

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-14-23



## Численный анализ математической модели кластерной V2X-системы

Павел Владимирович Плотников✉, plotnikov.pv@sut.ru

Андрей Геннадьевич Владыко, vladyko@sut.ru

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

**Аннотация:** В статье проводится анализ результатов численного моделирования информационных процессов в автомобильных самоорганизующихся сетях (VANETs). Приведен обзор работ, посвященных кластеризации и кэшированию данных при работе с Vehicle-to-Everything (V2X) системами. В качестве метрики выбрана  $L_1$ -метрика из-за ее активного использования в городах с современной застройкой. Рассмотрены два подхода к описанию и оценке эффективности взаимодействия граничных устройств в традиционной конфигурации и с использованием кластерной схемы с общим кэшем. Построена математическая модель и проведен анализ ее эффективности. Показано, что внедрение новых стандартов IEEE 802.11bd позволит увеличить долю обслуженных устройств, тем самым будет сокращена общая задержка вычислений, что позволит повысить эффективность работы V2X-системы. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и развертывании автоматизированных систем управления дорожным движением в городах.

**Ключевые слова:** VANET, кластеризация, V2X-системы, численное моделирование

**Ссылка для цитирования:** Плотников П.В., Владыко А.Г. Численный анализ математической модели кластерной V2X-системы // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 14–23. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-14-23

## Numerical Analysis of the Mathematical Model of a Cluster V2X-System

Павел Плотников✉, plotnikov.pv@sut.ru

Андрей Владыко, vladyko@sut.ru

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

**Abstract:** The article analyzes the results of numerical modeling of information processes in vehicular ad-hoc networks (VANETs). The review of works devoted to clustering and data caching schemes in Vehicle-to-Everything (V2X) systems is given.  $L_1$ -metric was chosen as a metric because of its active use in cities with modern layout. Two approaches to the description and evaluation of the efficiency of interaction of boundary devices in a traditional configuration and using a cluster scheme with a shared cache are considered. A mathematical model is constructed and an analysis of its effectiveness is carried out. It is shown that the introduction of new IEEE 802.11bd standards will increase the percentage of serviced devices, thereby minimize the overall delay of computing, which will improve the efficiency of the V2X-system. The results of the study can be used in the design and deployment of automated traffic control systems in cities.

**Keywords:** VANET, clustering techniques, V2X-systems, numerical simulation

**For citation:** Plotnikov P., Vladyko A. Numerical Analysis of the Mathematical Model of a Cluster V2X-System. *Proc. of Telecom. Universities.* 2023;9(1):14–23 (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-14-23

## Введение

Экспоненциальный рост мобильного трафика данных, в особенности мобильного видеопотока, оказывается достаточно серьезной проблемой при оптимизации взаимодействия внутри вычислительных динамических систем при граничных вычислениях. Компанией Cisco [1] было проведено исследование, по результатам которого сделан вывод, что каждый год глобальный мобильный трафик в среднем возрастает практически в 2 раза. При этом нет никаких причин полагать, что в дальнейшем рост не будет ускоряться. Стоит отметить, что с ростом числа компьютерных вычислений и увеличением объемов обрабатываемой информации возникает необходимость в осуществлении параллельных вычислений как с использованием новых алгоритмов, так и за счет расширения технических возможностей каналов связи. Не менее важным аспектом рассматриваемой проблемы является значительный рост потребления энергии при функционировании рассматриваемых систем. Рост скорости взаимодействия при минимизации задержек оказывает на это потребление значительное влияние. В этой связи требуется разрабатывать новый методический подход к анализу задержек вычислений с учетом энергетических затрат и возможностей модификации и модернизации каналов связи.

Одним из возможных подходов к решению рассматриваемой проблемы является использование облачных вычислений в мобильных коммуникационных средах. При этом часть расчетов переносится с физического устройства на некоторый удаленный сервер, что позволяет повысить скорость вычислений и снизить удельное энергопотребление. Несмотря на то, что в силу развития технологий появляются новые модернизированные стандарты сетей связи, существенную задержку вычислений необходимо учитывать и, по возможности, уменьшать. С этой целью были разработаны и успешно внедрены мобильные граничные вычислители (MEC, *аббр. от англ. Mobile Edge Computing*) [2].

Развитие MEC позволило разработать новый подход к анализу и оптимизации интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [3–5]. В работе авторов [6, с. 7] отмечается: “Внедряя автомобильные граничные вычисления (VEC, *аббр. от англ. Vehicular Edge Computing*) в автотранспортные самоорганизующиеся сети (VANETs, *аббр. от англ. Vehicular Ad-hoc Networks*), поставщики услуг могут обеспечить сервисы со сверхмалыми задержками, поскольку инструменты граничных вычислений разворачивают ресурсы на стороне, близкой к пользовательскому оборудованию”. Взаимодействие внутри VANET между автомобилями (V2V,

*аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle*) может осуществляться для обмена данными о скорости и маршруте, а между автомобилями и граничными вычислителями или, например, элементами инфраструктуры (V2X, *аббр. от англ. Vehicle-to-Everything*) с целью разгрузки локальных вычислительных мощностей, а также управления светофорами или парковочными автоматами [7].

Необходимость в развитии V2X-систем определяется относительно небольшими вычислительными мощностями бортовых устройств транспортных средств (OBU, *аббр. от англ. On-Board Unit*). Для повышения эффективности взаимодействия и минимизации информационных потерь при взаимодействии OBU и MEC на практике используют придорожные вычислительные устройства (RSU, *аббр. от англ. Road-Side Unit*) с целью осуществления более стабильного взаимодействия. Сгенерированная задача на транспортном средстве (ТС) выгружается на RSU и в дальнейшем либо решается на нем, либо передается на ближайший MEC-сервер.

