

П.В. ПЛОТНИКОВ, Г.И. ТАМБОВЦЕВ, А.Г. ВЛАДЫКО
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ
БАЛАНСИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ V2X-СИСТЕМ**

Плотников П.В., Тамбовцев Г.И., Владыко А.Г. **Математическая модель многокритериальной балансировки параметров V2X-систем.**

Аннотация. Развитие интеллектуальных транспортных систем и внедрение архитектуры Vehicle-to-Everything (V2X) предъявляют высокие требования к характеристикам сетевого взаимодействия, таким как минимальная задержка, высокая надёжность и энергоэффективность. При этом снижение одного из параметров влечет за собой увеличение другого, что делает задачу их сбалансированной настройки актуальной и практически значимой. Особенно важно учитывать не только общую задержку (задержка сети связи и вычислительная задержка) и энергопотребление, но и ожидаемое время прибытия мобильного вычислительного узла на базе транспортного средства – интегрального показателя качества обслуживания в динамически меняющейся среде. В настоящей работе предлагается математическая модель многопараметрической оптимизации параметров функционирования V2X-системы, учитывающая три взаимосвязанных показателя: общую задержку, энергопотребление и ожидаемое время прибытия. Модель формализует структуру транспортной системы в виде ориентированного графа, с заданными маршрутами движения, размещением стационарных и мобильных вычислительных узлов транспортной инфраструктуры, а также параметрами обмена видеоданными между ними и терминальными устройствами. Модель представлена в виде задачи оптимизации и позволяет настраивать систему в соответствии с внешними условиями и прикладными целями. В качестве исследовательского инструмента использованы методы имитационного моделирования с реалистичными сценариями движения транспортных средств и переменной нагрузкой сети связи. Результаты проведённых численных экспериментов позволяют показать, что использование предложенной модели позволит достичь более сбалансированных режимов работы системы, снижая общие задержки и энергозатраты без ухудшения параметров времени прибытия. По сравнению с традиционными подходами, основанными на однокритериальной или двухкритериальной оптимизации, предложенный метод обеспечивает большую адаптивность и устойчивость V2X-систем к изменяющимся условиям функционирования. Сформулированные выводы могут быть полезны исследователям при проектировании и внедрении энергоэффективных и надёжных распределённых архитектур в современных транспортных системах.

Ключевые слова: Vehicle-to-Everything, V2X, многопараметрическая оптимизация, математическое моделирование, интеллектуальные транспортные системы, граничные вычисления, туманные вычисления.

1. Введение. Стремительное развитие беспроводных сенсорных сетей и технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) стало катализатором появления множества промышленных приложений, требующих обработки и хранения большого объема данных. Все они предъявляют жесткие требования к вычислительной мощности устройств и их энергоэффективности. Однако обычные стационарные устройства конечных пользователей часто не обладают достаточным

потенциалом, необходимым для удовлетворения требований к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) таких приложений [1, 2]. В отличие от предыдущих исследований авторов, посвящённых анализу телеметрического трафика [3, 4], в настоящей работе предлагается математическая модель многопараметрической балансировки параметров системы для анализа более ресурсоёмкого сценария – передачи видеопотока. Такой выбор позволяет протестировать модель в условиях повышенной нагрузки сети связи и чувствительности к потерям, а также сопоставить её работу в телеметрических и мультимедийных сценариях. В качестве балансируемых параметров используются общая задержка (задержка сети связи и вычислительная задержка); энергопотребление вычислительных узлов; ожидаемое время прибытия мобильного вычислительного узла на базе транспортного средства.

