∈ S, d(ci, vq) ≤ RM, d(ci, cj) ≤ RC, vq ∈ V}
C0 = {uj ∈ U0; d(ci, uj) ≤ R}; //Образовать кластер C0
While U0 ≠ ∅
{
//Вычислить центр кластера
cm = S(U, V, R)
//Если центр масс не совпадает с центром кластера и он находится на удалении не превышающим RC от центра другого кластера
if cm ≠ p(ci)
    if ∃cj ∈ C, d(cm, cj) ≤ RC
        p(ci) = cm //Перейти в центр масс
    else
        ω = ω + Δω;
else
    {
U0 = U0 \ C0 //Исключить элементы кластера из множества некластеризованных элементов
C = C ∪ cm
}
} //End while
ReDistributeNones(cond) //Опционально
    
```

Центр кластера (центр масс) вычисляется согласно выражению (7), где K – число элементов кластера; x_0, y_0, z_0 – координаты центра кластера; η_i – весовой коэффициент элемента (пользователя); $x_{c_n}, y_{c_n}, z_{c_n}$ – координаты центра ближайшего соседнего кластера, ω – весовой коэффициент.

Особенность вычисления центра кластера состоит в том, что учитывается расстояние до центра ближайшего кластера. Изменяя величину ω , можно управлять «тяготением» центра искомого кластера к ближайшему соседнему кластеру.

Приведенный выше алгоритм описывает общий трехмерный случай, когда кластер представляет собой сферу. Ввиду недостаточной наглядности представления результатов кластеризации в пространстве на рисунке 3 приведен пример кластеризации на плоскости. В данном примере моделируется кластеризация 1000 пользователей, распределенных на плоскости. Для моделирования используется точечный процесс Гиббса [24].

После выполнения приведенного выше алгоритма будут найдены центры кластеров. На этом алгоритм может быть завершен, а элементы могут быть отнесены к кластерам в том порядке, в котором выделялись кластеры в ходе выполнения алгоритма. Однако такой подход дает хорошие решения в случае наличия скоплений элементов (пользователей), причем