

Обзорная статья

УДК 621.391:004.75

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22>

Анализ подходов к оптимизации V2X-систем: кластеризация, граничные и туманные вычисления

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 обзорной статье ставится **задача** по анализу существующих решений для систем связи на основе технологии Vehicle-to-Everything (V2X) при использовании механизмов кластеризации и периферийных вычислений с **целью** определения концептуальной модели V2X-системы и наиболее значимых показателей качества обслуживания (QoS) с учетом применения указанного комплекса технологических решений. **Новизна** работы состоит в том, что исследование направлено на выявление возможностей интеграции механизмов кластеризации, граничных и туманных вычислений для определения оптимальных решений по развертыванию объектов придорожной сетевой инфраструктуры с сохранением высоких показателей QoS для техники средств связи данного типа. **Результат** заключается в том, что предложен научно-обоснованный технологический подход к построению концептуальной модели V2X-системы с заданными показателями QoS. **Практическая и теоретическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и развертывании V2X-систем.

Ключевые слова: Vehicle-to-Everything, кластеризация, граничные вычисления, туманные вычисления, QoS

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 24-29-00304.

Ссылка для цитирования: Плотников П.В., Владыко А.Г. Анализ подходов к оптимизации V2X-систем: кластеризация, граничные и туманные вычисления // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 7–22. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22. EDN:TRWNON

Review article

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22>

Analysis of Approaches to Optimization of V2X Systems: Clustering, Edge and Fog Computing

Pavel V. Plotnikov , pavplot@gmail.com

Andrey G. Vladyko, vladyko@sut.ru

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

Annotation

The review sets the **task** of analyzing existing solutions for communication systems based on Vehicle-to-Everything (V2X) technology using clustering and edge computing mechanisms in **order** to determine the conceptual model of the V2X system and the most significant indicators of quality of service (QoS), taking into account the application of the specified complex of technological solutions. The **novelty** of the work lies in the fact that the research is aimed at identifying the possibilities of integrating clustering mechanisms, edge and fog computing to determine optimal solutions for the deployment of roadside network infrastructure objects while maintaining high QoS indicators for communication equipment of this type. The **result** is that a scientifically based technological approach to constructing a conceptual model of a V2X system with specified QoS indicators has been proposed. **Practical and theoretical relevance.** The results obtained can be used in the design and deployment of V2X systems.

Keywords: Vehicle-to-Everything, clustering techniques, edge computing, fog computing, QoS

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation, contract number 24-29-00304.

For citation: Plotnikov P.V., Vladyko A.G. Analysis of Approaches to Optimization of V2X Systems: Clustering, Edge and Fog Computing. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(3):7–22. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22. EDN:TRWNON

Введение

В последние годы коммуникационная технология «транспортное средство – окружающая среда» (V2X, аббр. от англ. Vehicle-to-Everything) в интеллектуальных транспортных системах (ИТС) приобрела огромный интерес, так как она потенциально позволяет обеспечить современные потребности ИТС, уменьшить нагрузку на транспортную сеть, повысить безопасность дорожного движения, обеспечить комфорт вождения, предложить альтернативную систему экстренной связи в случае стихийных бедствий, а также обеспечить высокую степень автоматизации транспортных средств (ТС) [1–3]. Для достижения отмеченных показателей V2X-технология должна обеспечивать низкую задержку и высокую надежность, энергоэффективность и оптимальное распределение вычислительных ресурсов. При этом необходимо учитывать специфику сети передачи данных, ее высокую динамичность, постоянные изменения топологии сети и обмен большими объемами данных. В случае, если указанные требования не будут выполнены, критически важные для безопасности приложения не смогут реагировать в потенциально опасных ситуациях. Дополнительно стоит отметить, что большой интерес представляет создание некоего комплекса управления V2X-системой в целом.

Для проектирования транспортных систем с высокими уровнями автоматизации (eyes-off и mind-off) ТС должно иметь возможность обрабатывать большие объемы данных в реальном времени, связанных с распознаванием близлежащих объектов, дорожных аварий, решением навигационных задач и т. д. Однако вычислительные ресурсы некоторых существующих ТС ограничены для запуска таких приложений. При этом, любое нарушение функционирования и устойчивости системы может под-

вергнуть опасности людей и техники на дороге, а также создать высокие затраты на восстановление и поддержку системы, что выводит вопросы надежности передаваемых данных и обеспечения высокой производительности ИТС на первый план. Следует отметить, что указанные особенности находят свое решение при использовании механизмов кластеризации для развертывания придорожной инфраструктуры, а также применения граничных и туманных вычислений.

Отсутствие комплексных моделей предметной области, научно-обоснованных подходов, концепций, методов и алгоритмов целенаправленной деятельности по обеспечению требуемого уровня автоматизации ИТС и баланса между ключевыми характеристиками при работе V2X-технологий также препятствуют ее эффективному внедрению, что позволяет констатировать высокую научную значимость и актуальность решения обозначенной проблемы. Научная новизна исследований в области анализа V2X-систем заключается в учете условий, в которых функционирует ИТС, таких как ограниченные вычислительные ресурсы ТС и инфраструктуры ИТС, энергоэффективность и характеристики сети передачи данных. Поиск комплексной модели, которая позволяла бы распределять и прогнозировать параметры и ресурсы системы при различных вычислительных задачах, является основной задачей многих исследователей. Этот вопрос представляет существенную значимость при внедрении и использовании V2X-технологии. Исходя из этих соображений, далее в статье будет проведен аналитический обзор возможностей некоторых самых активно разрабатываемых методов и концепций, которые могут быть применены при решении задач повышения надежности, оптимизации времени доставки данных, устойчивости и ресурсообеспеченности V2X-системы.

Обзор релевантных работ

Проведем обзор научных публикаций отечественных и зарубежных ученых, посвященных задачам оптимизации ИТС. Поиск осуществлялся по базам РИНЦ, IEEE Xplorer, Scopus, Web of Science, а в качестве конкретных статей и результатов интеллектуальной деятельности отбирались наиболее релевантные запросам «V2X системы», «V2X clustering», «V2X edge computing» и «V2X FOG computing» с ретроспективой на глубину до 10 лет. Основная цель исследования состоит в определении концептуальной модели V2X-системы и наиболее значимых показателей качества обслуживания (QoS, аббр. от англ. Quality of Service) с учетом применения комплекса технологических решений для оптимизации V2X-системы, ориентируясь на опыт современных исследований в этой области. На основе детального анализа будут выбраны наиболее малоисследованные, но от этого не менее важные аспекты, оказывающие влияние на управляемость V2X-системы. В данном обзоре будет проведена систематизация результатов по следующим основным методам оптимизации: использование кластерного подхода, граничных и туманных вычислений. В качестве главных характеристик, по которым будет проводиться сравнение, были выбраны следующие направления: цель, ставящаяся исследователем; применяемый автором алгоритм или метод и используемый авторами аппарат исследования. Также отметим, что основной акцент в данном исследовании будет сделан на три элемента, входящие в QoS, предложенного в V2X White Paper [4]: время ожидания и коэффициент простоя (latency), время обработки и коэффициент искажения (throughput), коэффициент потери пакетов с данными (reliability).

Кластерный подход

Высокая нагрузка на V2X-систему влечет за собой большие временные затраты на передачу данных внутри ТС. Рост временных затрат требует поиска решений для оптимизации процессов обработки информации. Одним из самых распространенных и комплексных подходов к решению рассматриваемой проблемы является кластеризация. RSU (аббр. от англ. Road Side Unit, устройство, установленное на дорожной инфраструктуре) или OBU (аббр. от англ. On Board Unit, бортовое устройство) объединяют в группы с общим кэшем с целью минимизации затрат на обслуживание запросов.

В работах [5–7] приведен подробный обзор применения кластерного подхода к решению задач в V2X-системах. Так, в работе [5] кластеризация находит применение в задачах повышения масштабируемости и надежности маршрутизации в сетях, частой проблемы в крупных городских сетях.

Авторы используют модифицированный под свои задачи популярный алгоритм кластеризации с наименьшим идентификатором и наибольшей степенью (LID/HD). В статье исследуются варианты проектирования, сделанные при разработке алгоритмов кластеризации, ориентированных на работу с V2X-сетями. В нем представлена таксономия методов, применяемых для решения проблем выбора главного элемента кластера, принадлежности и управления кластером, а также определены новые направления и последние тенденции в разработке этих алгоритмов. Кроме того, рассматриваются методы проверки эффективности кластеризации и выявляется ключевой недостаток – отсутствие возможности реалистичного моделирования автомобильных каналов. Авторы отмечают важность строгого и стандартизированного режима оценки производительности с использованием реалистичных моделей.