В современных системах связи для транспортных систем [5, 6] облачные вычисления и высокоскоростные широкополосные сети связи позволяют переложить большинство вычислительных задач на удаленные облачные серверы. Хотя такой подход становится все более распространенным с каждым новым поколением коммуникационных технологий, отправка данных в удаленное облако все еще может приводить к значительным сетевым задержкам. При таком подходе ресурсоемкие задачи передаются на удаленные высокопроизводительные облачные серверы Vehicle Cloud Computing (VCC), использующие централизованную облачную инфраструктуру для обеспечения транспортных средств (ТС) масштабируемыми возможностями обработки, хранения и обслуживания, а также для снижения энергопотребления. Несмотря на свои преимущества, VCC часто подвергается серьезной критике из-за высокой сетевой задержки, что является серьезным ограничением эффективности для приложений, критичных к задержкам, а также зачастую имеют высокие энергозатраты.

Для смягчения этих ограничений для приложений, требующих оперативного реагирования в реальном времени, была разработана парадигма граничных вычислений (Edge Computing, EC), которая оказалась перспективным решением, в том числе для интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [7]. Интегрируя граничные вычисления в транспортные системы, поставщики услуг могут рассчитывать на взаимодействие с ультрамалой задержкой, размещая вычислительные ресурсы ближе к устройствам конечных пользователей на границе сети связи.

За последнее время был предложен ряд подходов к разгрузке вычислений для ТС. Некоторые из них предполагают использование одного сервера, а другие – нескольких серверов. Однако большинство существующих решений по разгрузке задач позволяют ТС передавать свои задачи на один и тот же связанный граничный сервер, что увеличивает сетевую задержку и ограничивает повышение производительности. Кроме того, некоторые из рассматриваемых устройств могут быть не в состоянии выполнять вычисления в отведенное время, требуя при этом высокий уровень энергозатрат. Для преодоления описанных ограничений используются методы кэширования и оптимизации пакетов, чтобы уменьшить объем передаваемых данных в системе.

Несмотря на все преимущества парадигмы граничных вычислений, возникает проблема ее строгой локальности и ограниченности ресурсов конкретных вычислительных устройств. В этой связи, в качестве альтернативы, менее чувствительной к задержкам, была предложена парадигма туманных вычислений (Fog Computing, FOG) [8]. FOG – это архитектурная модель, при которой обработка данных, хранение и сетевые функции частично переносятся с центрального облака на более близкий к источнику данных уровень – «туман», то есть на промежуточные устройства и узлы, расположенные между облаком и конечными устройствами (датчиками, смартфонами, автомобилями и пр.).

Парадигмы граничных и туманных вычислений имеют ряд преимуществ над облачными вычислениями [9, 10], поэтому их комплексное внедрение позволит увеличить скорость работы ИТС, снизить уровень энергопотребления и повысить уровень управляемости динамической системы, в целом. В то же время, улучшение одного из показателей может привести к ухудшению других, что требует поиска компромиссных решений, соответствующих целям конкретной V2X-системы. В настоящем исследовании предлагается подход к решению задачи оптимизации, учитывающий дополнительный параметр – ожидаемое время прибытия мобильного вычислительного узла (Estimated Time of Arrival, ETA), что обеспечивает более гибкий и адаптивный механизм. Решение задачи поиска уравнения баланса нагрузки на объекты V2X-системы может быть найдено посредством внедрения ряда инфраструктурных решений, детальный обзор которых приведен в [11]. Влияние приведенных подходов на эффективность функционирования V2X-систем подробно рассматривается в ряде работ [12 – 15].

В данной статье предлагается решение задачи оптимизации баланса производительности, энергоэффективности и ресурсозатрат для ИТС при использовании V2X-технологии с элементами периферийных вычислений. Построена математическая модель для имитационного моделирования и приведено её численное решение для V2X-системы в конфигурации с традиционным размещением придорожных вычислительных узлов (RSU), использующей двухканальную схему соединения между бортовыми устройствами (OBU) и RSU.