размер этих скоплений не превышает размера кластера R . В противном случае размеры кластеров могут сильно отличаться, поэтому целесообразно по завершении алгоритма выполнить перераспределение элементов путем отнесения их к ближайшим центрам кластеров. В приведенном выше алгоритме эта операция выполняется процедурой `ReDistributeNones(y/n)`. Ее аргумент определяет требуется ли выполнение перераспределения элементов.

После операции перераспределения элементов кластеры будут иметь форму многогранников, стороны которых определяются диаграммой Вороного [25], построенной относительно найденных центров кластеров (рисунок 4).

$$S_m(C_0, V, R) = \left\{ \begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{K} \left(\sum_{i=1}^K x_i \eta_i + x_{c_n} \omega \right), y_0 = \frac{1}{K} \left(\sum_{i=1}^K y_i \eta_i + y_{c_n} \omega \right), \\ z_0 &= \frac{1}{K} \left(\sum_{i=1}^K z_i \eta_i + z_{c_n} \omega \right) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$K = |C_0|, (x_i, y_i, z_i) = p(u_i), u_i \in C_0, (x_{c_n}, y_{c_n}, z_{c_n}) = p(c_n), c_n \in C, \eta_i, \omega \geq 0.$$

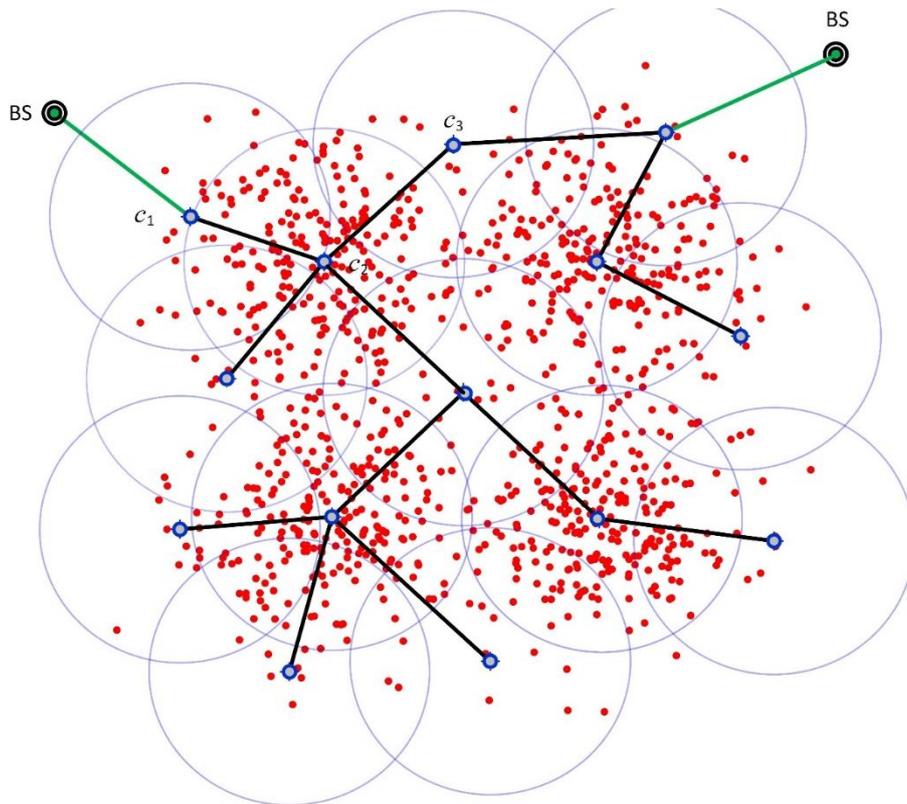


Рис. 3. Результат кластеризации и выбора структуры сети

Fig. 3. Result of Clustering and Selection of Network Structure

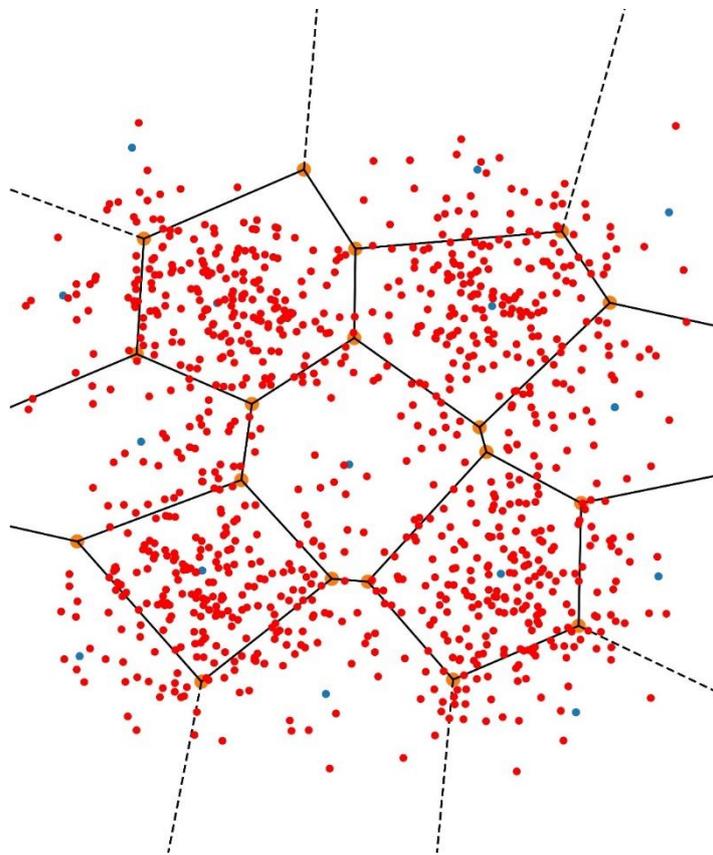


Рис. 4. Результат модификации формы кластеров

Fig. 4. Result of Cluster Shape Modification

В качестве критерия необходимости перераспределения предлагается использовать дисперсию количества элементов в кластерах, определяемую как:

$$\text{cond} = \begin{cases} \text{true} & D_{II}(K) < D_I(K) \\ \text{false} & D_{II}(K) \geq D_I(K) \end{cases} \quad (8)$$

где D_I, D_{II} – дисперсии числа элементов кластеров для алгоритма без перераспределения элементов и с их перераспределением, соответственно.