В работе авторов [6] изучены решения проблем высокой мобильности, низкой пропускной способности некоторых дорог и редкого распределения ТС на части дорог. Проведен анализ различных проблем и существующих решений, использующих механизм кластеризации по параметрам (плотность, скорость и географическое расположение ТС) в сетях VANET (аббр. от англ. Vehicular Ad Hoc Network). Основной вклад авторов состоит в подробном описании формулировки проблем, существующих их решениях и направлениях дальнейших исследований. В статье приводится всесторонний анализ существующих предложений в литературе относительно ряда параметров, таких как выбранная топология, дополнительные требования к инфраструктуре, дорожный сценарий, мобильность узлов, обрабатываемые данные и относительное направление, плотность узлов, относительная скорость и режим связи. Анализ, проведенный для различных существующих предложений, позволяет различным пользователям, работающим в этой области, выбрать одно из предложений с учетом его преимуществ перед другими.

Авторы работы [7] применяют маршрутизацию на основе кластеров в качестве эффективного механизма, справляющегося с высокой динамикой, характерной для элементов V2X-систем. В статье предложена новая схема маршрутизации, названная кластеризацией на основе связности. Для выбора главы кластера и собственно его формирования вводится метрика на основе связности каналов. Последняя является функцией плотности, связывающая ТС и дальность передачи на основе возможности подключения. В качестве инструмента решения используется эвристический подход спектральной кластеризации для поиска оптимального количества кластеров. Выбор главы кластера проводится на основе геометрического

подхода, основанного на показателе максимальной собственной центральности рассматриваемого элемента. Приведенные результаты моделирования показывают, что предложенная схема кластеризации на основе связности хорошо работает при выборе оптимального количества кластеров, а также – сильно связанного маршрута. Авторами отмечается, что связность каналов и эвристический подход спектральной кластеризации являются ценными дополнениями к существующим схемам маршрутизации для быстроразвивающихся сетей.

В работе [8] рассматривается решение проблемы ограниченности диапазона сотовой связи для удовлетворения потребностей всех пользователей V2X-системы. Чтобы справиться с этой проблемой, предлагается эффективная схема управления ресурсами на основе кластеров. Далее проводится анализ ее производительности для выявления исключительных потребностей различных типов подключений в сети, а именно: V2V (*аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle*) и V2I (*аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure*). Из-за высокой мобильности ТС возникает проблема быстрой потери сигнала, обусловленная высокой скоростью ТС и неидеальным сетевым покрытием. Авторы разработали эффективную технику управления ресурсами на основе кластеров для достижения разделения спектра и управления мощностью с учетом масштабных замираний. Предложены эффективные алгоритмы управления и выбора кластеров, которые обеспечивают оптимальное распределение ресурсов. В статье приведены алгоритмы, и их реализация. Моделирование проводилось в среде MATLAB в сочетании с сетевым симулятором NS3.26 (NS-3). Совместное использование обусловлено необходимостью сравнения различных метрик. Экспериментальные результаты показали, что предложенная эффективная схема управления ресурсами достигает хорошей производительности в различных сценариях, в частности, достигая наилучшего индекса приема пакетов, суммарного коэффициента пользователей сотовой связи, а также соотношения в условиях высокой плотности VANET.

Другое приложение кластерного подхода описывается авторами в работе [9]. Благодаря интеграции блокчейна в V2X-систему информация всех уровней детализации, от целых блоков до отдельных транзакций, становится доступной ТС. Основной вклад технологии блокчейн состоит в повышении безопасности и надежности передачи данных в V2X-сети. Кластерный подход применяется в данном случае для решения проблем, связанных с обеспечением совместимости и доступности данных в сети, решение проблем разгрузки задач. В то время как элементы транспортной сети пытаются сбалансировать нагрузку на сеть, ТС выбирают

ближайшие кластеры для выполнения задачи. Это может приводить к перегрузкам и непропорциональному использованию ресурсов автомобильной сети. Авторы проводят анализ теоретико-игрового подхода для балансировки нагрузки на кластеры и сохранения баланса между разгружаемыми ТС. Результаты моделирования, полученные с помощью авторской системы разгрузки, показывают более высокую производительность по сравнению с традиционными методами выбора ближайшего кластера. Отмечается также, что проблема масштабирования сети блокчейн по-прежнему остается сложной проблемой.

Работа [10] посвящена описанию новой схемы распределения ресурсов с поддержкой V2V. Основная идея заключается в том, что V2V-коммуникации на основе технологии сотовой связи между ТС устранивают задержки и позволяют повысить эффективность обмена данными на больших расстояниях. В частности, предлагается новая гибридная архитектура, в которой каждое ТС периодически проверяет необходимость обновления своих пакетов. Проблема оптимального распределения ресурсов решается благодаря выбору оптимального набора ТС-приемников для определения V2V-связей и выделения оптимальных ресурсов. В качестве алгоритма решения поставленных задач используется подход, основанный на выборе максимального взвешенного независимого множества (MWIS-AW). Эта задача является NP-трудной. Авторами предложен аналитический подход к моделированию ожидаемой задержки и коэффициента доставки пакетов с использованием программ SUMO и MATLAB.

Отдельные решения по кластеризации получены в работах [11–13]. Так, в исследовании [11] применен алгоритм кластеризации FOREL с целью минимизации задержки доставки данных. Основная задача исследования была направлена на решение проблемы выбора размера кластера в сети со сверхмалой задержкой. Авторами предложен метод выбора размера цифрового кластера в сети с ультранизкой задержкой с учетом длины соединительных линий. Дополнительно можно отметить, что полученная архитектура не позволяет учесть проблемы, связанные с организацией прокладки кабельных линий, которые не всегда могут быть заданы прямыми линиями.

В [12] предложено использовать спектральную кластеризацию. Объектами изучения являются связи «ТС – инфраструктура» и «ТС – ТС» в сценарии многополосной автомагистрали, где покрытие обеспечивается сетью RSU. Предлагается механизм оптимального выбора ТС, имеющих качественную связь с RSU, что позволяет разгрузить ТС с низким показателем сигнал-шум. Приведены численные результаты моделирования, демонстрирующие

значительное улучшение общей производительности динамической системы. Решение проведено с использованием подхода, основанного на численном анализе с использованием авторского софта.

В работе [13] была рассмотрена модель города, в которой основное внимание уделялось влиянию упреждающего кэширования на некластеризованные и кластеризованные схемы. Авторами было показано, что последние являются более эффективными в случае, если в кластер входит больше RSU. Отмечается, что при этом увеличивается зона покрытия, но растет задержка при передаче информации. В этой связи является важным проверить, позволит ли кластеризация свести к минимуму общую задержку вычислений на граничных устройствах.

Ранняя работа авторов обзора [14] также была посвящена решению задачи минимизации потерь пакетов в сети VANET при взаимодействии ее элементов между собой. Анализ проводился с использованием авторской компьютерной программы [15], написанной на языке Python. Результаты моделирования позволили доказать, что кластеризация RSU в блоки с общим кэшем позволяет значительно снизить потери и повысить эффективность работы динамической системы.

Граничные вычислители

Вычисления, проводимые на границе ТС, или граничные вычисления (VEC, *аббр. от англ. Vehicular Edge Computing*), стали перспективной парадигмой для предоставления и управления услугами в V2X-системах [16]. Они позволяют обеспечить низкую задержку за счет приближения вычислительных ресурсов к ТС. Однако высокая динамичность автомобильных сетей создает значительные трудности при разработке оптимальной схемы предоставления услуг V2X, обеспечивая при этом безопасность и своевременное предоставление услуг.

Для решения обозначенных проблем в работе [17] предлагается новая система граничных автомобильных вычислений с поддержкой блокчейна (BEVEC), которая использует двухуровневый процесс проверки с правом доступа для обеспечения точности и целостности данных. Для измерения производительности BEVEC разработана новая функция полезности системы, которая также служит основой для механизма поиска баланса. Для оптимизации этой функции предлагается алгоритм глубокого обучения с усилением (DRL), позволяющий своевременно предоставлять информацию в BEVEC. Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенного алгоритма по сравнению с существующими подходами. В среднем применение метода позволяет сократить задержку на 18 %, повысить успешность предоставления

услуг на 38 % и снизить энергопотребление на 65 %.

Управление ресурсами имеет большое значение для повышения производительности V2X-системы. В статье [18] предлагается схема совместной загрузки задач и распределения ресурсов для минимизации общей задержки обработки задач всеми ТС за счет планирования, распределения каналов связи и оптимальный подбор вычислительных ресурсов для OBU и RSU. Главным отличием рассматриваемой работы, как отмечается авторами, является: 1) модель учитывает разнообразие задач, профилируя запросы ТС по нескольким атрибутам, включая размер данных, объем вычислений, допустимую задержку и тип задачи; 2) учитывается классификация ТС, проводится их разделение на 4 набора в зависимости от того, имеют они требования к разгрузке задач или предоставляют услуги по обработке; 3) учитывается гибкость подхода к обработке данных, принимая решение для каждого ТС обрабатывать свои задачи локально, выгружать задачи на RSU через соединения V2I или на другие ТС через соединения V2V. Для решения задачи оптимизации разработан алгоритм, основанный на методах обобщенной декомпозиции Бендерса (GBD) и линейаризации перестроения (RL). Также разработан эвристический алгоритм для получения субоптимального решения с низкой вычислительной сложностью. Проведен анализ сходимости и сложности предложенных алгоритмов, и проведено обширное моделирование в 6 сценариях. Результаты моделирования демонстрируют превосходство предложенной схемы по сравнению с 4 другими известными подходами к решению обозначенных задач.