Сложность рассматриваемой задачи определяется ее динамическим характером, а также слабой предсказуемостью пространственной конфигурации системы даже на среднесрочных интервалах упреждения. Поэтому априорно неясно: каким образом и в каком порядке следует разгружать вычислительные задачи. Дополнительным ограничением является то, что MEC-серверы могут работать на границе сети радиодоступа, что затрудняет их использование. Дополнительным узким местом остается соединение и кэширование на уровне граничных устройств OBU – RSU [8].

Стоит отметить, что описанное взаимодействие вызывает дополнительные расходы в виде увеличенного энергопотребления. Задержка вычислений возникает при обработке и передаче контента при взаимодействии MEC-сервера, RSU и ТС. Повышенная интенсивность транспортного потока может вызвать следующий эффект: сеть может столкнуться с перегрузкой. Для снижения нагрузки на сеть применяют два основных подхода: (1) повышение неоднородности сети с учетом текущего трафика; (2) оптимизация граничных вычислений с использованием кэширования и кластеризации.

В данной работе предлагается новый подход к организации взаимодействия элементов системы ТС – RSU. Строится математическая модель и приводится алгоритм ее численного моделирования, производится сравнение с известной моделью [6]. Оценка эффективности производится путем вычисления доли необработанных запросов, сформированных ТС, обусловленной их мобильностью, средних энергопотребления и величины задержки передачи, и обработки сформированных запросов в

системе TC – RSU. Проведено сравнение традиционной и кластеризованной моделей. Результаты показывают, что каждая из предложенных моделей может быть эффективно реализована в мобильных узлах и позволит значительно сократить общее ожидаемое время обработки задач по совершенствованию организации и алгоритмического обеспечения функционирования V2X за счет объединения RSU в кластеры с общим кэшем.

### Обзор литературы

В последнее время было выполнено достаточно много работ, посвященных анализу подходов к минимизации потребления энергии при ограничениях, накладываемых на величину задержки в рассматриваемых системах. В работах [9, 10] предложен новый подход к оптимальному распределению ресурсов в сети, основывающийся на использовании выпуклой оптимизации с целью минимизации взвешенного суммарного потребления вычислительной энергии при ограничениях на задержки вычислений.

Группой авторов в работе [11] предложен алгоритм разгрузки распределенных вычислений на основе построения модели, базирующийся на равновесии Нэша, а также проведен сравнительный анализ эффективности алгоритма с известными подходами к оптимизации по двум параметрам: потребленная энергия и время обработки. Численные результаты подтверждают, что предложенный алгоритм может обеспечить отличную производительность при разгрузке вычислений и хорошее масштабирование по мере увеличения числа пользователей. При этом предложенная модель не позволяет проводить анализ систем с мобильными пользователями, которые могут динамически менять свое положение в течение периода разгрузки вычислений.

В последние годы было проведено множество исследований, посвященных анализу подходов к кэшированию данных в мобильных сетях. Классическая схема кэширования с учетом популярности (PBCS, аббр. от англ. Popularity-Based Caching Scheme), подробно изученная в [12–15], впервые применялась в однородных системах, к которым можно отнести сотовую сеть, социальные беспроводные сети VANETs. В этих схемах RSU не взаимодействуют между собой и всегда заполняют свободное пространство в памяти наиболее популярным содержимым. Если OBU не может получить желаемый контент из локальной RSU, то запрос перенаправляется на MEC-сервер.

В работе [16] рассматривается многопоточная схема кэширования, так называемая сеть малой сотовой связи (от англ. Small Cell Network), которая поддерживает многоадресное формирование и рассылку запросов в рамках архитектуры сети. В этой схеме базовые станции макроэлементов (MBS, аббр.

от англ. Macro-Cell Base Station) и базовые станции малых элементов (SBS, аббр. от англ. Small Cell Base Station) собирают запросы с OBU в течение определенного периода сбора данных, при этом на SBS обрабатываются только те запросы, ответы на которые хранятся в кэш-памяти устройства, остальные – переадресуются на MBS. С базовых станций макроэлементов осуществляется формирование, обработка и взаимодействие с MEC-сервером. Эта схема с поддержкой многоадресной рассылки уменьшает время взаимодействия по доставке ресурсов при высокой задержке во взаимодействии с MEC-сервером. Дальнейшие исследования должны быть посвящены оптимизации процесса взаимодействия с удаленным сервером.

Схема кэширования под названием Фемтокэшинг (от англ. Femtocaching) предложена в работе [17]. Предполагается, что схема расположения RSU устроена так, что зоны покрытия базовых станций пересекаются. В этом случае OBU может быть обслужено любым из RSU, в зоне покрытия которого оно находится. Так, в случае отсутствия запрашиваемой информации, запрос от OBU будет перенаправлен на другой ближайший RSU. Данный подход позволяет предположить, что схема кластерного подхода к разделению RSU на группы может привести к получению оптимального решения по минимизации задержек при взаимодействии в системе OBU-RSU, максимальному проценту обслуженных устройств в сети, а также оптимальному расходованию энергии.

Подробный обзор применения кластерного подхода к решению задач в сетях VANETs приведен в более ранней публикации авторов [6, с. 10].

### Постановка задачи

Пусть модель города задана в прямоугольной метрике ( $L_1$ -метрика, манхэттенская модель мобильности). Расстояние между двумя точками на плоскости с координатами  $A(x_1, y_1)$  и  $B(x_2, y_2)$  в данной модели вычисляется по формуле:

$$d(A, B) = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|.$$

Порядок использования данной модели рассматривался в работе авторов. Подробное описание модели приведено в [6, с. 7-8]. Здесь позволим себе привести лишь краткое описание обозначений и объектов изучения в форме таблицы 1.

Система городских автомобильных дорог образует сетку с горизонтальными и вертикальными элементами, при этом на каждой улице организовано двустороннее движение. OBU транспортных средств генерируют индивидуальный маршрут для перемещения от точки старта до определенной заранее точки прибытия. Элементы RSU расположены в середине каждого квартала между двумя соседними перекрестками.