Дисперсии для обоих случаев могут быть найдены по выражению:

$$D(K) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_i - E(K))^2, \quad E(K) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (9)$$

где n – число кластеров; K_i – число элементов в i -м кластере.

Предложенный метод и алгоритм позволяют произвести кластеризацию пользователей в заданной зоне обслуживания с учетом допустимых расстояний между центрами кластеров и допустимых расстояний до базовых станций сети подвижной связи. Благодаря этим качествам данный метод позволяет построить связную mesh-сеть на основе маршрутизаторов, размещаемых в центрах кластеров, имеющую связь с базовыми станциями сети подвижной связи. Алгоритм кластеризации обеспечивает выделение кластеров по максимуму качества обслуживания.

Маршрутизация трафика

Найденные позиции маршрутизаторов (центры кластеров) объединены в mesh-сеть, структура которой может быть определена кратчайшими маршрутами между отправителем и получателем. Под кратчайшим будем понимать маршрут, обеспечивающий наибольшее качество обслуживания трафика. Качество обслуживания в этом случае характеризуется такими показателями как достижимая скорость передачи данных, задержка доставки и вероятность потери данных.

Структура mesh-сети определяется матрицей:

$$ST = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ l_{n1} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix}, \quad l_{ij} = \begin{cases} q_{ij} & l_{ij} \leq R_c \\ \infty & l_{ij} > R_c \end{cases} \quad (10)$$

$i, j = 1 \dots n,$

где q_{ij} – показатель качества линии связи между узлами сети; l_{ij} – характеристика линии связи между узлами сети.

Как показатель качества предлагается интегральный показатель, учитывающий скорость передачи данных, нагрузку и вероятность потерь:

$$q_{ij} = -\omega_1 b_{ij} + \omega_2 \rho_{ij} + \omega_3 p_{ij}, \quad (11)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – коэффициенты условной стоимости единицы соответствующего показателя.

Интегральный показатель имеет смысл условного выигрыша или расходов, в зависимости от знака. Знак слагаемого в выражении (11) положителен для показателей, рост которых ведет к увеличению условных расходов, в данном случае – к уменьшению качества обслуживания.

В таком случае использование любого метода поиска кратчайшего пути для сети, описываемой матрицей (10), позволяет выбрать маршрут, имеющий минимальное значение суммы коэффициентов для каждого из ребер, входящих в него, формально можно записать как:

$$\Omega_{st} = \arg \left(\Omega_{st} = \Omega_{st} \cup q_{ij} \mid \min_{q_{ij} \in ST} \sum_{r=1}^{L_{st}} q_{ij}, \right. \\ \left. i, j = 1, \dots, n, i \neq j \right), \quad (9)$$

где Ω_{st} – множество вершин (узлов), входящих в кратчайший путь между вершинами s и t .

Для нахождения всех кратчайших путей можно использовать, например, алгоритм Данцига [26].

Эффективность

Для оценки эффективности предложенных методов, в качестве альтернативы, выберем не модифицированный алгоритм FOREL. При его применении распределение маршрутизаторов в зоне обслуживания не гарантирует связность mesh-сети и доступность сети подвижной связи. Позиции маршрутизаторов в такой ситуации случайны и зависят от распределения пользователей, но никак не ограничены в части взаимного расположения; связность образуемой ими сети также является случайной величиной.

Если маршрутизаторы, размещенные в выбранных позициях (центрах кластеров), не образуют связной сети, то пользователи, включенные в эти маршрутизаторы, не имеют доступа к другой части сети и выхода во внешнюю сеть. Таким образом, для сравнения методов наиболее показательной характеристикой является связность сети, образованной при размещении маршрутизаторов.

Связность сети можно описать вероятностью существования маршрута между узлами, которую можно оценить долей возможных маршрутов в сети:

$$\text{con} = \frac{n_e}{(n + 1)^2}, \quad (13)$$

где n – количество кластеров (маршрутизаторов); n_e – количество доступных маршрутов.

Величина $(n + 1)^2$ – это максимально возможное количество маршрутов между всеми n узлами сети и одним узлом, описывающим базовую станцию сети подвижной связи, которое имеет место при полной связности сети.

