

Научная статья

УДК 004-7

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-4-75-82>

EDN:NXRCCCT



Рой роботизированных сетевых координаторов для обеспечения работы группы костюмов телеприсутствия

✉ Виктория Викторовна Дмитриева, dmitrieva.vv@sut.ru

✉ Артем Николаевич Волков, artem.nv@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. Развитие новых технологий, в частности переход от 5G/IMT2020 к сетям связи 6G/IMT-2030 подразумевает применение новых сценариев и услуг. В перспективных сетях связи шестого поколения в отличие от предыдущих поколений значительно увеличено качество и количество предоставляемых услуг пользователям. К новым технологиям можно отнести иммерсивные коммуникации, обеспечивающие эффект присутствия и расширенный интерактивный опыт. Одним из примеров пользовательского устройства для новых технологий является костюм телеприсутствия, обеспечивающий реализацию иммерсивного взаимодействия с удаленной средой. Таким образом, возникает необходимость разработки новых моделей и методов, обеспечивающих поддержку требуемого уровня качества связи в сложных динамических условиях в том числе.

Цель настоящего исследования состоит в разработке сценария поддержки качества связи при перемещении пользователей в условиях сверхплотных сетей и определение маршрута координатора-ретранслятора, выполняющего функцию мобильной базовой станции.

В работе используются **методы** нечеткой кластеризации для определения головного узла – координатора-ретранслятора, стохастические модели массового обслуживания, а также численное моделирование показателей качества обслуживания.

Результаты: получена зависимость целевой функции качества обслуживания от траектории движения координатора-ретранслятора. Определен путь перемещения мобильной базовой станции на основе муравьиного алгоритма.

Новизна заключается в разработке метода обеспечения связи в условиях сверхплотных сетей на основе использования роя роботов-ретрансляторов и определении их маршрута движения с учетом заданных требований. Предложенный подход позволяет учитывать динамику перемещения пользователей и изменяющуюся загрузку сети.

Практическая значимость данного исследования заключается в возможности применения предложенного сценария во взаимодействии с роем роботов-ретрансляторов. Данный метод позволяет обеспечить разгрузку сети в условиях высокой плотности пользователей.

Ключевые слова: телеприсутствие, муравьиный алгоритм, МСЭ, сетевые вселенные, роботизированные узлы

Ссылка для цитирования: Дмитриева В.В., Волков А.Н. Рой роботизированных сетевых координаторов для обеспечения работы группы костюмов телеприсутствия // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 4. С. 75–82. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-4-75-82. EDN:NXRCCCT

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-4-75-82>

EDN:NXRCTT

A Swarm of Robotic Network Coordinators for Enabling the Group of Telepresence Suits

 Victoria V. Dmitrieva✉, dmitrieva.vv@sut.ru Artem N. Volkov, artem.nv@sut.ru

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

Annotation

Relevance. There is a development of new technologies, in particular the transition from 5G/IMT2020 to 6G/IMT-2030 communication networks, implies the use of new scenarios and services. Sixth-generation networks have significantly increased the quality and quantity of services, such as immersive technologies, holographic type communications, etc. Thus, it is necessary to develop new models and methods that support high standards of communication quality.

The purpose of this study is to develop a scenario for maintaining communication quality in user dynamics in conditions of ultra-high dense networks and to determine the route of a repeater coordinator serving as a mobile base station.

The paper uses **methods** of fuzzy clustering of users, stochastic models of queuing, as well as numerical modeling of service quality indicators.

Results. The dependence of the target function of the quality of service on the trajectory of the repeater coordinator is obtained.

The novelty lies in the development of a method for providing communication in ultra-dense networks based on the use of a swarm of repeater robots and determining their route based on the requirements.

The practical significance lies in the possibility of using the scenario in interaction with a swarm of robots to unload the network or maintain communication quality.

Keywords: telepresence, ant algorithm, ITU, metaverse, robotic nodes

For citation: Dmitrieva V.V., Volkov A.N. A Swarm of Robotic Network Coordinators for Enabling the Group of Telepresence Suits. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026; 12(4):75–82. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-4-75-82. EDN:NXRCTT

Введение

В наши дни развитие систем телекоммуникаций продолжается, причем переход к сетям связи шестого поколения (IMT-2030) подразумевает глобальные изменения, в том числе и по видам предоставляемых услуг, и их характеристикам качества. В это же время развитие концепции сетевых вселенных открыло новые направления и возможности в области систем коммуникации [1–3]. Разработка новых методов взаимодействия в сетевых вселенных и улучшение качества связи для перспективных технологий в наши дни остается актуальной научной и инженерной задачей [4]. Новые методы взаимодействия подразумевают повышение уровня погруженности или иначе иммерсивности для пользователей через развитие таких тер-

миналов как: шлемы смешанной реальности, тактильные перчатки и костюмы телеприсутствия. Стоит отметить, что данные вопросы уже исследуются на уровне международной стандартизации, что отражено в существующих проектах рекомендаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ): проблемы совместимости платформ сетевых вселенных (метавселенных), совместимости костюмов телеприсутствия и аватаров в сетевых вселенных, роуминга аватаров и многое другое.