ТАБЛИЦА 1. Некоторые обозначения

TABLE 1. Some designations

Модель	Символьное обозначение
Набор транспортных средств (шт.)	$V$
Набор RSU (шт.)	$S$
Максимальный объем кэш памяти $s$ -ого RSU (байт)	$Z_s$
Диаметр зоны покрытия $s$ -ого RSU (м.)	$L_s$
Скорость ТС на участке дороги (м/с)	$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$
Блок данных для обмена в системе OBU-RSU	$M = \{1, 2, \dots, m\}$
Максимальный объем отдельного элемента блока данных (байт)	$C$
Скорость обмена данными в системе OBU-RSU (байт/с)	$\alpha_s$

Будем полагать, что скорость  $u$  ТС в каждой зоне покрытия RSU будет генерироваться случайно со средним значением  $\mu$  и дисперсией  $\sigma^2$ . Функция плотности распределения случайной величины  $u$  задается формулой [18]:

$$\varphi(u) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\operatorname{erf}\left(\frac{u_{\max}-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{u_{\min}-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)},$$

где  $\operatorname{erf}()$  – функция Лапласа.

Для проведения численного моделирования будем предполагать, что каждая  $i$ -я ячейка кортежа  $M$  может быть запрошена ТС с вероятностью, заданной по закону Зепфа (Zipf Distribution), вычисляемой по формуле [19]:

$$p(i) = \frac{i^{-A}}{\sum_{k=1}^m k^{-A}}, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент асимметрии распределения и соответствует степени загрузки системы ТС.

Среднее значение объема запроса (в байтах), который необходимо обработать системе МЕС – RSU – OBU можно вычислить как математическое ожидание сформированной случайно величины:

$$D(i) = \sum_{k=1}^m C \cdot p(i), \quad (2)$$

где  $C$  – объем отдельного элемента блока данных.

«Отметим, что, так как местоположение и количество ТС в рассматриваемой модели динамически меняются во времени, с некоторой периодичностью необходимо обновлять данные в RSU, запрашивая их с МЕС-сервера. Пусть время обработки запроса от конкретного ТС по блоку данных  $i$  составляет  $t_i^{(0)}$ , если данные по этой ячейке памяти актуальны и  $t_i^{(0)} + t_i^{(1)}$ , где  $t_i^{(1)}$  – время, требующееся на

обновление устаревших данных, если эти данные неактуальны и требуется их актуализация» [6, с. 8].

Будем считать, что RSU может обслуживать ТС последовательно, при этом каждое устройство дорожной инфраструктуры может одновременно обрабатывать до 2 запросов от ТС. Для поддержки приложений V2X в 2010 году IEEE разработала стандарт IEEE 802.11р. Однако системы, основанные на этом стандарте, не удовлетворяют требованиям к очень низкой задержке передачи данных, предъявляемым современными приложениями V2X. Новый стандарт IEEE 802.11bd имеет важное преимущество в виде технологии соединения каналов, которая позволяет передавать данные по двум смежным каналам одновременно. Это увеличивает скорость передачи данных и может снизить задержки и величину потери пакетов. В работе [20] проведена оценка эффективности вышеупомянутых стандартов из семейства IEEE 802.11, учитывающих задержки передачи данных и величину потери пакетов.

При этом если OBU покидает область покрытия RSU, то взаимодействие прекращается, ТС после этого может подключиться к следующему RSU в случае, если оно свободно. Можно считать, что RSU по окончании работы с каким-либо ТС может начать обслуживание следующего ТС мгновенно, то есть за нулевое время, без задержек. Переключение RSU на новое ТС обнуляет кэш, т. е. блоки данных, которые не были полностью обработаны в ходе информационного взаимодействия с предыдущим ТС, удаляются.

Таким образом, если считать скорость ТС на участке дороги, обслуживаемом RSU  $s$  равной  $u$  м/с, а зона покрытия этого участка имеет длину  $L_s$  метров, то максимальное число запросов, которые может обработать RSU от конкретного ТС, вычисляется по формуле [6, с. 8]:

$$k = \left\lfloor \frac{L_s}{u \cdot \alpha_s} \right\rfloor.$$

Введем функцию потерь при обработке RSU запросов ТС. Пусть ТС под номером  $i$  сформировало запрос  $D(i)$ , тогда потери при взаимодействии на участке длины  $L_s$  составят:

$$V(i) = \begin{cases} D(i) - C \cdot k, & C \cdot k < D(i) \\ 0, & C \cdot k \geq D(i) \end{cases}.$$

При этом, если часть запрашиваемой информации требует обновления, общее время взаимодействия будет ограничено сверху:

$$\sum_{i=1}^k (t_i^{(0)} + \gamma \cdot t_i^{(1)}) \leq \frac{L_s}{u},$$

где  $\gamma = 1$ , если данные устарели, и  $\gamma = 0$ , если данные не требуют актуализации, для каждой пары ТС – RSU.

### Анализ энергетических затрат

Важным аспектом решения рассматриваемой задачи является величина энергетических затрат на обслуживание функционирования системы OBU – RSU. Стоит предположить, что с появлением кластеров может значительно возрасти число параллельных запросов между локальными граничными устройствами. Это обусловлено ростом числа вычислительных задач, решаемых на RSU. К обмену данными в системе OBU – RSU, а также взаимодействию в RSU – MEC добавятся взаимодействия внутри кластера, которому принадлежит RSU. При этом стоит ожидать увеличения количества вычислений и роста величины энергетических затрат на функционирование инфокоммуникационной сети.