Вероятность связности (13) в случае не модифицированного алгоритма не превышает единицы, а в случае модифицированного алгоритма она всегда равна единице. Величину $1 - \text{con}$ будем рассматривать как выигрыш, полученный при использовании предложенных методов:

$$e = 1 - \text{con}. \quad (14)$$

Эта величина зависит от радиуса зоны связи маршрутизаторов R_c и R_m , полагая, что эти величины равны $R_c = R_m$, можно оценить зависимость $e(R_c/W)$, где W – размер зоны обслуживания.

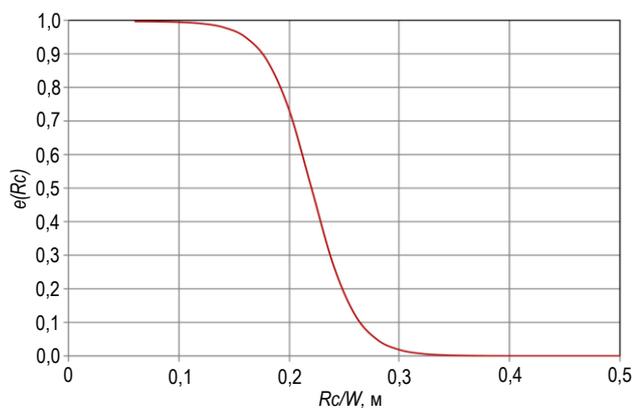


Рис. 5. Зависимость эффективности метода от радиуса зоны связи между кластерами R_c

Fig. 5. Dependence of the Efficiency of the Method on the Radius of the Communication Zone between Clusters R_c

Можно заметить, что применение метода целесообразно, когда радиус зоны связи маршрутизаторов в mesh-сети меньше размера зоны обслуживания. Это естественно, т. к. в противном случае любое расположение маршрутизатора равнозначно с точки зрения обеспечения связности.

В приведенном выше примере, при размере зоны обслуживания 500×500 м и заданном распре-

делении пользователей (размер зоны связи маршрутизатора – около 0,23 размера зоны обслуживания) эффективность предложенного метода составляет около 50 %. Эффективность тем выше, чем меньше отношения радиуса зоны связи маршрутизатора к размеру зоны обслуживания. Таким образом его применение целесообразно при необходимости обслуживания относительно больших площадей или объемов.

Выводы

Во-первых, моделирование линии связи между маршрутизатором и пользователем с помощью модели К. Шеннона с учетом технологических отличий его реализации в действующем стандарте сети беспроводного доступа позволяет решать проблему кластеризации пользователей как задачу максимизации суммарной достижимой скорости передачи данных.

Во-вторых, предложенный алгоритм кластеризации, являющийся модификацией алгоритма FOREL, обеспечивает выбор позиций маршрутизаторов для обслуживания пользователей и организации связной mesh-сети и связи этой сети с базовой станцией подвижной связи.

В-третьих, модификация алгоритма, обеспечивающая перераспределение элементов, позволяет повысить качество результата путем выравнивания их количества в выделяемых кластерах.

В-четвертых, метод маршрутизации трафика в mesh-сети обеспечивает выбор маршрутов на основе минимизации интегрального показателя качества, учитывающего достижимую скорость передачи данных, величину нагрузки и вероятность потерь.

В-пятых, предложенные методы распределения маршрутизаторов в рое БПЛА или на единичных или привязных БПЛА эффективен в случае, когда размер зоны связи маршрутизатора меньше размера зоны обслуживания.

Список источников

1. Taleb T., Benzaïd C., Lopez M.B., Mikhaylov K., Tarkoma S., Kostakos P., et al. 6G System Architecture: A Service of Services Vision // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. 2022. Vol. 3. Iss. 3.