В вопросе взаимодействия с аватаром пользователя в сетевой вселенной с научной точки зрения преобладает интерес исследования научных проблем и задач костюма телеприсутствия, который де-факто должен предоставить все возможности тактильного интернета: передача кинестетической

информации, тепла / холода, влажности, обратной связи (от взаимодействия аватара с виртуальными объектами). Сценарий и требования тактильного интернета отражены в принятых на уровне МСЭ-Т документах и рекомендациях, определяющих видение и требования к системам IMT-2030 (6G). В частности, в рекомендации ITU-R M.2160 «IMT-2030 Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond» [5] сформулированы целевые показатели производительности, перечень ключевых сценариев применения и расширенный набор эксплуатационных характеристик сетей шестого поколения, включая аспекты взаимодействия с другими сетями. Данные документы задают ориентиры для дальнейшей стандартизации и разработки технологий, обеспечивающих новые виды сервисов, к которым относятся: иммерсивные коммуникации, телеприсутствие, голографический тип коммуникаций и другие.

В сетях шестого поколения одним из ключевых вызовов остается обеспечение требований сетей и услуг URLLC/HRLLC (*аббр. от англ. Ultra-Reliable and Low Latency Communications / Hyper-Reliable and Low-Latency Communication* – сверхнадежные и гипернадёжные сети связи с ультрамалыми задержками), особенно в местах большого скопления людей. Поэтому актуальной задачей остается поиск новых решений, способных динамически поддерживать требуемое качество связи, в условиях неравномерного развития сети (существующих разрывов). Одним из перспективных направлений развития сетевой архитектуры в данном случае является использование автономных роботов в различных сервисах. В рекомендациях МСЭ уже сформированы архитектура [6] и требования [7] к взаимодействию автономных роботов с городской инфраструктурой, пользовательскими устройствами и между собой.

В данной работе предложен вариант взаимодействия с сетевыми роботами, которые динамически размещаются в зонах повышенной плотности пользователей, выполняя функции мобильных пикосот (маломощных базовых станций). Такой подход можно применять к различным сценариям в сетях нового поколения, например, при перемещении пользователей в костюмах телеприсутствия. При таком взаимодействии сопутствующая базовая станция (рисунок 1) позволит поддерживать качество связи в соответствии с требованиями.

Таким образом, основной задачей в данной работе является поиск оптимального маршрута робота-координатора, который является мобильной базовой станцией (БС). Выбор маршрута необходимо осуществлять с учетом требований к качеству связи, снижая вероятность потерь в канале. Основной целью данной работы является разработка метода обеспечения связи между костюмами телеприсутствия в условиях динамического позиционирования координаторов-ретрансляторов.

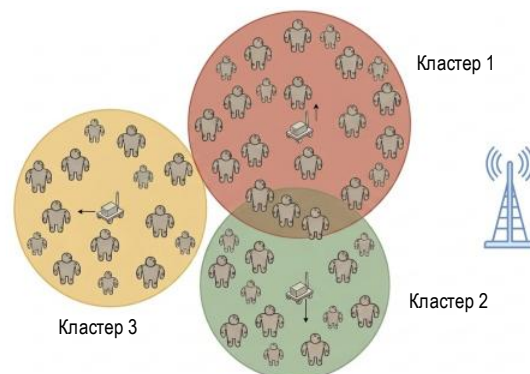


Рис. 1. Сценарий взаимодействия с ретрансляторами

Fig. 1. The Scenario of Interaction with Repeaters

Постановка задачи

Пусть сеть состоит из n узлов. БС (координатор) обслуживает конечное количество узлов и имеет некоторый радиус зоны обслуживания R . Требуется определить траекторию следования координатора по кластерам пользователей так, чтобы обеспечить показатели качества обслуживания в условиях сверхплотной сети. Для этого определим показатели качества и целевую функцию данной задачи, если K – координатор, $x_k(t)$ – позиция координатора k ; N – количество пользователей, $u_i(t)$ – позиция пользователя i ; C_k – множество пользователей, принадлежащих к кластеру k .