Будем, как и ранее, считать, что каждое OBU имеет  $M$  независимых вычислительных задач, которые необходимо выполнить. Для решения каждой  $j$ -й задачи  $i$ -й парой OBU – RSU будем рассматривать кортеж  $\{D_{ij}, c_{ij}, time_{ij}\}$ , где  $D_{ij}$  – вычисляется по формуле (2),  $c_{ij}$  – общее число циклов работы процессора, необходимое для решения конкретной  $j$ -й задачи,  $time_{ij}$  – допустимый срок выполнения  $j$ -й задачи на  $i$ -й паре OBU – RSU.

Можно выделить три типа выполнения вычислительных задач: локальное, кластерное и удаленное. В каждом из этих случаев энергетические затраты будут разными.

Рассмотрим локальное выполнение задачи. В этом случае все взаимодействия происходят непосредственно в паре OBU – RSU, т. е. все необходимые данные уже находятся в кэше RSU.

Потребляемая энергия может быть вычислена по формуле:

$$E_{ij}^L = \eta_i \cdot c_{ij},$$

где  $\eta_i$  – коэффициент, который обозначает энергию, потребляемую за один цикл работы процессора, и зависит от архитектуры вычислительной системы RSU.

Принимаем  $\eta_i = 10^{-11}(f_i)^2$ , где  $f_i$  – количество циклов работы процессора в секунду. В работе [21] приведены сведения о связи частоты процессора с числом выполняемых циклов за единицу энергетических затрат, величина  $f_i$  носит название Computing Frequency.

Отдельно рассматривается кластерное и удаленное решение вычислительных задач. Как результат, получены следующие формулы:

1) если рассматривать взаимодействие в системе OBU – RSU без кластерного разбиения, то общие затраты энергии для решения каждой  $j$ -й задачи  $i$ -й парой вычисляется по формуле:

$$E_{ij}^{nC} = \eta_i \cdot c_{ij} + (p_i^A \cdot T_{ij}^{down} + p_i^D \cdot T_{ij}^{offc}) \cdot \delta_{ij},$$

где  $p_i^A$  – мощность приема вычислительного устройства RSU;  $T_{ij}^{down}$  – время приема RSU;  $p_i^D$  – мощность передачи MEC;  $T_{ij}^{offc}$  – время передачи MEC;  $\delta_{ij}$  – число, принимающее значение «1», если запрашиваемые данные хранятся в кэше RSU, и «0», если данные требуют обновления или отсутствуют;

2) если рассматривать взаимодействие в системе OBU – RSU с использованием разбиения RSU на кластеры с  $n$  элементами в каждом, с целью минимизации потерь данных при обслуживании OBU, то общие затраты энергии для решения каждой  $j$ -й задачи  $i$ -й парой вычисляются по формуле:

$$E_{ij}^C = \eta_i \cdot c_{ij} + nE_0 + (p_i^A \cdot T_{ij}^{down} + p_i^D \cdot T_{ij}^{offc}) \cdot \delta_{ij},$$

где  $E_0$  – энергетические затраты, расходуемые на осуществление одного запроса о наличии данных внутри кластера.

Общие расходы ресурсов на выполнение каждой  $j$ -й вычислительной задачи  $i$ -й парой OBU – RSU в терминах потребления энергии могут быть определены так:

$$E = \sum_{i,j} ((1 - \beta) E_{ij}^{nC} + \beta E_{ij}^C),$$

где  $\beta = 0$ , если выбрана бескластерная модель и  $\beta = 1$ , если используется кластеризация.


В силу того, что в работе [6], было показано, что с укрупнением кластеров, т. е. уменьшением их количества, процент обслуженных OBU растет, введем понятие средних затрат энергии на кластер  $E/n$ , где  $n$  – число элементов кластера, или величина, характеризующая среднюю расходуемую энергию, приходящуюся на кластер.

Объединяя результаты анализа задачи оптимизации, сформулируем экстремальную задачу следующим образом:

$$\begin{cases} \min \frac{E}{n} \\ \min \frac{\sum_i V(i)}{\sum_i D(i)} \\ D(i) \leq \frac{L_s}{u_i} \cdot \alpha_s \end{cases}$$

В данной статье вопросы энергетики затрагиваются только в постановочной форме. Более детальный анализ этого аспекта, авторы планируют провести в последующих публикациях.

### Общее описание модели

Опишем динамическую систему городского движения. Будем полагать, что планировочная схема улично-дорожной сети является прямоугольной (рисунок 1). Зона покрытия каждой RSU – квартал между двумя соседними перекрестками (на рисунке для RSU использовано обозначение .

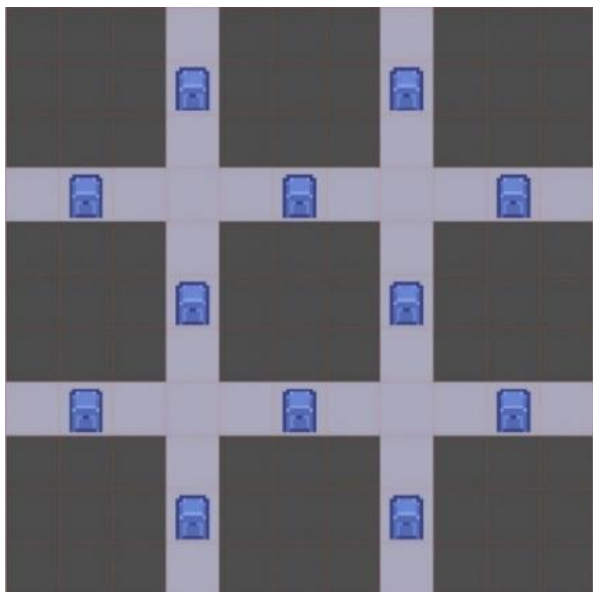


Рис. 1. Модель городской сети

Fig. 1. Scheme of Road Network

В ходе моделирования генерируется случайный поток ТС. Система RSU обслуживает запросы, поступающие от элементов динамической системы в порядке очереди поступления запросов. В случае, если запрос ТС к RSU не был обработан: ТС покинуло зону покрытия прервав взаимодействие, контакт между ТС и RSU так и не был настроен, то данный запрос будет считаться потерей данных при обслуживании. При этом будем считать, что ранее намеченный OBU ТС маршрут остается неизменным, и осуществляется попытка подключения к следующему RSU на пути следования. После нахождения свободного RSU ТС начинает взаимодействие с ним.