2. Rec. ITU-T Technical Report (01/2020). Network 2030 – Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030.
3. Rec. ITU-T Deliverable (10/2019). New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis.
4. Li R. Network 2030. A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond. 2019.
5. Rec. ITU-T Technical Specification (06/2020). Network 2030 Architecture Framework.
6. Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Парамонов А.И., Владимиров С.С. и др. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5–14. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.001. EDN:CJSYLS
7. Демидов Н.А. Исследование трафика 3d-видеопотока на имитационной модели // Электросвязь. 2024. № 3. С. 44–48. DOI:10.34832/ELSV.2024.52.3.008. EDN:DNQCWX

8. Rec. ITU Focus Group Technical Specification (12/2023). Definition of metaverse.
9. Mane-Deshmukh P.V. Designing of Wireless Sensor Network to Protect Agricultural Farm from Wild Animals // *i-Manager's Journal on Information Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. PP. 30–36.
10. Shannon C.E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press, 1964.
11. Akyildiz I.F., Han C., Hu Z., Nie S., Jornet J.M. Terahertz Band Communication: An Old Problem Revisited and Research Directions for the Next Decade // *IEEE Transactions on Communications*. 2022. Vol. 70. Iss. 6. PP. 4250–4285. DOI:10.1109/TCOMM.2022.3171800
12. Petrov V., Pyattaev A., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Terahertz band communications: Applications, research challenges, and standardization activities // *Proceedings of the 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT, Lisbon, Portugal, 18–20 October 2016)*. IEEE, 2016. PP. 183–190. DOI:10.1109/ICUMT.2016.7765354
13. 120 results for "5g router" // Amazon. URL: <https://www.amazon.com/5g-router/s?k=5g+router> (Accessed 01.07.2024)
14. Дорохова А.А., Парамонов А.И. Исследование трафика и качества обслуживания в самоорганизующихся сетях на базе БПЛА // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4. № 2. С. 12–25. EDN:XDCORF
15. Варельджян К.С., Парамонов А.И., Киричек Р.В. Оптимизация траектории движения БПЛА в летающих сенсорных сетях // *Электросвязь*. 2015. № 7. С. 20–25. EDN:UAYFOL
16. Захаров М.В., Киричек Р.В., Парамонов А.И. Задача распределения ресурсов в группах БПЛА // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2015. Т. 3. № 1. С. 62–70. EDN:TUXWKP
17. Вишнеvский В.М. Методы и алгоритмы проектирования и реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 (Москва, Россия, 17–20 июня 2019 г.). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 40–42. DOI:10.25728/vspu.2019.0040. EDN:KFCQMJ
18. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
19. 2.3. Clustering // Scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html> (Accessed 01.07.2024)
20. 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. EDN:ZBNQKI
21. Загоруйко Н.Г., Ёлкина В.Н., Лбов Г.С. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей. Новосибирск: Наука, 1985. 110 с.
22. Видулов А.С., Парамонов А.И. Модель канала OFDM в задаче оценки эффективности сети IEEE 802.11 // *Инфокоммуникационные технологии*. 2018. Т. 16. № 3. С. 290–297. DOI:10.18469/ikt.2018.16.3.06. EDN:EMWAAZ
23. Рекомендация МСЭ-R P.1238-9 (06/2017). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц–100 ГГц.
24. Daley D.J., Vere-Jones D. *An Introduction to the Theory of Point Processes. Volume I: Elementary Theory and Methods*. Springer Science & Business Media, 2006. 471 p.
25. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 478 с.
26. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. Пер. с англ. М.: Мир. 1981. 323 с.

References

1. Taleb T., Benzaïd C., Lopez M.B., Mikhaylov K., Tarkoma S., Kostakos P., et al. 6G System Architecture: A Service of Services Vision. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*. 2022;3(3).
2. Rec. ITU-T Technical Report. *Network 2030 – Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030*. June 2020.
3. Rec. ITU-T Deliverable. *New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis*. October 2019.
4. Li R. *Network 2030. A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond*. 2019.
5. Rec. ITU-T Technical Specification. *Network 2030 Architecture Framework*. June 2020.
6. Volkov A.N., Muthanna A.S.A., Kucheryavy A.E., Borodin A.S., Paramonov A.I., Vladimirov S.S., et al. Perspective research of networks and services 2030 in the laboratory 6G MEGANETLAB SPBSUT. *Electrosvyaz*. 2023;6(5–14). (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.001. EDN:CJSYLS
7. Demidov N.A. Investigation of 3D video stream traffic on a simulation model. *Electrosvyaz*. 2024;3:44–48. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.52.3.008. EDN:DNQCWX
8. Rec. ITU Focus Group Technical Specification. *Definition of metaverse*. December 2023.
9. Mane-Deshmukh P.V. Designing of Wireless Sensor Network to Protect Agricultural Farm from Wild Animals. *i-Manager's Journal on Information Technology*. 2018;7(4):30–36.