Целевая функция при поиске координатора (частный кластер) имеет вид:

$$\min \sum_i^N \omega_i T_i,$$

где T_i – задержка до пользователя i ; ω_i – вес соответствующего параметра при $\sum_i^N \omega_i = 1$.

В общем виде целевая функция, когда определены кластеры C_k (или иначе – группы пользователей), имеет следующий вид:

$$\Theta = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \omega_i T_{ik}(x_k) \right\}.$$

Параметр T_{ik} необходим для моделирования задержки обслуживания данных пользователя i в кластере k . Рассмотрим систему с учетом одноканальной системы массового обслуживания $M/M/1$, где пуассоновский поток пакетов от пользователя i имеет интенсивность λ_{ik} (пакетов/с), время обслуживания одного пакета экспоненциально распределено с параметром μ_{ik} .

Скорость передачи данных определяется по формуле Шеннона:

$$b_{ik}(x_k) = B * \log_2(1 + SINR_{ik}(x_{ik})),$$

где B – ширина канала (Гц); $SINR_{ik}(x_{ik})$ – показатель, определяющий соотношение уровня полезного сигнала к суммарной мощности шумов и помех.

При средней длине пакета L (бит) среднее время обслуживания одного пакета определяется по выражению:

$$T_0(x_k) = \frac{L}{b} = \frac{L}{B * \log_2(1 + SINR_{ik}(x_{ik}))}.$$

По определению для $M/M/1$ интенсивность обслуживания (μ_{ik}) – это среднее число обслуживаемых пакетов в единицу времени, то есть обратная величина ко времени обслуживания одного пакета:

$$\mu_{ik} = \frac{1}{T_0(x_k)}.$$

Тогда с учетом устойчивости $\lambda_{ik} < \mu_{ik}$ (где λ_{ik} – интенсивность входного потока) среднее время пребывания пакета в системе примет вид:

$$T_{ik}(x_k) = \frac{1}{\mu_{ik} - \lambda_{ik}} = \frac{1}{\frac{B * \log_2(1 + SINR_{ik}(x_{ik}))}{L} - \lambda_{ik}}.$$

Если позиционирование координатора влияет на задержку только через радиоканал ($SINR$), принимается во внимание два взаимосвязанных критерия: средняя задержка T_{ik} , зависящая от $SINR$ и качество канала, отражаемое самим $SINR$. Таким образом, предлагается $SINR$ считать отдельным компонентом целевой функции.

Тогда полная целевая функция оптимизации положения координатора будет выглядеть следующим образом:

$$\Theta = \min_{x_k} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \omega_1 T_{ik}(x_k) - \omega_2 SINR_{ik}(x_k),$$

где ω_1 и ω_2 – безразмерные весовые коэффициенты, которые необходимо определить.

Для оценки относительной значимости коэффициентов задержки $T_{ik}(x_k)$ и качества радиоканала $SINR_{ik}(x_k)$ воспользуемся методом анализа иерархий (МАИ) [8]. Согласно данному методу сформирована матрица попарных сравнений двух критериев:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{pmatrix},$$

в данной системе оценка 3 по шкале МАИ означает «легкое предпочтение» критерия задержки над критерием качества радиоканала. Данная оценка обоснована требованиями к натальным сетям костюма телеприсутствия. Для такой системы минимизация задержки является определяющим условием функционирования. Нормировка собственного веса матрицы дает веса 0,75 и 0,25 соответственно.

Таким образом, целевая функция примет вид:

$$\Theta = \min_{x_k} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} 0,75(T_{ik}(x_k)) - 0,25(SINR_{ik}(x_k)).$$

Минимизация функции соответствует выбору таких положений координаторов и такой конфигурации кластеров, при которых суммарная задержка минимальна, а качество радиоканала максимально.

Определение головного узла кластера

В сверхплотной сети пользователи могут находиться на границе между кластерами или между зонами обслуживания координаторов. Для такого сценария необходимо учитывать принадлежность к нескольким кластерам одновременно. Воспользуемся методом нечеткой кластеризации [9], поскольку он дает более устойчивые центры при небольших смещениях точек, что важно для последующего прогнозирования центров и динамического позиционирования БС.