Некоторые дополнительные упрощения, позволяющие построить работоспособную модель, детально описаны в [6, с. 8–9], поэтому мы не будем здесь на них останавливаться. В качестве оценки эффективности работы системы будем вычислять процент необработанных запросов, сформированных на начальном этапе при одноканальном и двухканальном подключении ТС к RSU. В качестве дополнительной характеристики для анализа результатов можно подсчитывать среднюю величину энергозатрат на выполнение одного запроса.

Как в работе [6], приведем некоторые дополнительные допущения. Во-первых, не ставится задача нахождения оптимального расположения RSU. Во-вторых, скорость ТС не зависит от скорости движения потока. В-третьих, ТС не перестраивает свой маршрут, опираясь на информацию, полученную от RSU.

Важным и принципиальным отличием от результатов, полученных в работе [6], можно считать, что:



1) каждое ТС формирует запрос случайно по формуле (1);

2) моделирование проводится в увеличенной области со значительно большим числом обслуживаемых ТС;

3) количество блоков информации, которое запрашивает каждое ТС, принимает значение из большего диапазона;

4) RSU может одновременно взаимодействовать с двумя OBU.

### Результаты численного моделирования

Численное моделирование проводилось с использованием авторской программы [22], реализованной на языках программирования Python и GDScript по средствам кроссплатформенного механизма Godot Engine. Возможный вариант дорожной сети представлен на рисунке 2. Каждое ТС начинает свой маршрут с ячейки, обозначенной на рисунке знаком , такое положение позволяет наглядно отследить движение ТС и изменение количества отправляемых запросов. При моделировании на большей области число стартовых позиций задается случайно в диапазоне от 1 до 10. RSU обозначены на схеме синими блоками (см. рисунке 1 – ). Конечная точка маршрута каждого ТС генерируется отдельно и расположена на границе, приведенной на рисунке 2, области.

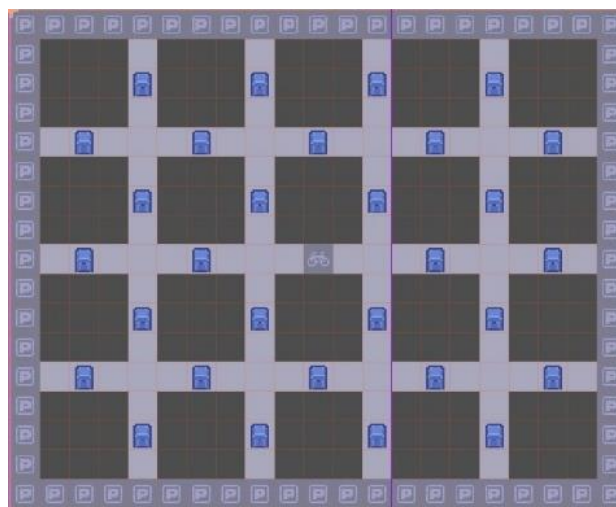


Рис. 2. Моделируемая дорожная сеть

Fig. 2. Model of Road Network

Для проведения численных расчетов примем:

$$V = 800, m = 20, L_s = 200, k_1^{vi} = 1, k_2^{vi} = 12, \\ t_i^{(0)} = 0,1 c, t_i^{(1)} = 1 c, F = 3, T = 10 c.$$

Для получения более точной оценки процента необработанных запросов проведем моделирование 10 раз и найдем среднее значение процента необработанных запросов. Результаты численного моделирования показывают, что при генерировании потока ТС 11 и более раз, процент необработанных запросов, поступающих от ТС, меняется не-

значительно. Десяти итераций достаточно, для получения необходимой точности при оценке эффективности рассматриваемого подхода.

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 3.

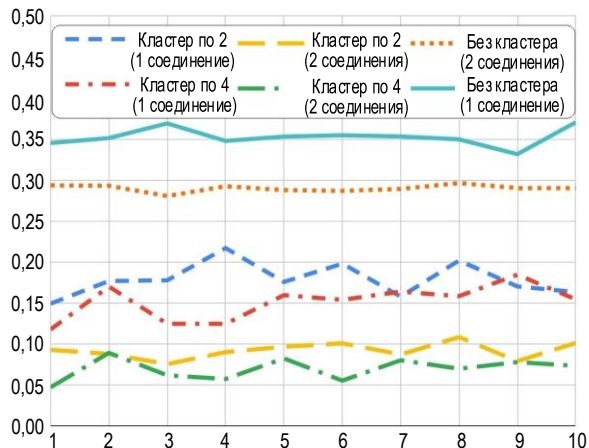


Рис. 3. Средний процент потерь на 10 итерациях  
Fig. 3. Average Percentage of Losses on 10 Iterations

На рисунке 3 приведены результаты подсчета среднего числа необработанных запросов при обслуживании ТС: без разбиения граничных устройств на кластеры, с делением на кластеры по 2 и 4 элемента RSU в каждом, в двух вариантах взаимодействия. По горизонтальной оси указан порядковый номер итерации численного моделирования с  $V = 800$  ТС, по вертикальной – процент необработанных запросов при взаимодействии в системе ТС – RSU. Как видно из представленных графиков, объединение RSU в кластеры позволяет получить значительный выигрыш в величине процента успешно обработанных запросов. Этот результат подтверждает выводы, сделанные авторами в [6]. При этом чем больше элементов объединяется в один кластер, тем выше эффективность управления системой.