В работе [19] рассматривается задача совместной загрузки вычислений и распределения ресурсов в V2X-сети. Авторы предлагают иерархическую сеть MEC/C-V2X, которая учитывает динамические изменения в автомобильной сети и разнообразие моделей загрузки данных. Предложена модель совместной загрузки вычислений, которая поддерживает несколько различных вариантов. В основе подхода лежит анализ марковских процессов принятия решений с использованием алгоритмов глубокого обучения (ORAD).

Рост интенсивности вычислений и чувствительных к задержкам бортовых приложений делает довольно сложной задачу обработки данных непосредственно на ТС при сохранении необходимого уровня вычислительных мощностей, а значит, и производительности. Тем не менее, схемы загрузки, в которых все ТС перегружают свои задачи на один и тот же граничный сервер, могут тем самым ограничить производительность системы. В статье [20] предлагается интегрировать балансировку нагрузки с разгрузкой, и исследо-

вать распределение ресурсов для многопользовательской мультисерверной VEC-системы. На первом этапе формулируется совместная задача балансировки нагрузки и разгрузки как смешанная целочисленная задача нелинейного программирования для максимизации полезности системы. В частности, используется протокол IEEE 802.11p для моделирования набора параметров, отвечающих за полезность. Затем задача разделяется на две подпроблемы и разрабатывается алгоритм с низкой вычислительной сложностью для совместного выбора граничного вычислителя RSU и оптимизации разгрузки. Численные результаты, полученные на основе применения алгоритма JSO, приведенные авторами, показывают, что предложенный алгоритм демонстрирует быструю сходимость и показывает превосходную производительность в сравнении с существующими классическими решениями.

Авторы в работе [21] отмечают, что последнее время традиционные транспортные системы постепенно эволюционируют в сторону ИТС. ТС становятся все более умными и подключенными, появляется множество интеллектуальных приложений. Как следствие, появляется нехватка вычислительных мощностей автомобилей, что ведет к возникновению проблем с недостатком вычислительных мощностей для поддержки приложений из-за их требовательности к вычислениям. В связи с этим авторами предложена интеллектуальная схема разгрузки задач на основе глубокого Q-обучения, чтобы справиться с такой быстро меняющейся динамической системой, где программно-определяемая сеть внедряется для сбора информации и централизованного управления V2X-системой. Обширные численные результаты и анализ показывают, что предложенная схема не только обладает хорошей адаптивностью, но и может достичь высокой производительности по сравнению с традиционными схемами разгрузки.

Еще один интересный подход к решению задачи оптимизации функционирования V2X-системы на основе граничных вычислений предложен авторами работы [22]. Показано, что технология цифрового двойника (DT, *аббр. от англ. Digital Twin*) стала одним из способов управления связью между ТС и остальными элементами системы с использованием системы связи шестого поколения (6G). Главные преимущества использования DT включают следующие положения: укрепление взаимодействия человека и машины с помощью анализа поведения водителя, повышение безопасности движения с помощью диагностики неисправностей автомобиля на основе собираемых данных с датчиков, а также анализ пространственно-временных характеристик трафика с помощью сбора статистических данных.

Авторами [23] предлагается модель распределенного машинного обучения, в которой каждый элемент системы может индивидуально обучать локальные модели глубоких нейронных сетей (DNN, *аббр. от англ. Deep Neural Network*) на локальных данных, а затем совместно с другими участниками V2X-системы формировать глобальную модель на центральном сервере, позволяющую осуществлять качественное управление всей системой в целом. Модель приводится на основе анализа приложения по распознаванию изображений, которые позволят фиксировать информацию вокруг движущегося автомобиля и характеризовать текущую ситуацию на дороге по множеству параметров. Реализация построена на основе жадного алгоритма. Численные результаты, приведенные авторами, доказывают, что их подход достигает более высоких результатов по сравнению с базовыми подходами.

Задача эффективного планирования распределения ресурсов в условиях ограниченных возможностей коммуникаций рассматривается в работе [24]. Предполагается, что ТС могут «сотрудничать» между собой для совместных вычислений посредством связи между ними. Единая система связи, кэширование и совместные вычисления позволяют обеспечить минимизацию задержки. Чтобы вывести оптимальную стратегию управления, проводится объемное моделирование с использованием расширенного алгоритма глубокой Q-сети (DQN, *аббр. от англ. Deep Q Network*) с отдельной целевой Q-сетью. Моделирование проводится в программной среде Keras 2.3.1 (на основе TensorFlow) с использованием Python 3.7 на Ubuntu 16.04.6 LTS.

В ранней работе авторов обзора [25] приведен анализ математической модели и ее численное решение для системы взаимодействия граничных устройств в традиционной конфигурации размещения придорожных устройств с использованием одно- и двухканального соединения между OBU и RSU. В качестве среды разработки и численного анализа модели используется программный продукт, созданный на базе игрового движка Godot. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что каждая из предложенных моделей может быть эффективно реализована в мобильных узлах и позволит существенно сократить превышающее ожидания время обработки запросов для улучшения организации и алгоритмического обеспечения VANET. К тому же, наряду с этим показано, что разработанный подход позволяет эффективно расходовать электроэнергию при объединении RSU в кластеры с общим кэшем.

Элементы FOG

Понятие туманных вычислений (FOG, *аббр. от англ. Fog Computing*), также называемые перифе-

рийными вычислениями, было введено в 2011 г. из-за необходимости расширения облачных вычислений [26]. Многочисленные устройства ИТС одновременно подключаются к облаку и при этом система испытывает чрезмерную нагрузку. Основная идея FOG состоит в попытке перенести часть вычислительных задач ближе к «земле». Элементы тумана будут собирать необработанные данные (например, от датчиков), и вместо того, чтобы пересылать их на облачные серверы, будут выполнять обработку с использованием своих локальных вычислений [27–29]. Дополнительным преимуществом является то, что собранные данные, скорее всего, потребуются тем же устройствам, которые их сгенерировали, поэтому при локальной, а не удаленной обработке задержка между вводом и ответом минимизируется. В нашей работе под элементами тумана будут рассматриваться в том числе мобильные RSU (mRSU), речь о которых пойдет ниже.

Развертыванию стационарных RSU препятствуют несколько факторов, в том числе высокая стоимость, сложности при адаптации в существующую придорожную инфраструктуру, а также решение вопросов кооперации между государственным сектором, операторами связи и автомобильным бизнесом. Следует отдельно отметить ряд исследований, частично снимающих эти проблемы и направленных на использование ТС в качестве mRSU. Данный подход масштабируем и адаптируем к текущему трафику дорожного движения. Маршруты mRSU можно планировать таким образом, чтобы они пересекали самые сложные участки дорог, а наличие системы контроля маршрута дает в данном случае существенное преимущество. При этом динамическое масштабирование вычислительных мощностей на уровне придорожной сетевой инфраструктуры позволяет рассматривать mRSU в качестве элементов Fog.

Исследование [30] является одной из первых работ, посвященных развертыванию mRSU. Предлагается использовать самоорганизующийся сетевой подход, при котором определенные ТС служат в качестве RSU. Описанное решение основано на разработке локальных управляющих алгоритмов. Данная работа является, по большей части, постановочной, ее результаты показывают, что предлагаемый подход улучшает связность автомобильных сетей на ранних этапах развития V2X-технологии, а также позволяет ускорить ее внедрение, как более экономичного механизма развертывания специализированной придорожной инфраструктуры.

В обзорных работах [31, 32] на базе проведенного анализа существующих решений предложены основные подкатегории динамического развертывания RSU. К ним относятся: 1) специализированное (временное) использование ТС в качестве RSU

(mRSU); 2) припаркованные ТС в качестве RSU (park-mRSU); 3) пассажирский автотранспорт регулярных линий в качестве RSU (bus-mRSU); беспилотные летательные аппараты в качестве RSU (uav-mRSU).

Ограничимся в данном исследовании только наземной инфраструктурой динамического развертывания RSU и рассмотрим некоторые примеры проведенных исследований по указанным подкатегориям.

В исследовании [33] представлена модель связи ТС с RSU, содержащая как стационарные, так и mRSU. Результаты показывают, что даже при введении в схему 5 % mRSU от общего количества стационарных устройств, вероятность установления связи ТС увеличивается вдвое. Нужно учесть, что при отсутствии в системе mRSU вероятность установления связи резко снижается. Данную модель авторы предлагают использовать для увеличения дальности передачи, а также определения оптимальной доли mRSU.