Алгоритм нечетких c -средних (FCM, аббр. от англ. Fuzzy C-Mean) используется для выполнения задачи кластеризации движущихся пользователей с целью выделения групп пользователей в момент времени t . Кластеры рассматриваются как нечеткие множества и каждый пользователь может принадлежать к нескольким кластерам с разной степенью принадлежности $u_{ij} \in [0,1]$. FCM возвращает как центры кластеров, так и степени принадлежности (t) в качестве целевых точек для координаторов; при необходимости оценивать вклад пользователей в целевую функцию по степеням принадлежности (например, при вычислении средней задержки или нагрузки в кластере).

Алгоритм FCM основан на минимизации целевой функции [10]:

$$J = \sum_{i=1}^{|C|} \sum_{j=1}^N u_{i,j}^m \|x_i - c_j\|^2, 1 \leq m \leq \infty,$$

где N – число пользователей; C – число кластеров; u_{ik} – коэффициент принадлежности x_i кластеру c_j ; x_i – координаты пользователя i ; c_j – j -й кластер набора кластеров; $\|x_i - c_j\|$ – норма, характеризующаяся евклидовым расстоянием от центра кластера до пользователя:

$$\|x_i - c_j\| = \sqrt{(x_i^1 - c_j^1)^2 + (x_i^2 - c_j^2)^2}.$$

Центры кластеров, в свою очередь, определяются по следующему выражению:

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n u_{i,k}^m x_i}{\sum_{i=1}^n u_{i,k}^m}.$$

Зададим траектории пользователей с некоторой скоростью передвижения. Алгоритм определил центры кластеров исходя из заданных условий. На рисунке 2 показаны перемещения пользователей в разные моменты времени ($t_1, t_2, \dots, t_n$) и, исходя из этого, определены центры кластеров.

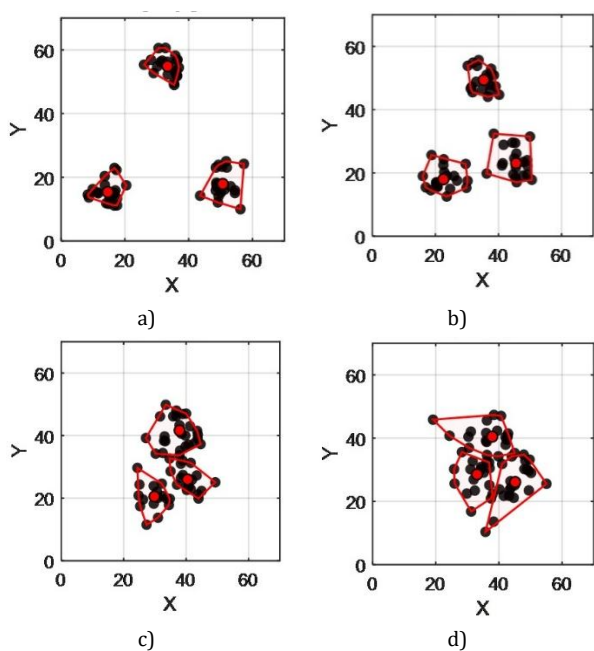


Рис. 2. Определение кластеров в разные моменты времени:
а) $t = 1$ с; б) $t = 13$ с; в) $t = 27$ с; г) $t = 40$ с

Fig. 2. Identification of Clusters at Different Points in Time:
a) $t = 1$ s; b) $t = 13$ s; c) $t = 27$ s; d) $t = 40$ s

Для определения траектории движения БС выделены кластеры пользователей с целью предоставления услуг связи. В интересах обеспечения обслуживания группы пользователей координатор должен располагаться в пределах радиуса зоны обслуживания R_j соответствующего кластера:

$$\|x_{\text{БС}} - c_j\| \leq R_j, \quad R_j = \max_{i \in C_j} \|x_i - c_j\|,$$

где $x_{\text{БС}}$ – текущее положение координатора; c_j – центр j -го кластера; C_j – множество узлов, принадлежащих кластеру j . Данное условие определяет пользователей кластера находящихся в зоне обслуживания БС.

Применение муравьиного алгоритма для определения маршрута БС

Для решения сформулированной задачи оптимизации траектории передвижения БС воспользуемся муравьиным алгоритмом (АСО, аббр. от англ. Ant Colony Optimization), поскольку он разработан специально для решения задачи поиска наиболее эффективных путей [11] и показал высокую эффективность при поиске приближенных решений в задачах маршрутной оптимизации. Данный алгоритм относится к метаэвристическим методам: создан на основе моделирования коллективного поведения муравьиной колонии при поиске кратчайших путей между домом и источниками пищи [11, 12].