При моделировании применяется трехуровневая вычислительная архитектура взаимодействия элементов V2X-системы [16]. Данная архитектура расширяет существующие стационарные узлы (RSU), добавляя использование подвижных элементов (mRSU) – мобильных вычислительных узлов, которые могут быть размещены на специализированных ТС, которые, в свою очередь образуют динамическую систему туманных вычислений (динамический туман, Dynamic FOG). Внутри тумана – объекты (OBU) являются границами друг для друга и для mRSU. Они используют граничные вычисления для выполнения задач. Для внешних участников (OBU), не имеющих возможности объединиться с mRSU, но имеющих возможность обратиться к одному из участников динамического тумана, образуется FOG.

На рисунке 1 представлен пример рассматриваемой V2X-системы, где синей областью обозначен динамический туман. Синими пунктирными стрелками показаны соединения между участниками этого динамического тумана. Оранжевой пунктирной стрелкой обозначено прямое/опосредованное соединение с участниками динамического тумана. Так, например, OBU3, имея лишь одно соединение с OBU2, имеет возможность обратиться к участникам динамического тумана.

В рамках исследования проводится количественная оценка эффективности работы модели. В частности, анализируется процент необработанных запросов, генерируемых бортовыми устройствами в процессе движения ТС, а также вычисляется общая задержка передачи и обработки запросов в системе OBU–RSU. Приводится оценка энергетических затрат в системе с учетом нагрузки системы реальными данными. Сравнение полученных результатов осуществляется как для случая использования только стационарных RSU, так и с добавлением мобильных RSU (mRSU), рассматриваемых как элементы динамического тумана. Для этого моделируются как целевые, так и случайные траектории движения mRSU с целью оценки их влияния на общую отказоустойчивость и производительность системы.

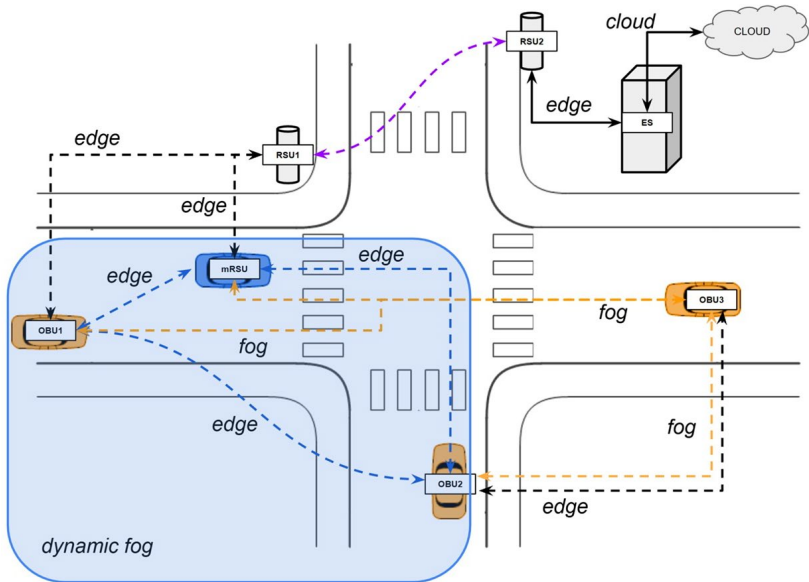


Рис. 1. Пример организации V2X системы

В ряде статей [17 – 21] уже предпринималась достаточно успешные попытки найти баланс между задержкой при передаче данных и энергозатратами системы, но в каждом отдельном случае накладывались ряд ограничений. В данной работе акцент сделан на поиске уравнения баланса по трем параметрам: общая задержка при передаче и обработке задачи, энергетические затраты и ожидаемое время прибытия ETA.

Научная новизна предлагаемого исследования заключается в постановке и численном решении задачи оптимизации балансировки нагрузки V2X-системы с учетом использования периферийных вычислений на базе мобильных вычислительных узлов mRSU, позволяющих уменьшить общую задержку и снизить энергопотребление вычислительных узлов. В частности, учет параметров динамического тумана при решении задач балансировки нагрузки V2X-системы ранее не рассматривался.