В работе [34] был предложен адаптивный подход, позволяющий каждому mRSU решать, когда активировать свое подключение, в зависимости от состояния соседних mRSU и обычных ТС. Рассмотрена схема с развернутыми mRSU высокой плотности, в которой несколько активных mRSU генерируют множество управляющих сообщений для формирования магистральной сети mRSU.

Для доказательства NP-трудной задачи в статье сформулирован частный случай {0–1} задачи целочисленного линейного программирования. Авторы оценивают производительность предложенного подхода с точки зрения соотношения ТС, охваченных активными mRSU, и управляющих сообщений со служебными данными по сравнению со случаем неадаптивной конфигурации mRSU. По результатам моделирования авторы показали, что с точки зрения подключения, предложенный подход работает так же, как в случае включения всех неадаптивных mRSU.

Следует отметить, что предложенная модель была рассмотрена для простой схемы дороги. Однако в более сложных сценариях необходимо учитывать множество дополнительных факторов, таких как направление движения и фазы светофора, что требует более сложного управления режимами mRSU.

В работе [35] рассмотрено использование специализированных ТС в качестве mRSU для повышения эффективности распространения контента в автомобильных социальных сетях.

В целях минимизации количество запросов к базовой станции предлагается кэшировать данные в стационарных RSU и дополнительно использовать mRSU с кэшированным контентом. Чтобы

решить проблему размещения эша, была поставлена задача оптимизации. Моделируя схему движения mRSU как случай $\{0-1\}$ задачи о ранце (Knapsack Problem), была доказана ее трудноразрешимость и NP-трудность. Далее была выполнена аппроксимация поставленной задачи с помощью стратегии обучения по уменьшению ошибки и решена задача поиска оптимального пути mRSU с использованием метода Монте-Карло. Результаты моделирования показали повышение пропускной способности сети – на 6 % по сравнению с существующими алгоритмами распространения контента.

Несмотря на то, что использование специализированных ТС в качестве mRSU является практическим решением, позволяющим расширить зону покрытия стационарных RSU и обеспечить гибкость в зависимости от дорожной ситуации, следует отметить в качестве основных недостатков дополнительные затраты на создание специализированных ТС, а также трудности с постоянной коррекцией выбора маршрута mRSU для обслуживания заданного количества стандартных ТС.

В работе [36] был предложен самоорганизующийся сетевой подход, аналогичный [30], подействию припаркованных в городских районах ТС в качестве RSU (park-mRSU). Такой подход позволяет припаркованным ТС создавать онлайн-карты покрытия на основе мощности принимаемого сигнала и принимать решения, когда припаркованное ТС является park-mRSU. Авторы разработали жадный алгоритм, который ориентируется на максимальный охват сети, образованной припаркованными ТС. Этот алгоритм минимизирует количество ТС, которые необходимо активировать, учитывает препятствия и обеспечивает эффективное покрытие с помощью соседних припаркованных ТС. Результаты этого исследования показывают экономическую эффективность предложенного подхода, способного обеспечить достаточное покрытие, используя лишь небольшую часть ТС, припаркованных в городе. Между тем, в работе есть ряд существенных ограничений. Так, например, обмен картами покрытия осуществлялся только в пределах 1-hop-окрестности. Кроме этого, ввиду особенностей первоначальной настройки в городских районах, где припаркованные ТС существуют в любое время суток, отсутствует механизм мягкой передачи обслуживания и упреждающая замена активных park-mRSU в других условиях.

В работе [37] была предложена системная модель C-V2V-сети на основе park-mRSU и сформулирована задача оптимизации для максимизации энергоэффективности сети с припаркованными автомобилями. Поскольку предлагаемая задача представляла собой NP-трудную задачу смешанно-

целочисленного нелинейного программирования, она была переформулирована в две подзадачи: выбор park-mRSU и совместное распределение ресурсов. Для первой подзадачи представлен механизм обратного аукциона, стимулирующий использование припаркованных автомобилей как park-mRSU. Для второй подзадачи использовалось нелинейное дробное программирование для оптимизации мощности передачи, а также для получения схемы повторного использования канала. Алгоритмы оценивались на основе реальных сценариев с использованием SUMO. Численные результаты показали, что предлагаемый подход может как эффективно выбирать park-mRSU при низких затратах, так и достигать заданных характеристик системы с точки зрения энергоэффективности, использования спектра и покрытия сети по сравнению с другими эталонными алгоритмами.

В работе [38] проведено исследование по оптимальному размещению park-mRSU для C-V2X со случайными требованиями к вычислительным задачам и плотности трафика ТС. Была сформулирована проблема размещения park-mRSU как задача целочисленного линейного программирования для минимизации задержек при разгрузке вычислительных задач. Предложен алгоритм, комбинирующий стохастическое моделирование, искусственную нейронную сеть и метаэвристический алгоритм для определения местоположения на основе реальных данных о трафике ТС. Приведенные в работе результаты позволяют определенному количеству припаркованных ТС выступать в качестве park-mRSU как RSU-шлюз в течение определенного периода времени парковки. Численные результаты показывают, что припаркованные ТС, временно использующиеся как RSU-шлюзы, предоставляют достаточно вычислительных ресурсов и уменьшают общую задержку при разгрузке вычислительных задач. Приведенное сравнение скорости успешной доставки пакетов и общей пропускной способности при различной плотности ТС продемонстрировало лучшие результаты park-mRSU по сравнению со стационарными RSU на перекрестках. Между тем, стоит отметить, что объем приведенного исследования ограничен исследуемой зоной парковки. Кроме этого, модель размещения park-mRSU предусматривает, что определенное количество доступных ТС должны обязательно взаимодействовать в течение определенного периода времени во время парковки. Данные обстоятельства требуют уточнения предложенной модели при ее масштабировании.

Общественные транспортные средства (ОТС), такие как автобусы и такси, могут являться доступными ТС при создании mRSU. С предустановленным коммуникационным и вычислительным

оборудованием их можно использовать для обслуживания других ТС.

В работе [39] предложена автомобильная сеть на базе ОТС, оснащенных как bus-mRSU. Кроме этого, автобусы, такси и автовокзалы образуют магистральную линию LTE D2D для поддержки V2V-связи. В статье предлагается использовать нечеткую маршрутизацию для повышения производительности пересылки сообщений между ТС. Результаты моделирования показывают, что по сравнению с общепринятыми протоколами маршрутизации, в сетях VANET предлагаемое решение может эффективно повысить скорость доставки сообщений и сократить их задержку.

В работе [40] была предложена сеть BUS-VANET, использующая автобусы в качестве bus-mRSU. Сеть имеет двухуровневую архитектуру, где верхний уровень включает bus-mRSU и центр управления движением, а нижний уровень составляют стандартные ТС, оснащенные устройствами OBU. Когда узел нижнего уровня желает передать сообщение, он должен сначала зарегистрироваться на соседнем узле верхнего уровня, чтобы определить путь доставки в соответствии с алгоритмом маршрутизации на основе траектории, заданный узлом верхнего уровня. Результаты моделирования показали, что сеть BUS-VANET с пятью установленными bus-mRSU работает аналогично традиционной VANET с десятью стационарными RSU и при этом имеет наименьшую задержку и самый высокий коэффициент доставки пакетов. Тем не менее, в ситуации с разреженной дорожной сетью предложенный метод не учитывал услуги передачи, предоставляемые существующими стационарными RSU.

В работе [41] показано, как стационарные RSU могут быть заменены автобусами – bus-mRSU, чтобы минимизировать затраты на развертывание V2X-системы и максимизировать зону покрытия между ТС и придорожной инфраструктурой. Компромисс производительности и стоимости использования bus-mRSU решается с помощью математического анализа и проверяется реальными экспериментами. Однако масштаб эксперимента не может соответствовать масштабу моделирования из-за практических ограничений. В целом представленные в работе результаты дают основу для оценки того, выгодно ли дополнять стационарные RSU мобильными устройствами в зависимости от среды развертывания и соотношения цены и качества.

Кроме приведенных работ, следует отметить гибридные подходы развертывания mRSU [42, 43]. Так, в работе [43] предложена гибридная структура развертывания RSU, которая представляет собой комбинацию трех различных подходов: развертывание стационарных RSU, использование bus-

mRSU на ОТС и использование специализированных mRSU. Исследуется стратегия наилучшего развертывания RSU, чтобы их пространственно-временной охват был максимальным при ограниченном бюджете. Сформулирована оптимизационная задача и показана ее NP-трудность. Предложен новый полиномиальный алгоритм аппроксимации времени выполнения задачи и показано, что коэффициент производительности (отношение между качеством результата предлагаемого алгоритма и качеством наилучшего возможного решения) составляет как минимум половину наилучшего возможного решения. В работе представлены результаты моделирования предлагаемого подхода в различных условиях.