В рассматриваемой задаче по определению оптимального маршрута координатора каждый «муравей» соответствует одному маршруту движения

БС через последовательность центров кластеров c_j , вычисленных алгоритмом FCM. Значение целевой функции Θ интерпретируется как мера стоимости (качества) построенного маршрута: чем меньше значение Θ , тем предпочтительнее маршрут. Таким образом, задача нахождения оптимальной траектории БС сводится к минимизации функции Θ с помощью АСО.

Вероятность выбора «муравьем» k перехода БС из положения i в положение j на итерации в момент времени t определяется правилом:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N} \tau_{il}^\alpha(t) \eta_{il}^\beta}, & j \in N_i^k, \\ 0, & j \notin N_i^k \end{cases}$$

где τ_{ij}^α – интенсивность феромона на дуге, соответствующей переходу БС из положения i в положение j ; η_{ij}^β – оценка привлекательности данного перехода; α и β – коэффициенты, задающие относительную важность феромона; N_i^k – допустимое множество положений БС из текущей точки i для муравья k

По завершении каждой итерации для всех построенных маршрутов вычисляется значение Θ . Маршруты с наименьшим значением целевой функции считаются лучшими и получают дополнительный прирост феромона.

Обновление феромона выполняется по правилу с испарением:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{N_{\text{ant}}} \Delta \tau_{ij}^k,$$

где $\rho \in (0,1)$ – коэффициент испарения феромона; $\Delta \tau_{ij}^k = \frac{1}{\Theta^k}$ – если дуга (i, j) входит в маршрут муравья, иначе $\Delta \tau_{ij}^k = 0$.

Таким образом, маршруты с минимальной задержкой и максимальным SNR накапливают феромон быстрее, что приводит последующие итерации к оптимальному решению.

Для определения передвижения с минимальными затратами и сохранением кластера сети необходимо задать допустимое множество перемещений координатора $(N(x_k, t))$.

При формировании маршрута на каждом шаге «муравей» выбирает новое положение БС из множества точек, удовлетворяющих ограничению:

$$\|x(t+1) - x(t)\| \leq v_{\text{max}}(t) \Delta t,$$

где $x(t)$, $x(t+1)$ – положения БС; Δt – длительность одного такта ($\Delta t = 1$ с); $v_{\text{max}}(t)$ – максимальная скорость перемещения БС за t , являющаяся заданным параметром и отражающая физические ограничения подвижной БС ($v_{\text{max}}(t) = 1,5$ м/с).

Выражение выше определяет множество положений в пространстве БС и задает максимальный допустимый шаг передвижений за один шаг симуляции длительностью Δt , соответствующий одной итерации алгоритма АСО: на каждом шаге обновляются положения пользователей, пересчитываются центры кластеров и определяется новое положение БС.

За один шаг БС может переместиться не дальше, чем на $v_{\max}(t)\Delta t$. Такое ограничение введено с целью приблизиться к реальным условиям. Поскольку БС имеет некоторый ограниченный радиус перемещения с учетом особенностей передвижения. Таким образом, при формировании маршрута АСО рассматривает только такие перемещения координатора, которые удовлетворяют условию выше.