Следует отметить, что технические характеристики современных средств коммуникации и связи не позволяют объединить все RSU в одну общую структуру, вследствие чего необходимо кластерное деление в соответствии с пространственным местоположением устройств граничных вычислений. Из представленных графиков видно, что передача данных по двум смежным каналам одновременно позволяет существенно понизить процент необработанных запросов, сгенерированных ТС. При этом использование кластерного подхода существенно снижает величину потерь в каждом из рассматриваемых случаях.

Приведем графики с результатами численного моделирования в системе ТС – RSU в каждом из двух вариантов взаимодействия: прием и передача данных по одному (рисунок 4а) и по двум смежным каналам одновременно (рисунок 4б).

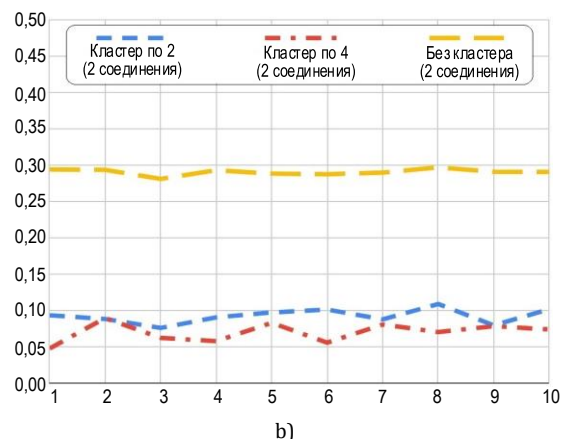
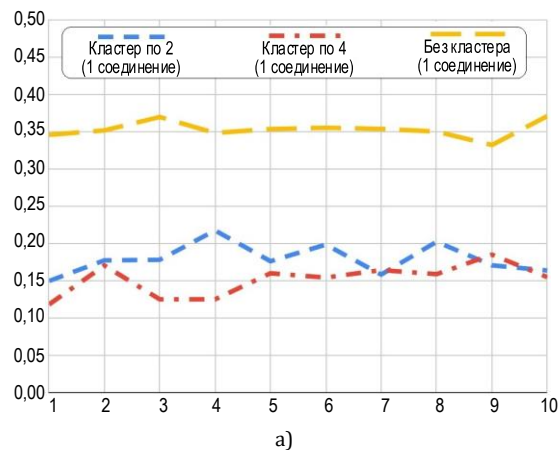


Рис. 4. Средний процент потерь: 1 канал (а) и 2 канала подключения (б)

Fig. 4. Average Percentage of Losses: 1 Connection (a) and 2 Connection Channels (b)

Для качественного сравнения результатов проведем подсчет среднего процента потерь блоков данных по 10 генерациям случайного потока ТС и выборочной дисперсии этих потерь. Сравнительный анализ рассматриваемых параметров в различных условиях приведен в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты численного моделирования потока ТС в дорожной сети

TABLE 2. The Results of Numerical Simulation of Vehicle Flow in the Road Network

Модель	Выборочное среднее процента потерь, %	Значение выборочной дисперсии
Без кластеров, одно соединение	35,28	1,29
Кластеры по 2, одно соединение	17,88	4,47
Кластеры по 4, одно соединение	15,11	4,66
Без кластеров, два соединения	29,02	0,20
Кластеры по 2, два соединения	9,22	1,07
Кластеры по 4, два соединения	6,97	1,82

Можно отметить, что при использовании бескластерной модели выигрыш от использования новой двухканальной схемы оказывается не столь значительным: потери становятся в среднем на 6 % меньше.

При этом использование любой из рассмотренных схем кластеризации позволяет практически вдвое сократить процентное значение величины потерь. В этой связи стоит комплексно подходить к анализу и построению модели с целью ее эффективного функционирования.

Дополнительно стоит отметить, что значение выборочной дисперсии, характеризующая разброс значений относительно среднего, оказывается значительно меньшим при использовании стандарта IEEE 802.11bd. Это позволяет сделать вывод, что результаты, полученные при использовании вышеупомянутой схемы, являясь более устойчивыми к внешним факторам. Использование схемы с двумя каналами одновременного взаимодействия ТС и RSU оказывается более стабильным инструментом для реализации взаимодействия элементов динамической системы.

Несмотря на то, что использование новых модернизированных стандартов сетей связи и кластеризация позволяют снизить величину потерь данных при моделировании системы ТС – RSU, структурное и функциональное усложнение приводит к повышенному энергопотреблению. В этой связи необходимо находить баланс в числе кластеров, основываясь на задачах, поставленных перед системой.

## Выводы

В предыдущей статье авторов [6] на основе теоретических рассуждений и моделирования было доказано, что кластеризация является эффективным способом повышения быстродействия и сокращения потерь в сетях VANETs. Эти результаты были подтверждены приведенным численным моделированием. В то же время этот вывод был получен для частного случая конфигурации системы – применительно к одноканальным устройствам обмена данными.

Появление новых технических решений, связанных с внедрением промышленного стандарта IEEE

802.11bd, который подразумевает двухканальную работу [23], вынуждает более осторожно подходить к приведенному выводу. Новые технические решения дают новые возможности для формирования информационно-алгоритмического обеспечения V2X-систем и могут привести к необходимости корректировки схем их функционирования.

В частности, в некоторых случаях (см. результаты моделирования, представленные в данной статье) может оказаться, что переход к использованию двухканальных устройств обмена данными дает больший выигрыш в производительности, в сравнении с кластеризацией на одноканальных устройствах (в статье [6] доказывались преимущества кластеризации). Задача синтеза оптимальной по потерям системы становится менее определенной, т. к. в ее решении возникают ветвления. В зависимости от численных значений параметров, которыми описывается моделируемая система, может оказаться, что более эффективным решением является как использование двухканальных устройств, так и кластеризация.