Концепция mRSU затрагивалась в работах авторов данного обзора [44, 45]. Здесь мобильные RSU выполняли роль RSU, динамически меняющих свое положение. В обоих исследованиях ставилась задача минимизации потерь данных при функционировании V2X-системы. Численный анализ системы без mRSU и после их внедрения показал, что использование mRSU значительно снижает нагрузку на сеть в целом. При этом численно доказано, что возможен полный отказ от стационарных RSU при выполнении ряда дополнительных ограничений. Подход к визуализации с использованием нагретой карты позволяет визуализировать результат более наглядно.

Поиск научных публикаций по указанным выше ключевым запросам показал критически малое количество отечественных исследований по сравнению с зарубежными.

Систематизация результатов

Осуществим систематизацию проведенных обзоров (таблица 1) путем их ранжирования с помощью следующего набора критериев:

- K₁ – год публикации, позволяющий оценить тенденции в предметной области;
- K₂ – подход к решению задачи;
- K₃ – основная цель, поставленная авторами (задача исследования);
- K₄ – основной используемый метод (алгоритм);
- K₅ – система моделирования.

Если информация по критерию отсутствует, будем ставить «---».

Отметим, что большая часть анализируемых решений имеет теоретическое обоснование или доведено до состояния работающего прототипа, при этом достаточно мало решений внедрено и реально используется на практике. Это, вероятно, дополнительно подтверждает мысль о том, что научное сообщество стремится создать рабочую модель, внедрение которой существенно упростит регулирование работы V2X-системы.

ТАБЛИЦА 1. Результаты систематизации обзоров научных публикаций

TABLE 1. Results of Systematizing Reviewing Scientific Publications

Название, ссылка	К_1	К_2	К_3	К_4	К_5
Comparative Survey of VANET Clustering Techniques [5]	2017	Cluster	улучшение масштабируемости и надежности маршрутизации в сети	Несколько методов и алгоритмов решения задачи	несколько различных сред моделирования
Clustering in vehicular ad hoc networks: taxonomy, challenges and solutions [6]	2014	Cluster	проблемы высокой мобильности и редкого распределения ТС	несколько методов и алгоритмов решения задачи	несколько различных сред моделирования
A Connectivity-Based Clustering Scheme for Intelligent Vehicles [7]	2021	Cluster	повышение надежности, стабильности и масштабируемости сети	эвристический подход спектральной кластеризации	SUMO 0.25.0, MATLAB R2015b
An Efficient Cluster Based Resource Management Scheme and its Performance Analysis for V2X Networks [8]	2020	Cluster	схема управления ресурсами на основе кластеров и анализ ее производительности для V2X-сетей	математический анализ	MATLAB сетевой симулятор NS3.26 (NS-3)
Efficient Mining Cluster Selection for Blockchain-Based Cellular V2X Communications [9]	2020	Cluster	минимизация задержки	математический анализ, блокчейн-технология	авторский софт
A novel low-latency V2V resource allocation scheme based on cellular V2X communications [10]	2018	Cluster	построение оптимальной схемы распределения ресурсов	жадный алгоритм	SUMO 0.25.0, MATLAB R2015b
An Efficient Method for choosing Digital Cluster Size in Ultralow Latency Networks [11]	2021	Cluster	минимизация задержки доставки данных	алгоритм кластеризации FOREL	Mathcad program
Vehicle clustering for improving enhanced LTE-V2X network performance [12]	2017	Cluster	разгрузка ТС с низким показателем сигнал-шум	спектральная кластеризация	Vienna LTE-A Downlink System Level Simulator
Proactive Caching for Vehicular Ad hoc Networks Using the City Model [13]	2019	Cluster	минимизация потерь данных	математический анализ	---
Numerical Analysis of the Mathematical Model of a Cluster V2X-System [14]	2023	Cluster	минимизация потерь данных	математический анализ	Python 3.7, Godot Engine
A Blockchain-Enabled Vehicular Edge Computing Framework for Secure Performance-oriented V2X Service Delivery [17]	2024	Edge	улучшения производительности BEVEC с точки зрения энергопотребления, задержки и успешности предоставления услуг	алгоритм DRL, названный 3DPER	BEVEC: Blockchain-Enabled Vehicular Edge Computing
Joint Task Offloading and Resource Allocation for Vehicular Edge Computing Based on V2I and V2V Modes [18]	2023	Edge	разгрузка и распределение ресурсов для минимизации общей задержки обработки задач	алгоритм, основанный на GBD и RL	MATLAB simulator
Joint computation offloading and resource allocation based on deep reinforcement learning in C-V2X edge computing [19]	2023	Edge	задача совместной оптимизации разгрузки вычислений и распределения ресурсов в сети	математический анализ, марковские процессы, алгоритм ORAD	Python 3.7 with the PyTorch framework to implement the DNN networks with the Adam optimizer
Joint Load Balancing and Offloading in Vehicular Edge Computing and Networks [20]	2019	Edge	интеграция балансировки нагрузки с разгрузкой, и исследование распределения ресурсов для многопользовательской мультисерверной VEC-системы	алгоритм JSCO	Rayleigh fading model, MathLab
Intelligent Task Offloading in Vehicular Edge Computing Networks [21]	2020	Edge	оптимальная разгрузка задач с минимизацией задержек	схема разгрузки задач на основе глубокого Q-обучения	авторский софт
Task-Efficiency Oriented V2X Communications: Digital Twin Meets Mobile Edge Computing [22]	2023	Edge	укрепление взаимодействия человека и машины, повышение безопасности движения, анализ пространственно-временных характеристик трафика	DT-технология	симулятор движения на базе SUMO

Название, ссылка	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
Federated Learning in Vehicular Edge Computing: A Selective Model Aggregation Approach [23]	2020	Edge	повышение уровня управляемости V2X-системы в целом	анализ локальных моделей DNN, принцип объединенного обучения, оригинальный алгоритм	MATLAB simulator
Collaborative Data Scheduling for Vehicular Edge Computing via Deep Reinforcement Learning [24]	2020	Edge	минимизация задержки	расширенный алгоритм DQN с отдельной целевой Q-сетью	Keras 2.3.1 (на основе TensorFlow), Python 3.7
Cluster-Based Vehicle-to-Everything Model with a Shared Cache [25]	2023	Edge	сокращение времени ожидания обработки запросов	математический анализ, численное моделирование	Python 3.7, Godot Engine
How mobile RSUs can enhance communications in VANETs? [33]	2018	Fog (mRSU)	максимизация сетевого покрытия	математический анализ	численный анализ
Adaptive configuration of mobile roadside units for the cost-effective vehicular communication infrastructure [34]	2019	Fog (mRSU)	максимизация сетевого покрытия	решение задачи {0-1} ILP	SUMO (Veins), OMNet++
Social-aware mobile road side unit for content distribution in vehicular social networks [35]	2019	Fog (mRSU)	повышение скорости доставки пакетов	решения задачи {0-1} Knapsack problem	SUMO, Mininet
Parked cars are excellent roadside units [36]	2017	Fog (park-mRSU)	максимизация сетевого покрытия	самоорганизующаяся сеть, Greedy-алгоритм	SUMO, Специализированное ПО
Energy-efficient resource allocation for parked-cars-based cellular-V2V heterogeneous networks [37]	2022	Fog (park-mRSU)	энергоэффективность, максимизация сетевого подключения	решение задачи оптимизации для максимизации энергоэффективности сети	SUMO, MATLAB, OpenStreetMap
Optimal exploitation of on-street parked vehicles as roadside gateways for social IoV—a case of Kigali City [38]	2020	Fog (park-mRSU)	минимизация задержки	решение задачи ILP	SUMO, NS3, OpenStreetMap
Routing in taxi and public transport based heterogeneous vehicular networks [39]	2016	Fog (bus-mRSU)	повышение скорости доставки пакетов, минимизация задержки	алгоритм нечеткой маршрутизации	The Opportunistic Network Environment simulator (ONE)
Bus-VANET: A bus vehicular network integrated with traffic infrastructure [40]	2015	Fog (bus-mRSU)	минимизация потерь пакетов, минимизация задержки	математический анализ	SUMO, NS3
Performance-cost tradeoff of using mobile roadside units for V2X communication [41]	2019	Fog (bus-mRSU)	максимизация сетевого покрытия	математический анализ	SUMO, NS3
A new comprehensive RSU installation strategy for cost-efficient VANET deployment [42]	2016	Fog (hybrid RSU)	экономическая эффективность, минимизация задержки	полиномиальный алгоритм аппроксимации времени выполнения задачи	SUMO, Open Street Map, Visual studio 2015
Hybrid RSU management in cybertwin-IoV for temporal and spatial service coverage [43]	2022	Fog hybrid RSU	экономическая эффективность	решение задачи максимизации полезности с ограничениями покрытия	MATLAB
Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units [44]	2023	Fog mRSU	минимизация потерь данных	математический анализ	Python 3.7, Godot Engine
Numerical Analysis of roadside Units Deployment Models in V2X Communication System [45]	2024	Fog mRSU	минимизация потерь данных	математический анализ	Python 3.7, Godot Engine

Исходя из результатов сравнительного анализа обзоров (см. таблицу 1), можно сделать следующие выводы по каждому из критериев.