10. Shannon C.E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press; 1964.
11. Akyildiz I.F., Han C., Hu Z., Nie S., Jornet J.M. Terahertz Band Communication: An Old Problem Revisited and Research Directions for the Next Decade. *IEEE Transactions on Communications*. 2022;70(6):4250–4285. DOI:10.1109/TCOMM.2022.3171800
12. Petrov V., Pyattaev A., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Terahertz band communications: Applications, research challenges, and standardization activities. *Proceedings of the 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT, 18–20 October 2016, Lisbon, Portugal*. IEEE; 2016. p.183–190. DOI:10.1109/ICUMT.2016.7765354
13. Amazon. 120 results for "5g router". URL: <https://www.amazon.com/5g-router/s?k=5g+router> [Accessed 01.07.2024]

14. Dorohova A., Paramonov A. Traffic and Quality of service research in a Flying Ad-Hoc Network. *Telecom IT*. 2016;4(2): 12–25. (in Russ.) EDN:XDCORF
15. Vareldzhian K.S., Paramonov A.I., Kirichek R.V. Optimization of the UAV's motion trajectory in flying ubiquitous sensor networks. *Electrosvyaz*. 2015;7:20–25. (in Russ.) EDN:UAYFOL
16. Zaharov M.V., Kirichek R.V., Paramonov A.I. Resource Allocation Problems in Groups UAVs. *Telecom IT*. 2015;3(1):62–70. (in Russ.) EDN:TUXWKP
17. Vishnevskiy V.M. Methods and algorithms of design and realization of tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms. *Proceedings of the XIIIth All-Russian Conference on Management Problems VSPU-2019, 17–20 June 2019, Moscow, Russia*. Moscow: Institute of Control Sciences RAS Publ.; 2019. p.40–42. (in Russ.) DOI:10.25728/vspu.2019.0040. EDN:KFCQMJ
18. *Factor, discriminant and cluster analysis*. Moscow: Finance and statistics, 1989. 215 p. (in Russ.)
19. *Scikit-learn*. 2.3. Clustering. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html> [Accessed 01.07.2024]
20. Marochkina A.V. Modeling and clustering a 3d internet of things network using the fractal dimension estimation method. *Electrosvyaz*. 2023;6:60–66. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.008. EDN:ZBNQKI
21. Zagoruiko N.G., Yolkina V.N., Lbov G.S. Algorithms for detection of empirical regularities. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. 110 p. (in Russ.)
22. Vikulov A.S., Paramonov A.I. OFDM channel model in the problem of the IEEE 802.11 network efficiency estimation. *Infocommunikacionnye Tehnologii*. 2018;16(3):290–297. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2018.16.3.06. EDN:EMWAAZ
23. Rec. ITU-R P.1238-9. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. June 2017.
24. Daley D.J., Vere-Jones D. *An Introduction to the Theory of Point Processes. Volume I: Elementary Theory and Methods*. Springer Science & Business Media; 2006. 471 p.
25. Preparato F.P., Shamos M.I. *Computational Geometry. An Introduction*. Springer-Verlag; 1985.
26. Minięka E. *Optimization Algorithms for Networks and Graphs*. Marcel Dekker; 1978. 356 p.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 09.08.2024; принята к публикации 15.08.2024.

The article was submitted 01.07.2024; approved after reviewing 09.08.2024; accepted for publication 15.08.2024.

Информация об авторах:

- | | |
|--|---|
| КУЗНЕЦОВ
Константин Алексеевич | аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 https://orcid.org/0009-0001-6167-2711 |
| 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 |
| МУТХАННА
Аммар Салех Али | 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/0000-0003-0213-8145 |
| КУЧЕРЯВЫЙ
Андрей Евгеньевич | доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 https://orcid.org/0000-0003-0213-8145 |

Кучерявый А.Е. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Koucheryavy A.E. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.