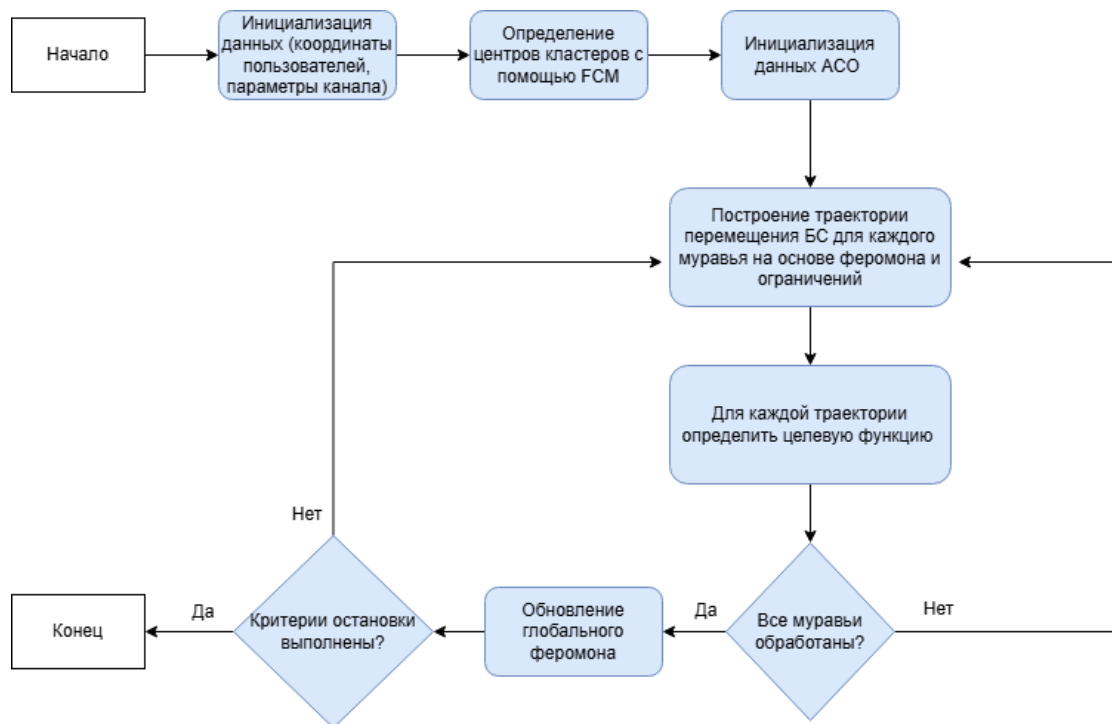


Рис. 3. Блок-схема алгоритма

Fig. 3 Block Diagram of the Algorithm

Результаты показали следующее: алгоритм способен предсказать траекторию передвижения БС на основе заданной функции оптимизации и определенного центра кластера пользователей (рисунок 4). Для удобства представлена траектория передвижения одной БС в разные моменты времени t (фиолетовый цвет траектории). При перемещении пользователей, согласно целевой функции, БС меняет траекторию по кривой.

Результаты моделирования

На рисунке 5 приведены графики динамики изменения целевой функции $\Theta(t)$, характеризующей качество обслуживания подвижных пользователей одной подвижной БС во времени. Значение Θ на каждом шаге рассчитывается по усредненным по сети показателям задержки, SINR и доли обслуживаемых пользователей при заданных параметрах. При такой целевой функции применение АСО следования БС показывает наилучшие результаты.

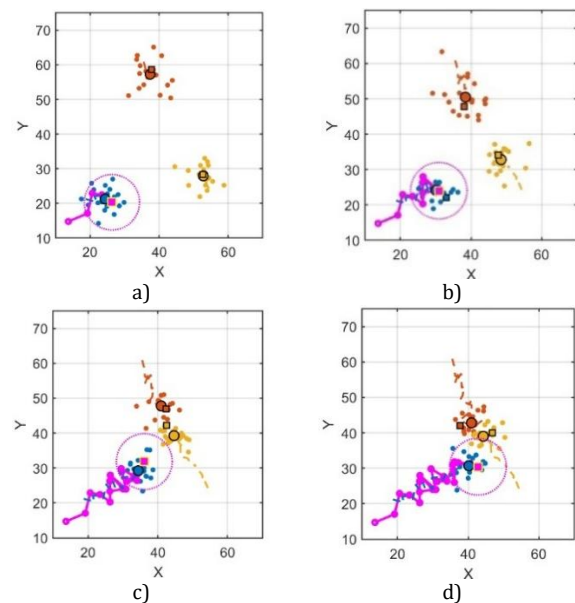


Рис. 4. Траектории передвижения БС в разные моменты времени: а) $t = 5$ с; б) $t = 10$ с; в) $t = 15$ с; г) $t = 20$ с

Fig. 4. Base Station Movement Trajectories:
a) $t = 5$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 15$ s; d) $t = 20$ s

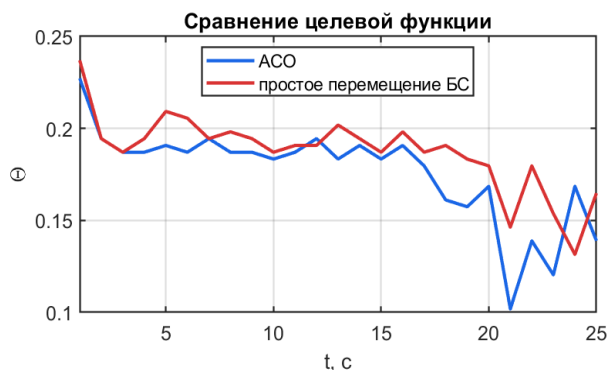


Рис. 5. Сравнение значений целевой функции

Fig. 5. Comparison of Objective Function Values

На графике 6 показана зависимость коэффициента покрытия в разные моменты времени, то есть доля пользователей, находящихся в радиусе обслуживания БС в каждый момент времени. Произведено сравнение коэффициента покрытия с простым следованием БС за пользователями.