Во-первых (по критерию К_1), публикационная активность имеет характерный стабильно высокий уровень интереса со стороны научного сообщества. Отсутствие комплексно решенной задачи дает возможность смело предположить, что в будущем интерес к моделям V2X-систем будет только расти, поскольку необходимость автоматизации управления системой дорожного движения не теряет своей актуальности.

Во-вторых (по критерию К_2), рассмотренные три наиболее популярных подхода к решению задач оптимизации V2X-систем остаются актуальными на протяжении последних десяти лет, поэтому можно считать, что каждый из них будет в дальнейшем развиваться. При этом будущее, на наш взгляд, за туманными вычислениями, по той причине, что эта концепция является самой новой и перспективной, с учетом появления новых технических разработок в сфере ИТС.

В-третьих (по критерию К_3), несмотря на то, что класс решаемых задач оптимизации V2X-систем достаточно широк, основной интерес представляют задачи минимизации потерь при передаче данных, уменьшении задержек, построении энергоэффективной системы и повышении надежности и стабильности системы в целом. При этом почти во всех рассмотренных научных публикациях отмечается необходимость создания именно комплексной модели управления V2X-системой.

В-четвертых (по критерию К_4), в большинстве публикаций используются классические подходы к решению оптимизационных задач, затрагивающие такие разделы математики, как математический анализ, теория вероятностей и экстремальные задачи, а также некоторые элементы теории алгоритмов, эвристический, жадный или алгоритмы глубокого обучения. Можно дополнительно отметить, что метод зачастую выбирается на основе содержания той задачи, которую необходимо решить, то есть каждый подход имеет свои преимущества и недостатки.

В-пятых (по критерию К_5), сред для моделирования процессов, возникающих при работе с V2X-системами, достаточно много. Какого-либо существенного преимущества одной программной среды перед другой в процессе подготовки обзора не было выявлено. Стоит отметить, что наиболее популярной программой для моделирования можно считать программу MATLAB в кооперации с программой визуализации SUMO. Программные средства, созданные самими исследователями, реализуются в основном на языке программирования Python. При этом все подходы к проведению моделирования имеют право на существование.

Результаты анализа

На основании приведенного анализа публикаций, их систематизации, а также авторского опыта предлагается концептуальная модель организации V2X-системы, основанная на следующих принципах.

Принцип 1. RSUs и mRSUs будут выступать в роли туманных узлов и обладать вычислительными возможностями граничных серверов, позволяющими обслуживать задачи OBU, находящиеся в их зоне покрытия. Элементы OBU, в свою очередь, будут пониматься как туманные узлы второго типа, обслуживаемыми элементами системы, обладающие высокой мобильностью и значительно меньшими вычислительными способностями. Вычислительные задачи, превышающие вычислительные возможности граничных серверов, переносятся для решения в облако. Таким образом рассматривается трехэлементная архитектура V2X-системы: OBU-RSU/mRSU-CLOUD, – представленная на рисунке 1. Это идея позволяет построить трехуровневую систему, предложенную в качестве гипотезы в [45].



Рис. 1. Трехуровневая схема V2X системы

Fig. 1. Three-Level V2X System Scheme

Принцип 2. В основе построения комплексной V2X-системы должны лежать, по классификации [4], следующие оптимизируемые параметры: покрытие (coverage), задержка (latency), надежность (reliability), пропускная способность (throughput), дальность связи (communication range), скорость (velocity) и мульти-операторская работа (multi-operator's operation).

В таблице 2 приведено число публикаций, посвященных анализу каждого из оптимизируемых параметров. В нашем обзоре параметры понимаются как задачи исследования (критерий K_3).

ТАБЛИЦА 2. Анализ публикаций по параметрам оптимизации

TABLE 2. Analysis of Publications on Optimization Parameters

Оптимизационные параметры (задачи исследования)	Cluster	Edge	FOG
покрытие	2	1	3
задержка	2	5	4
надежность	4	3	4
пропускная способность	4	4	3
дальность связи	2	–	1
скорость	1	1	2
мультиоператорская работа	1	3	2

По результатам анализа таблицы можно сделать вывод, что поиск программно-оптимизационных решений должен вестись по трем основным параметрам обозначенного списка: задержка, надежность (в смысле потерь данных и энергозатрат) и пропускная способность. По остальным параметрам исследования проводятся реже в силу особой специфики задач, а также возможности пе-

рехода на более современное оборудование, которое позволяет частично решать проблему за счет совершенствования элементной базы.

Заключение

В работе проведен обзор научных публикаций, посвященных оптимизации V2X-систем. Произведен сравнительный анализ обзоров (и их результатов), который позволил сделать систематизированные выводы касательно:

- актуальности и перспективности исследований в данной области;
- преимуществ и недостатков реализации той или иной модели и метода ее решения.

Исходя из результатов сравнительного анализа, были сделаны обобщенные выводы, которые послужили отправной точкой к реализации концептуальной модели V2X-системы, основанной на указанных принципах. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и развертывании V2X-систем.

Продолжением исследования должна стать последовательная реализация комплексной модели, основанной на вышеизложенных принципах.

Список источников

1. Mueck M., Karls I. Networking Vehicles to Everything: Evolving Automotive Solutions. Walter de Gruyter, 2018. 233 p.
2. Chen S, Hu J., Zhao L., Zhao R., Fang J., Shi Y., Xu H. Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X). Wireless Networks. Springer, 2023. 416 p.
3. Wang J., Shao Y., Ge Y., Yu R. A survey of vehicle to everything (V2X) testing // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 2. P. 334. DOI:10.3390/s19020334
4. V2X White Paper. Next Generation Mobile Networks Ltd.: San Jose, 2018.
5. Cooper C., Franklin D., Ros M., Safaei F., Abolhasan M. A Comparative Survey of VANET Clustering Techniques // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. PP. 657–681. DOI:10.1109/COMST.2016.2611524
6. Bali R.S., Kumar N., Rodrigues J.J. Clustering in vehicular ad hoc networks: taxonomy, challenges and solutions // Vehicular Communications. 2014. Vol. 1. Iss. 3. PP. 134–152. DOI:10.1016/j.vehcom.2014.05.004
7. Khan Z., Koubaa A., Fang S., Lee M.Y., Muhammad K. A Connectivity-Based Clustering Scheme for Intelligent Vehicles // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 5. P. 2413. DOI:10.3390/app11052413
8. Abbas F., Liu G. Fan P., Khan Z. An efficient cluster-based resource management scheme and its performance analysis for V2X networks // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 87071–87082. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2992591
9. Jameel F., Javed M.A., Zeadally S., Jantti R. Efficient Mining Cluster Selection for Blockchain-Based Cellular V2X Communications // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22. Iss. 7. PP. 4064–4072. DOI:10.1109/TITS.2020.3006176
10. Abbas F., Fan P., Khan Z. A novel low-latency V2V resource allocation scheme based on cellular V2X communications // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 6. PP. 2185–2197. DOI:10.1109/TITS.2018.2865173
11. Paramonov A., Khayyat M., Chistova N., Muthanna A., Elgendy I.A., Koucheryavy A., et al. An Efficient Method for choosing Digital Cluster Size in Ultralow Latency Networks // Wireless Communications and Mobile Computing. 2021. Vol. 2021. P. 9188658. DOI:10.1155/2021/9188658
12. Luoto P., Bennis M., Pirinen P., Samarakoon S., Horneman K., Latvaaho M. Vehicle clustering for improving enhanced LTE-V2X network performance // Proceedings of the European Conference on Networks and Communications (EuCNC, Oulu, Finland, 12–15 June 2017). IEEE, 2017. DOI:10.1109/EuCNC.2017.7980735
13. AlNagar Y., Hosny S., El-Sherif A.A. Proactive Caching for Vehicular Ad hoc Networks Using The City Model // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference Workshop (WCNCW, Marrakech, Morocco, 15–18 April 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/WCNCW.2019.8902590
14. 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. EDN:JDPDSD
15. Плотников П.В., Тамбовцев Г.И., Владыко А.Г. Программный модуль моделирования взаимодействия граничных устройств в сети VANET с одно- и двухканальным подключением. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023681939 от 06.10.2023. Оpubл. 19.10.2023. EDN:EYFCRR
16. Liu L., Chen C., Pei Q., Maharjan S., Zhang Y. Vehicular edge computing and networking: A survey // Mobile Networks and Applications. 2021. Vol. 26. PP. 1145–1168. DOI:10.1007/s11036-020-01624-1