Остальная часть статьи построена следующим образом: В разделе 2 представлен обзор существующей литературы в соответствующей предметной области. В разделе 3 сформулировано описание модели системы и применяемого математического аппарата. Представлены основные параметры оптимизируемой системы и получено уравнение баланса между выбранными параметрами.

В разделе 4 представлены и описаны результаты численного моделирования, направленные на подтверждение теоретических выводов и их анализ в различных конфигурациях системы. Наконец, в разделе 5 приводятся заключительные замечания и обсуждение.

2. Обзор связанных исследований и разработок. В этом разделе представлен краткий обзор известных работ по схожей с настоящим исследованием тематике. Выделены основные преимущества и недостатки подходов, разработанных другими авторами.

В работе [17] предложен новый алгоритм балансировки нагрузки, обеспечивающий эффективное перераспределение транспортных средств между RSU с учетом таких параметров, как степень их загрузки, вычислительные ресурсы и скорость передачи данных.

Реализована усовершенствованная стратегия кэширования, позволяющая граничным серверам сохранять результаты выполненных задач, что способствует снижению задержек и энергопотребления. Задача оптимизации формулируется как задача минимизации энергозатрат при соблюдении ограничений по задержке. Ввиду высокой вычислительной сложности данной задачи в условиях крупномасштабных транспортных сетей разработана эквивалентная модель обучения с подкреплением, для которой применён алгоритм глубокого обучения с целью получения оптимальных решений. Отдельное внимание в исследовании уделяется кластерному подходу, позволяющему организовать эффективное взаимодействие компонентов ИТС. При этом рассмотренный подход никак не учитывает загруженность транспортной системы и наличие в ней заторов в реальном времени, то есть балансировка осуществляется с существенной задержкой на основе собранных данных.

Целью исследования в работе [18] является формализация задачи распределения нагрузки в виде двухкритериальной задачи оптимизации и выбор базового метода решения. В рамках предложенного подхода рассматриваются два ключевых критерия оценки вычислительных устройств дорожной инфраструктуры: уровень заряда батареи и остаточный вычислительный ресурс. Последний может быть количественно определён либо через вероятность безотказной работы устройства, либо как величина, обратная интенсивности отказов, при условии, что отказоустойчивость моделируется с использованием экспоненциального закона распределения. На основании этих предпосылок сформулирована модель двухкритериальной оптимизации, учитывающая изменения

топологии телекоммуникационной сети в процессе выполнения пользовательских задач. В соответствии с представленной моделью разработан метод ресурсосбережения в краевом и туманном слоях вычислительной сети, который учитывает динамическую природу сетевой архитектуры, а также относительную важность критериев, определяющих износ и расход ресурсов устройств. При этом несмотря на то, что в работе затрагиваются вопросы топологии сети и энергоэффективности системы, фактор задержки при передаче данных не учитывается.

В работе [19] представлена энергоэффективная архитектура «Vehicular Edge-Cloud Computing», в которой применяется механизм кэширования выполненных задач на уровне граничных серверов. Это позволяет существенно снизить задержки при повторной обработке задач и минимизировать общее энергопотребление при соблюдении заданных ограничений на время отклика. Модель оптимизации, предложенная авторами, демонстрирует высокую эффективность по сравнению с базовыми подходами, однако не рассматривает аспект справедливости распределения нагрузки между вычислительными узлами и не адаптируется к изменяющимся характеристикам устройств в реальном времени.

В работе [20] предложен альтернативный подход, ориентированный на справедливое распределение вычислительной нагрузки между узлами туманной среды. Авторы формализовали метрики задержки и энергопотребления, а также определили количественную меру справедливости планирования задач. В рамках предложенной двухэтапной схемы «Fair Task Offloading», сначала выбираются туманные узлы на основе метрики справедливости, а затем задачи распределяются между выбранными узлами с учетом минимизации задержек. Данный подход обеспечивает более сбалансированное распределение нагрузки, но при этом не учитывает деградацию вычислительных ресурсов устройств, остаточную энергию, надёжность оборудования, а также динамику сети.