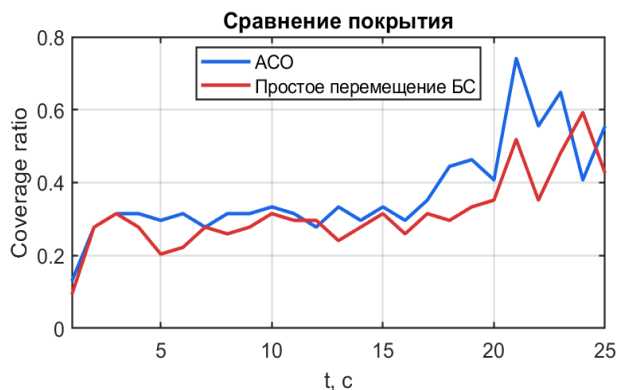


Рис. 6. Сравнение доли покрытия БС

Fig. 6. Comparison of Coverage Ratio

При заданных параметрах радиуса зоны обслуживания ретранслятора усредненное значение покрытия за полный период времени при использовании АСО составляет 37,3 %, а при следовании БС за пользователями – 31,5 % (см. рисунок 6).

Выводы

В данной работе предложен сценарий функционирования координатора-ретранслятора (подвижной БС) в условиях сверхплотной сети. С целью поддержки качества связи группы пользователей, находящихся в движении, определен маршрут следования БС. На основе алгоритма FCM сформированы соответствующие кластеры пользователей. Для задачи сопровождения определенной группы пользователей сформулирована целевая функция, учитывающая суммарную задержку и качество радиоканала, и введены ограничения по перемещению БС, отражающие ее физические особенности.

С целью поиска траектории движения координатора предложено применение муравьиного алгоритма, интерпретирующего значение целевой функции как стоимость маршрута. Показано, что выбранный алгоритм АСО обеспечивает построение траекторий, позволяющих поддерживать связь для пользователей в зоне обслуживания БС при их перемещении, а также менять маршрут при изменении конфигурации кластеров.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на возможность ввода приоритетов между кластерами. Это позволит моделировать сценарии услуг, в которых координатор периодически обслуживает кластеры разного класса важности и оптимизировать траекторию с учетом весов кластеров в целевой функции. Также возможно исследование альтернативных алгоритмов для оценки траектории движения координатора, таких как генетические алгоритмы, рой частиц, гибридных и других алгоритмов поиска оптимального пути, широко применяемых в различных сферах, в том числе в задачах планирования маршрутов [13–14]. Это позволит сравнить качество решений, скорость сходимости и выбрать наиболее эффективный подход для различных сценариев взаимодействия с другими сферами будущих поколений связи. Кроме того, актуальным направлением является размещение на БС граничных серверов многоуровневой облачной системы вычислений для обработки и разгрузки трафика.

Список источников

1. Кучерявый А.Е., Давуд А.А.А., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Парамонов А.И., Елагин В.С. и др. Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы. СПб.: Питер, 2025. 320 с.
2. Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. New York: River Publishers, 2025. DOI:10.1201/9788770046749
3. Peng H., Chen P.-C., Chen P.-H., Yang Y.-S., Hsia C.-C., Wang L.-C. 6G toward Metaverse: Technologies, Applications, and Challenges // Proceedings of the Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS, Seoul, Republic of Korea, 24–26 August 2022). IEEE, 2022. PP. 6–10. DOI:10.1109/APWCS55727.2022.9906483
4. Дмитриева В.В., Волков А.Н., Агранович О.Е. Новый метод взаимодействия с аватаром в мультивселенной на основе метода адаптивной обработки ЭМГ-сигналов // Электросвязь. 2026. № 3. С. 10–19. DOI:10.34832/ELSV.2026.77.3.002. EDN:AYUAEK
5. Rec. ITU-R M.2160-0 Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond. 2023.
6. Rec. ITU T Y.4506 Reference architecture for the interworking of autonomous urban delivery robots. 2025.
7. Rec. ITU T Y.4607 Requirements for the interworking of autonomous urban delivery robots. 2024.
8. Каргвелишвили В.М., Лебедюк Э.А. Метод анализа иерархий: критерии и практика // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. 2013. № 6(60). С. 97–112. EDN:QCRDPL