17. Fardad M., Muntean G.M., Tal I. A Blockchain-Enabled Vehicular Edge Computing Framework for Secure Performance-oriented V2X Service Delivery // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2024. DOI:10.1109/TVT.2024.3394150
18. Fan W., Su Y., Liu J., Li S., Huang W., Wu F., Liu Y. Joint Task Offloading and Resource Allocation for Vehicular Edge Computing Based on V2I and V2V Modes // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 24. Iss. 4. PP. 4277–4292. DOI:10.1109/TITS.2022.3230430
19. Hou, P., Jiang, X., Lu, Z. et al. Joint computation offloading and resource allocation based on deep reinforcement learning in C-V2X edge computing // *Applied Intelligence*. 2023. Vol. 53. PP. 22446–22466. DOI:10.1007/s10489-023-04637-x
20. Dai Y., Xu D., Maharjan S., Zhang Y., Joint Load Balancing and Offloading in Vehicular Edge Computing and Networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. Iss. 3. PP. 4377–4387. DOI:10.1109/JIOT.2018.2876298
21. Guo H., Liu J., Ren J., Zhang Y. Intelligent Task Offloading in Vehicular Edge Computing Networks // *IEEE Wireless Communications*. 2020. Vol. 27. Iss. 4. PP. 126–132. DOI:10.1109/MWC.001.1900489
22. Cai G., Fan B., Dong Y., Li T., Wu Y., Zhang Y. Task-Efficiency Oriented V2X Communications: Digital Twin Meets Mobile Edge Computing // *IEEE Wireless Communications*. 2024. Vol. 31. Iss. 2. PP. 149–155. DOI:10.1109/MWC.012.2200465
23. Ye D., Yu R., Pan M., Han Z. Federated Learning in Vehicular Edge Computing: A Selective Model Aggregation Approach // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. PP. 23920–23935. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2968399
24. Luo Q., Li C., Luan T.H., Shi W. Collaborative Data Scheduling for Vehicular Edge Computing via Deep Reinforcement Learning // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. Iss. 10. PP. 9637–9650. DOI:10.1109/JIOT.2020.2983660
25. Vladyko A., Tambovtsev G., Podgornaya E., Chelloug S.A., Alkanhel R., Plotnikov P. Cluster-Based Vehicle-to-Everything Model with a Shared Cache // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Iss. 13. P. 3017. DOI:10.3390/math11133017
26. Bonomi F. Connected vehicles, the internet of things, and fog computing // *Proceedings of the Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking (VANET 2011, 23 September 2011, Las Vegas, USA)*. 2011.
27. Khattak H.A., Islam S.U., Din I.U., Guizani M. Integrating fog computing with VANETs: A consumer perspective // *IEEE Communications Standards Magazine*. 2019. Vol. 3. Iss. 1. PP. 19–25. DOI:10.1109/MCOMSTD.2019.1800050
28. Sarrigiannis I., Contreras L.M., Ramantas K., Antonopoulos A., Verikoukis C. Fog-Enabled Scalable C-V2X Architecture for Distributed 5G and Beyond Applications // *IEEE Network*. 2020. Vol. 34. Iss. 5. PP. 120–126. DOI:10.1109/MNET.111.2000476
29. Alvi A.N., Javed M.A., Hasanat M.H.A., Khan M.B., et al. Intelligent task offloading in fog computing based vehicular networks // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. P. 4521. DOI:10.3390/app12094521
30. Tonguz O.K., Viriyasitavat W. Cars as roadside units: A self-organizing network solution // *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51. Iss. 12. PP. 112–120. DOI:10.1109/MCOM.2013.6685766
31. Karunathilake T., Forster A. A survey on mobile road side units in VANETs // *Vehicles*. 2022. Vol. 4. Iss. 2. PP. 482–500. DOI:10.3390/vehicles4020029
32. Guerna A., Bitam S., Calafate C.T. Roadside unit deployment in internet of vehicles systems: A survey // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 9. P. 3190. DOI:10.3390/s22093190
33. Ercan S., Ayaida M., Messai N. How mobile RSUs can enhance communications in VANETs? // *Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM, Marrakesh, Morocco, 16–19 October 2018)*. IEEE, 2018. DOI:10.1109/WINCOM.2018.8629641
34. Lee J., Ahn S. Adaptive configuration of mobile roadside units for the cost-effective vehicular communication infrastructure // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019. Vol. 2019. P. 6594084. DOI:10.1155/2019/6594084
35. Bitagsir S.A., Kashipazha S., Dadlani A., Khonsari A. Social-aware Mobile Road Side Unit for Content Distribution in Vehicular Social Networks // *Proceedings of the Symposium on Computers and Communications (ISCC, Barcelona, Spain, 29 June 2019 – 03 July 2019)*. IEEE, 2019. DOI:10.1109/ISCC47284.2019.8969669
36. Reis A.B., Sargento S., Tonguz O.K. Parked cars are excellent roadside units // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18. Iss. 9. PP. 2490–2502. DOI:10.1109/TITS.2017.2655498
37. Qin P., Fu Y., Feng X., Zhao X., Wang S., Zhou Z. Energy-efficient resource allocation for parked-cars-based cellular-V2V heterogeneous networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9. Iss. 4. P. 3046–3061. DOI:10.1109/JIOT.2021.3094903
38. Evariste T., Kasakula W., Rwigema J., Datta R. Optimal exploitation of on-street parked vehicles as roadside gateways for social IoV – a case of Kigali City // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2020. Vol. 6. Iss. 3. P. 73. DOI:10.3390/joitmc6030073
39. Li G., Ma M., Liu C., Shu Y. Routing in taxi and public transport based heterogeneous vehicular networks // *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference (TENCON, Singapore, Singapore, 22–25 November 2016)*. IEEE, 2019. PP. 1863–1866. DOI:10.1109/TENCON.2016.7848344
40. Jiang X., Du D.H.C. Bus-VANET: A bus vehicular network integrated with traffic infrastructure // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2015. Vol. 7. Iss. 2. P. 47–57. DOI:10.1109/MITS.2015.2408137
41. Heo J., Kang B., Yang J.M., Paek J., Bahk S. Performance-cost tradeoff of using mobile roadside units for V2X communication // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. Iss. 9. PP. 9049–9059. DOI:10.1109/TVT.2019.2925849
42. Kim D., Velasco Y., Wang W., Uma R.N., Hussain R., Lee S. A new comprehensive RSU installation strategy for cost-efficient VANET deployment // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. Vol. 66. Iss. 5. PP. 4200–4211. DOI:10.1109/TVT.2016.2598253
43. Ni Y., Zhao C., Cai L. Hybrid RSU management in cybertwin-IoV for temporal and spatial service coverage // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022. Vol. 71. Iss. 5. P. 4596–4606. DOI:10.1109/TVT.2021.3138749
44. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G. Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units // *Proceedings of the Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED, Moscow, Russian Federation, 15–17 November 2023)*. IEEE, 2023. DOI:10.1109/TIRVED58506.2023.10332617

45. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G. Numerical Analysis of roadside Units Deployment Models in V2X Communication System // Proceedings of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (Moscow, Russian Federation, 12–14 March 2024). IEEE, 2024. DOI:10.1109/IEEECONF60226.2024.10496720