В исследовании [21] рассматривается проблема справедливой разгрузки в сетях IoT с поддержкой тумана, особенно для туманных узлов (Fog Nodes, FN), работающих от батарей. Авторы предлагают алгоритм FEMTO, который основан на метрике справедливости и учитывает три ключевых параметра: разгрузку задач, энергопотребление и приоритет узлов. Аналитически выведены оптимальные значения целевых FN, мощности передачи и размера подзадач. Проведено обширное моделирование для гетерогенной сети IoT с поддержкой тумана. Численные результаты показывают, что

предложенный алгоритм FEMTO эффективно определяет FN-целесообразность и минимальное потребление энергии для сервисов разгрузки задач.

Таким образом, существующие методы либо ориентированы на минимизацию энергопотребления [19 – 21], либо на достижение справедливого распределения нагрузки [17, 18], однако комплексная модель, учитывающая остаточные ресурсы, надёжность оборудования и динамическую топологию сети, изучена значительно меньше. Кроме того, большинство существующих моделей оптимизации предполагают статичную топологию вычислительной сети и не учитывают изменение положения и способность к выполнению расчетов вычислительных узлов.

В условиях постоянно изменяющейся сетевой инфраструктуры, характерной для V2X-среды, требуется формализация процессов взаимодействия между компонентами системы с учётом временных, энергетических и пространственных ограничений. Это особенно актуально для гибридных архитектур, включающих как стационарные (RSU), так и мобильные (mRSU) вычислительные узлы, обладающие различным уровнем вычислительных ресурсов и разной степенью доступности.

Для комплексного анализа поведения таких систем и выработки обоснованных стратегий управления была разработана математическая модель, включающая в себя взаимосвязанные подсистемы, каждая из которых отражает определённый аспект функционирования V2X-инфраструктуры.

3. Математическая модель V2X-системы. Описание математической модели представлено в виде совокупности взаимосвязанных компонент, каждая из которых отвечает за определённый аспект функционирования распределённой вычислительной сети транспортной инфраструктуры.

Основу комплексной модели составляют следующие компоненты:

1. Системная модель, описывающая структуру вычислительной сети, характеристики вычислительных узлов, распределение нагрузки и динамику перемещения мобильных компонентов.

2. Коммуникационная модель, формализующая процессы передачи и получения информации, задержки, потери пакетов и загрузку каналов связи.

3. Вычислительная модель – модель обработки данных, включающая параметры энергопотребления, тактовой частоты, объёмов вычислений и времени отклика.

4. Модель ETA – оценочная модель, реализующая ожидаемое время прибытия мобильного вычислительного узла (ETA).

Интеграция этих компонентов позволяет сформировать уравнение баланса, необходимое для количественного анализа производительности системы и адаптивного управления распределением задач в условиях ограниченных ресурсов. Однако, следует заметить, что модель ориентирована на сценарии средней плотности городского трафика. Экстремальные условия, такие как крупные аварии, массовые эвакуации или резкие изменения погодных условий, не моделировались и могут повлиять на точность прогноза ETA. Масштабируемость модели проверялась на ограниченном числе RSU и OBU; при увеличении числа параметров на порядок могут потребоваться иные алгоритмы балансировки и перераспределения нагрузки. В модели задержка в очереди описывается системой M/M/1 без установления приоритетов различных типов трафика, что упрощает оценку, но не учитывает возможное влияние механизмов приоритетного обслуживания (например, для экстренных сообщений). В рамках расчётов рассматривается ограниченное число типов сервисов – видеопоток и сообщения формата CAM, которые характерны для задач мониторинга и ситуационного оповещения в V2X-системах. Передача других типов данных (например, голосовых сообщений, телеметрии высокой частоты или мультимедийных потоков с приоритетом) не моделировалась, что может влиять на распределение ресурсов и параметры общей задержки в реальных смешанных сценариях.