9. Нейский И.М. Классификация и сравнение методов кластеризации. 2006. URL: http://it-claim.ru/Persons/Neyskiy/Article2_Neiskiy.pdf (дата обращения 03.08.2026)
10. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm // *Computers & Geosciences*. 1984. Vol. 10. Iss. 2-3. PP. 191–203. DOI:10.1016/0098-3004(84)90020-7
11. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. 2003. Т. 4. № 4. С. 70–75.
12. Зорькин Д.Ю., Самофалова Л.В., Асанова Н.В. Муравьиный алгоритм на Python // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2025. № 1(243). С. 81–91. DOI:10.18522/2311-3103-2025-1-81-91. EDN:LTCPLQ
13. Адонин Л.С., Владыко А.Г. Алгоритмы роевого интеллекта для решения задач оптимизации в системах телекоммуникаций // *Труды учебных заведений связи*. 2025. Т. 11. № 3. С. 7–24. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-3-7-24. EDN:JUAAMB
14. Mineeva V., Ateya A.A., Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A., Chellou S.A., et al. A novel feature-oriented quality of anything (QoX) framework for end-to-end robotic services in 6G networks // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Iss. 1. P. 24945. DOI:10.1038/s41598-025-09677-6. EDN:SCBCCR

References

1. Kucheryavy A.E., Davud A.A.A., Volkov A.N., Muthanna A.S.A., Paramonov A.I., Elagin V.S., et al. *Sixth-Generation Communication Networks: Fractal Architectures, Holographic Interactions, Telepresence, Network Robots*. St. Petersburg: Piter Publ.; 2025. 320 p. (in Russ.)
2. Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. *Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks*. New York: River Publishers; 2025. DOI:10.1201/9788770046749
3. Peng H., Chen P.-C., Chen P.-H., Yang Y.-S., Hsia C.-C., Wang L.-C. 6G toward Metaverse: Technologies, Applications, and Challenges. *Proceedings of the Asia Pacific Wireless Communications Symposium, APWCS, 24–26 August 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.6–10. DOI:10.1109/APWCS55727.2022.9906483
4. Dmitrieva V.V., Volkov A.N., Agranovich O.E. A new method of interaction with an avatar in the multiverse based on the method of adaptive EMG signal processing. *Elektrosvyaz*. 2026;3:10–19. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2026.77.3.002. EDN:AYUAEK
5. Rec. ITU-R M.2160-0 *Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond*. 2023.
6. Rec. ITU-T Y.4506 *Reference architecture for the interworking of autonomous urban delivery robots*. 2025.
7. Rec. ITU-T Y.4607 *Requirements for the interworking of autonomous urban delivery robots*. 2024.
8. Kartvelishvili V.M., Lebedyuk E.A. Analytic hierarchy process: criteria and practice. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2013;6(60):97–112. (in Russ.) EDN:QCRDPL
9. Neisky I.M. *Classification and comparison of clustering methods. Intelligent Technologies and Systems*. 2006. (in Russ.) URL: http://it-claim.ru/Persons/Neyskiy/Article2_Neiskiy.pdf (Accessed 03.08.2026)
10. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers & Geosciences*. 1984;10(2-3): 191–203. DOI:10.1016/0098-3004(84)90020-7
11. Shtovba S.D. Ant colony algorithms. *Exponenta Pro. Mathematics in Applications*. 2003;4(4):70–75. (in Russ.)
12. Zorkin D.Yu., Samofalova L.V., Asanova N.V. Python Ant Algorithm. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2025;1(243): 81–91. (in Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2025-1-81-91. EDN:LTCPLQ
13. Adonin L.S., Vladiko A.G. Swarm Intelligence Algorithms for Solving Optimization Problems in Telecommunication Systems. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(3):7–24. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-3-7-24. EDN:JUAAMB
14. Mineeva V., Ateya A.A., Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A., Chellou S.A., et al. A novel feature-oriented quality of anything (QoX) framework for end-to-end robotic services in 6G networks. *Scientific Reports*. 2025;15(1):24945. DOI:10.1038/s41598-025-09677-6. EDN:SCBCCR

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 09.06.2026; принята к публикации 10.06.2026

The article was submitted 30.04.2026; approved after reviewing 09.06.2026; accepted for publication 10.06.2026

Информация об авторах:

ДМИТРИЕВА Виктория Викторовна	старший преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  https://orcid.org/0000-0001-5608-5961
ВОЛКОВ Артем Николаевич	доктор технических наук, доцент, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  https://orcid.org/0009-0002-4296-1822

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.