References

1. Mueck M., Karls I. *Networking Vehicles to Everything: Evolving Automotive Solutions*. Walter de Gruyter; 2018. 233 p.
2. Chen S, Hu J, Zhao L, Zhao R, Fang J, Shi Y, Xu H. *Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X)*. *Wireless Networks*. Springer; 2023. 416 p.
3. Wang J, Shao Y, Ge Y, Yu R. A survey of vehicle to everything (V2X) testing. *Sensors*. 2019;19(2):334. DOI:10.3390/s19020334
4. *V2X White Paper*. Next Generation Mobile Networks Ltd.: San Jose; 2018.
5. Cooper C., Franklin D., Ros M., Safaei F., Abolhasan M. A Comparative Survey of VANET Clustering Techniques. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2017;19(1):657–681. DOI:10.1109/COMST.2016.2611524
6. Bali R.S., Kumar N., Rodrigues J.J. Clustering in vehicular ad hoc networks: taxonomy, challenges and solutions. *Vehicular Communications*. 2014;1(3):134–152. DOI:10.1016/j.vehcom.2014.05.004
7. Khan Z., Koubaa A., Fang S., Lee M.Y., Muhammad K. A Connectivity-Based Clustering Scheme for Intelligent Vehicles. *Applied Sciences*. 2021;11(5):2413. DOI:10.3390/app11052413
8. Abbas F., Liu G. Fan P., Khan Z. An efficient cluster based resource management scheme and its performance analysis for V2X networks. *IEEE Access*. 2020;8:87071–87082. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2992591
9. Jameel F., Javed M.A., Zeadally S., Jantti R. Efficient Mining Cluster Selection for Blockchain-Based Cellular V2X Communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021;22(7):4064–4072. DOI:10.1109/TITS.2020.3006176
10. Abbas F., Fan P., Khan Z. A novel low-latency V2V resource allocation scheme based on cellular V2X communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019;20(6):2185–2197. DOI:10.1109/TITS.2018.2865173
11. Paramonov A., Khayyat M., Chistova N., Muthanna A., Elgendy I.A., Koucheryavy A., et al. An Efficient Method for choosing Digital Cluster Size in Ultralow Latency Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2021;2021:9188658. DOI:10.1155/2021/9188658
12. Luoto P., Bennis M., Pirinen P., Samarakoon S., Horneman K., Latvaaho M. Vehicle clustering for improved enhanced LTE-V2X network performance. *Proceedings of the European Conference on Networks and Communications, EuCNC, 12–15 June 2017, Oulu, Finland*. IEEE; 2017. DOI:10.1109/EuCNC.2017.7980735
13. AlNagar Y., Hosny S., El-Sherif A.A. Proactive Caching for Vehicular Ad hoc Networks Using The City Model. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference Workshop, WCNCW, 15–18 April 2019, Marrakech, Morocco*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/WCNCW.2019.8902590
14. Plotnikov P., Vladyko A. Numerical Analysis of the Mathematical Model of a Cluster V2X-System. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(1):14–23. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-14-23. EDN:JDPDSD
15. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G. *Software Module for Modeling the interaction of Edge Devices in VANET with one- and two-channel connectivity*. Patent RF, no. 2023681939, 06.10. 2023. (in Russ.)
16. Liu L., Chen C., Pei Q., Maharjan S., Zhang Y. Vehicular edge computing and networking: A survey. *Mobile Networks and Applications*. 2021;26:1145–1168. DOI:10.1007/s11036-020-01624-1
17. Fardad M., Muntean G.M., Tal I. A Blockchain-Enabled Vehicular Edge Computing Framework for Secure Performance-oriented V2X Service Delivery. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2024. DOI:10.1109/TVT.2024.3394150
18. Fan W., Su Y., Liu J., Li S., Huang W., Wu F., Liu Y. Joint Task Offloading and Resource Allocation for Vehicular Edge Computing Based on V2I and V2V Modes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023;24(4):4277–4292. DOI:10.1109/TITS.2022.3230430
19. Hou, P., Jiang, X., Lu, Z. et al. Joint computation offloading and resource allocation based on deep reinforcement learning in C-V2X edge computing. *Applied Intelligence*. 2023;53:22446–22466. DOI:10.1007/s10489-023-04637-x
20. Dai Y., Xu D., Maharjan S., Zhang Y., Joint Load Balancing and Offloading in Vehicular Edge Computing and Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019;6(3):4377–4387. DOI:10.1109/JIOT.2018.2876298
21. Guo H., Liu J., Ren J., Zhang Y. Intelligent Task Offloading in Vehicular Edge Computing Networks. *IEEE Wireless Communications*. 2020;27(4):126–132. DOI:10.1109/MWC.001.1900489
22. Cai G., Fan B., Dong Y., Li T., Wu Y., Zhang Y. Task-Efficiency Oriented V2X Communications: Digital Twin Meets Mobile Edge Computing. *IEEE Wireless Communications*. 2024;31(2):149–155. DOI:10.1109/MWC.012.2200465
23. Ye D., Yu R., Pan M., Han Z. Federated Learning in Vehicular Edge Computing: A Selective Model Aggregation Approach. *IEEE Access*. 2020;8:23920–23935. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2968399
24. Luo Q., Li C., Luan T.H., Shi W. Collaborative Data Scheduling for Vehicular Edge Computing via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020;7(10):9637–9650. DOI:10.1109/JIOT.2020.2983660
25. Vladyko A., Tambovtsev G., Podgornaya E., Chelloug S.A., Alkanhel R., Plotnikov P. Cluster-Based Vehicle-to-Everything Model with a Shared Cache. *Mathematics*. 2023;11(13):3017. DOI:10.3390/math11133017
26. Bonomi F. Connected vehicles, the internet of things, and fog computing. *Proceedings of the Eighth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Inter-Networking, VANET 2011, Las Vegas, USA, 23 September 2011*. 2011.
27. Khattak H.A., Islam S.U., Din I.U., Guizani M. Integrating fog computing with VANETs: A consumer perspective. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2019;3(1):19–25. DOI:10.1109/MCOMSTD.2019.1800050
28. Sarrigiannis I., Contreras L.M., Ramantas K., Antonopoulos A., Verikoukis C. Fog-Enabled Scalable C-V2X Architecture for Distributed 5G and Beyond Applications. *IEEE Network*. 2020;34(5):120–126. DOI:10.1109/MNET.111.2000476
29. Alvi A.N., Javed M.A., Hasanat M.H.A., Khan M.B., et al. Intelligent task offloading in fog computing based vehicular networks. *Applied Sciences*. 2022;12(9):4521. DOI:10.3390/app12094521


30. Tonguz O.K., Viriyasitavat W. Cars as roadside units: A self-organizing network solution. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(12):112–120. DOI:10.1109/MCOM.2013.6685766
31. Karunathilake T., Forster A. A survey on mobile road side units in VANETs. *Vehicles*. 2022;4(2):482–500. DOI:10.3390/vehicles4020029
32. Guerna A., Bitam S., Calafate C.T. Roadside unit deployment in internet of vehicles systems: A survey. *Sensors*. 2022;22(9):3190. DOI:10.3390/s22093190
33. Ercan S., Ayaida M., Messai N. How mobile RSUs can enhance communications in VANETs? // Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications, WINCOM, 16–19 October 2018, Marrakesh, Morocco. IEEE; 2018. DOI:10.1109/WINCOM.2018.8629641
34. Lee J., Ahn S. Adaptive configuration of mobile roadside units for the cost-effective vehicular communication infrastructure. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019;2019:6594084. DOI:10.1155/2019/6594084
35. Bitaghsir S.A., Kashipazha S., Dadlani A., Khonsari A. Social-aware mobile road side unit for content distribution in vehicular social networks. *Proceedings of the Symposium on Computers and Communications, ISCC, 29 June 2019 – 03 July 2019, Barcelona, Spain*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/ISCC47284.2019.8969669
36. Reis A.B., Sargento S., Tonguz O.K. Parked cars are excellent roadside units. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017;18(9):2490–2502. DOI:10.1109/TITS.2017.2655498
37. Qin P., Fu Y., Feng X., Zhao X., Wang S., Zhou Z. Energy-efficient resource allocation for parked-cars-based cellular-V2V heterogeneous networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(4):3046–3061. DOI:10.1109/JIOT.2021.3094903
38. Evariste T., Kasakula W., Rwigema J., Datta R. Optimal exploitation of on-street parked vehicles as roadside gateways for social IoV – a case of Kigali City. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2020;6(3):73. DOI:10.3390/joitmc6030073
39. Li G., Ma M., Liu C., Shu Y. Routing in taxi and public transport based heterogeneous vehicular networks. *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, TENCN, 22–25 November 2016, Singapore, Singapore*. IEEE; 2019. p.1863–1866. DOI:10.1109/TENCN.2016.7848344
40. Jiang X., Du D.H.C. Bus-VANET: A bus vehicular network integrated with traffic infrastructure. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2015;7(2):47–57. DOI:10.1109/MITS.2015.2408137
41. Heo J., Kang B., Yang J.M., Paek J., Bahk S. Performance-cost tradeoff of using mobile roadside units for V2X communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019;68(9):9049–9059. DOI:10.1109/TVT.2019.2925849
42. Kim D., Velasco Y., Wang W., Uma R.N., Hussain R., Lee S. A new comprehensive RSU installation strategy for cost-efficient VANET deployment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016;66(5):4200–4211. DOI:10.1109/TVT.2016.2598253
43. Ni Y., Zhao C., Cai L. Hybrid RSU management in cybertwin-IoV for temporal and spatial service coverage. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022;71(5):4596–4606. DOI:10.1109/TVT.2021.3138749
44. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G. Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units. *Proceedings of the Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED, 15–17 November 2023, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2023. DOI:10.1109/TIRVED58506.2023.10332617
45. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G. Numerical Analysis of roadside Units Deployment Models in V2X Communication System. *Proceedings of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communication, 12–14 March 2024, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2024. DOI:10.1109/IEEECONF60226.2024.10496720

Статья поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 24.06.2024.


The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 24.06.2024.

Информация об авторах:

ПЛОТНИКОВ
Павел Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент, 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>

Владыко А.Г. является заместителем главного редактора журнала «Труды учебных заведений связи» с 2023 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.

Vladyko A.G. has been a Deputy editor-in-chief of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" since 2023, 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 has not declared any other conflicts of interest.