Определение граничных условий (пороговых значений значимых параметров системы), позволяющих провести оптимизацию на произвольных наборах исходных данных, которые адекватно отражают реальные задачи управления потоком ТС в городах, является направлением дальнейших исследований. Несмотря на то, что подобные разработки активно ведутся в последние годы [24], выявленные в нашем исследовании новые обстоятельства актуализируют проведение дальнейших изысканий в указанном направлении.

Вторым направлением дальнейших исследований является более глубокое рассмотрение вопросов энергопотребления в различных конфигурациях рассматриваемой системы. В данной публикации эти вопросы изложены в постановочном плане, без учета стоимости энергетических затрат, их пространственного и временного распределения. Между тем, это распределение, в реальных задачах управления дорожным трафиком, может оказаться весьма значимым. Следствием этого может явиться необходимость динамической реконфигурации стационарной части системы, в части формирования состава кластеров.

## Список источников

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020. White Paper. San Jose: Cisco, 2016.
2. Abbas N., Zhang Y., Taherkordi A., Skeie T. Mobile Edge Computing: A Survey // *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5. Iss. 1. PP. 450–465. DOI:10.1109/JIOT.2017.2750180
3. Brehon-Grataloup L., Kacimi R., Beylot A.L. Mobile edge computing for V2X architectures and applications: A survey // *Computer Networks*. 2022. Vol. 206. P. 108797. DOI:10.1016/j.comnet.2022.108797
4. Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A.A., Koucheryavy A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // *Future Internet*. 2019. Vol. 11. Iss. 6. P. 128. DOI:10.3390/fi11060128
5. Vladyko A., Elagin V., Spirikina A., Muthanna A., Ateya A.A. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Iss. 2. P. 173. DOI:10.3390/electronics11020173



6. Плотников П.В., Владыко А.Г. Минимизация задержек при взаимодействии граничных устройств с использованием кластеризации в сетях VANETs // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-6-13
7. Аль-Свейти М.А.М., Волков А.Н., Мутханна А.С.А. Проблемы и требования для реализации технологии V2X // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 3. С. 20–26. DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-3-20-26
8. Dziauddin R.A., Niyato D., Luong N.C., Izhar M.A.M., Hadhari M., Daud S. Computation Offloading and Content Caching Delivery in Vehicular Edge Computing: A Survey // Computer Networks. 2021. Vol. 197. P. 108228. DOI:10.1016/j.comnet.2021.108228
9. You C., Huang K., Chae H., Kim B.H. Energy-Efficient Resource Allocation for Mobile-Edge Computation Offloading // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 3. PP. 1397–1411. DOI:10.1109/TWC.2016.2633522
10. Ren J., Yu G. He Y., Li G.Y. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68. Iss. 5. PP. 5031–5044. DOI:10.1109/TVT.2019.2904244
11. Chen X., Jiao L., Li W., Fu X. Efficient Multi-User Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2016. Vol. 24. Iss. 5. PP. 2795–2808. DOI:10.1109/TNET.2015.2487344
12. Bernardini C., Silverston T., Festor O. MPC: Popularity-based caching strategy for content centric networks // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Budapest, Hungary, 09–13 June 2013). IEEE, 2013. PP. 3619–3623. DOI:10.1109/ICC.2013.6655114
13. Perabathini B., Baştuğ E., Kountouris M., Debbah M., Conte A. Caching at the edge: A green perspective for 5G networks // Proceedings of the International Conference on Communication Workshop (ICCW, London, UK, 08–12 June 2015). IEEE, 2015. PP. 2830–2835. DOI:10.1109/ICCW.2015.7247608
14. Mahmood A., Casetti C., Chiasserini C.F., Giaccone P., Harri J. Mobility-aware edge caching for connected cars // Proceedings of the 12th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS, Cortina d'Ampezzo, Italy, 20–22 January 2016). IEEE, 2016. PP. 1–8.
15. Garetto M., Leonardi E., Traverso S. Efficient analysis of caching strategies under dynamic content popularity // Proceedings of the Conference on Computer Communications (INFOCOM, Hong Kong, China, 26 April 2015–01 May 2015). IEEE, 2015. PP. 2263–2271. DOI:10.1109/INFOCOM.2015.7218613
16. Poularakis K., Iosifidis G., Sourlas V., Tassioulas L. Exploiting Caching and Multicast for 5G Wireless Networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016. Vol. 15. Iss. 4. PP. 2995–3007. DOI:10.1109/TWC.2016.2514418
17. Golrezaei N., Molisch A.F., Dimakis A.G., Caire G. Femtocaching and device-to-device collaboration: A new architecture for wireless video distribution // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51. Iss. 4. PP. 142–149. DOI:10.1109/MCOM.2013.6495773
18. Abuelenin S.M., Abul-Magd A.Y., Empirical study of traffic velocity distribution and its effect on VANETs connectivity // Proceedings of the International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE, Vienna, Austria, 03–07 November 2014). IEEE, 2014. PP. 391–395. DOI:10.1109/ICCVE.2014.7297577
19. Ma J., Wang J., Fan P. A Cooperation-Based Caching Scheme for Heterogeneous Networks // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 15013–15020. DOI:10.1109/ACCESS.2016.2644980
20. Torgunakov V., Loginov V., Khorov E. A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 25514–25533. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3155814
21. Zhu Z., Zhang M., Hao W. Chapter 6 – Artificial intelligence technology in the Internet of things. Intelligent Sensing and Communications for Internet of Everything. Academic Press; 2022. p.245–297. DOI:10.1016/B978-0-32-385655-3.00010-2
22. Плотников П.В., Тамбовцев Г.И., Владыко А.Г. Программный модуль моделирования взаимодействия граничных устройств в сети VANET. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2022669558 от 07.10.2022. Оубл. 21.10.2022.
23. Торгунаков В.А., Логинов В.А., Хоров Е.М., Ляхов А.И. Алгоритм адаптивного выбора конкурентного окна в сетях IEEE 802.11bd // Информационные процессы. 2022. Т. 22. № 4. С. 373–383. DOI:10.53921/18195822\_2022\_22\_4\_373
24. Елькин Д.М., Вяткин В.В. На пути к интернету вещей в управлении транспортными потоками: обзор существующих методов управления дорожным движением // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 5. С. 100–113. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-5-100-113

## References

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020. White Paper. San Jose: Cisco; 2016.
2. Abbas N., Zhang Y., Taherkordi A., Skeie T. Mobile Edge Computing: A Survey. IEEE Internet of Things Journal. 2018;5(1): 450–465. DOI:10.1109/JIOT.2017.2750180
3. Brehon-Grataloup L., Kacimi R., Beylot A.L. Mobile edge computing for V2X architectures and applications: A survey. Computer Networks. 2022; Vol. 206:108797. DOI:10.1016/j.comnet.2022.108797
4. Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A.A., Koucheryavy A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications. Future Internet. 2019; 11(6):128. DOI:10.3390/fi11060128
5. Vladyko A., Elagin V., Spirkina A., Muthanna A., Ateya A.A. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications. Electronics. 2022;11(2):173. DOI:10.3390/electronics11020173
6. Plotnikov P., Vladyko A. Minimizing delays in the interaction of edge devices using clustering in VANETs. Proc. of Telecom Universities. 2022;8(2):6–13. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-6-13
7. Al-Sweity M.A.M., Volkov A., Muthanna A. Challenges and Requirements for Implementing V2X Technology // Telecom IT. 2020;8(3):20–26. (In Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-3-20-26
8. Dziauddin R.A., Niyato D., Luong N.C., Izhar M.A.M., Hadhari M., Daud S. Computation Offloading and Content Caching Delivery in Vehicular Edge Computing: A Survey. Computer Networks. 2021;197:108228. DOI:10.1016/j.comnet.2021.108228
9. You C., Huang K., Chae H., Kim B.H. Energy-Efficient Resource Allocation for Mobile-Edge Computation Offloading. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017;16(3):1397–1411. DOI:10.1109/TWC.2016.2633522

10. Ren J., Yu G. He Y., Li G.Y. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019;68(5):5031–5044. DOI:10.1109/TVT.2019.2904244
11. Chen X., Jiao L., Li W., Fu X. Efficient Multi-User Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2016;24(5):2795–2808. DOI:10.1109/TNET.2015.2487344
12. Bernardini C., Silverston T., Festor O. MPC: Popularity-based caching strategy for content centric networks. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 09–13 June 2013, Budapest, Hungary*. IEEE; 2013. p.3619–3623. DOI:10.1109/ICC.2013.6655114
13. Perabathini B., Baştuğ E., Kountouris M., Debbah M., Conte A. Caching at the edge: A green perspective for 5G networks. *Proceedings of the International Conference on Communication Workshop, ICCW, 08–12 June 2015, London, UK*. IEEE; 2015. p.2830–2835. DOI:10.1109/ICCW.2015.7247608
14. Mahmood A., Casetti C., Chiasserini C.F., Giaccone P., Harri J. Mobility-aware edge caching for connected cars. *Proceedings of the 12th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services, WONS, 20–22 January 2016, Cortina d'Ampezzo, Italy*. IEEE; 2015. p.1–8.
15. Garetto M., Leonardi E., Traverso S. Efficient analysis of caching strategies under dynamic content popularity. *Proceedings of the Conference on Computer Communications, INFOCOM, 26 April 2015–01 May 2015, Hong Kong, China*. IEEE; 2015. p.2263–2271. DOI:10.1109/INFOCOM.2015.7218613
16. Poularakis K., Iosifidis G., Surlas V., Tassioulas L. Exploiting Caching and Multicast for 5G Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2016;15(4):2995–3007. DOI:10.1109/TWC.2016.2514418
17. Golrezaei N., Molisch A.F., Dimakis A.G., Caire G. Femtocaching and device-to-device collaboration: A new architecture for wireless video distribution. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(4):142–149. DOI:10.1109/MCOM.2013.6495773
18. Abuelenin S.M., Abul-Magd A.Y., Empirical study of traffic velocity distribution and its effect on VANETs connectivity. *Proceedings of the International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE, 03–07 November 2014, Vienna, Austria*. IEEE; 2014. p.391–395. DOI:10.1109/ICCV.2014.7297577
19. Ma J., Wang J., Fan P. A Cooperation-Based Caching Scheme for Heterogeneous Networks. *IEEE Access*. 2017;5:15013–15020. DOI:10.1109/ACCESS.2016.2644980
20. Torgunakov V., Loginov V., Khorov E. A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks. *IEEE Access*. 2022;10:25514–25533. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3155814
21. Zhu Z., Zhang M., Hao W. Chapter 6 – Artificial intelligence technology in the Internet of things. *Intelligent Sensing and Communications for Internet of Everything*. Academic Press; 2022. p.245–297. DOI:10.1016/B978-0-32-385655-3.00010-2
22. Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladyko A. Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices in VANET. Patent RF, no 2022669558, 07.10.2022. (in Russ.)
23. Torgunakov V.A., Loginov V.A., Khorov E.M., Lyakhov A.I. Algorithm for adaptive selection of a competitive window in IEEE 802.11bd networks. *Information processes*. 2022;22(4):373–383. (in Russ.) DOI:10.53921/18195822\_2022\_22\_4\_373
24. Elkin D.M., Vyatkin V.V. On the way to the Internet of things in traffic management: a review of existing methods of traffic management. *Izvestiya SFU. Technical science*. 2019;5:100–113. DOI:10.23683/2311-3103-2019-5-100-113

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 15.02.2023.

The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 15.02.2023.

## Информация об авторах:

**ПЛОТНИКОВ**  
Павел Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0001-8869-6142>

**ВЛАДЫКО**  
Андрей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент, декан факультета фундаментальной подготовки Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-8852-5607>