3.1. Системная модель и ее элементы. Для получения уравнения баланса, необходимого для анализа параметров, требуется определить модель исследуемой системы, включая её ключевые элементы и характеристики.

Рассматриваемая V2X-система ориентирована на структуру городской дорожной сети, которая описана в виде ориентированного графа $G = (V, R)$, где V – множество вершин, соответствующих перекрёсткам, а $R \subseteq V \times V$ – множество рёбер, представляющих собой прямолинейные участки дорог. Каждый участок дороги может поддерживать одностороннее или двустороннее движение, однако в рамках модели предполагается однополосное движение с учётом направленности рёбер графа.

Каждому ребру $r_{ij} = (v_i, v_j) \in R$ сопоставляется вес w_{ij} , представляющий длину участка дороги или среднее время проезда с учётом трафика. Возможность двустороннего движения моделируется наличием парных рёбер (v_i, v_j) и (v_j, v_i) с возможными различиями в весах.

Пусть $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ – множество транспортных средств, каждое из которых оборудовано бортовым вычислительным модулем (ОВУ), обеспечивающим телекоммуникационные и вычислительные функции. Для каждого $a_k \in A$ задаётся пара $(s_k, d_k) \in V \times V$, обозначающая стартовую и конечную вершины маршрута. На начальном этапе ОВУ определяет индивидуальный маршрут:

$$RT_k = \{v_{k_1}, v_{k_2}, \dots, v_{k_L}\} \subset V, v_{k_1} = s_k, v_{k_L} = d_k,$$

а маршрут RT_k представляет собой путь, минимизирующий суммарный вес:

$$RT_k = \arg \min_{P=\{v_1, v_2, \dots, v_m\} \in \Omega(s_k, d_k)} \sum_{l=1}^{m-1} w_{v_l v_{l+1}}^{(k)},$$

где $\Omega(s_k, d_k)$ множество допустимых путей от $v_1 = s_k$ до $v_m = d_k$ в графе G .

Таким образом, перед началом движения ТС каждое ОВУ самостоятельно формирует маршрут, основываясь на принципе кратчайшего пути от начальной точки до заданного пункта назначения. При этом маршрут фиксируется заранее и не изменяется в процессе движения, что позволяет формализовать поведение транспортных средств как детерминированное во временном интервале моделирования. Движение ТС в городской среде описывается совокупностью маршрутов на графе G , а ОВУ – агенты, принимающие локальные решения на основе глобальной информации о структуре графа. Данная модель служит основой для дальнейшего построения балансовых уравнений и анализа распределения нагрузки и взаимодействия между элементами ИТС, включая краевые и туманные вычислительные узлы.

Скорости движения ТС представляют собой поток независимых, одинаково распределенных случайных величин. Эти скорости распределены по усеченному нормальному закону распределения [22].

Пусть скорость u каждого OBU на участке дороги (внутри области действия одного RSU) лежит в диапазоне от наперед заданных минимальной до максимальной скорости, то есть

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}.$$

Модель системы рассматривается в условиях дискретного времени $t = 0, 1, 2, \dots$. В каждый момент времени транспортное средство a_k занимает некоторое ребро $r_{ij} \in R$ или вершину $v_j \in V$ графа, переходя между ними с вероятностями, зависящими от текущей загрузки и характеристик дороги. Пусть $p_{ij}^{(k)}(t)$ – вероятность того, что в момент времени t автомобиль a_k перемещается из v_i в v_j .

Обозначим через $\lambda_j(t)$ интенсивность потока транспортных средств, прибывающих в узел v_j в момент времени t . Тогда уравнение баланса потока для вершины v_j записывается следующим образом:

$$\lambda_j(t+1) = \sum_{v_i \in pr(v_j)} \lambda_i(t) p_{ij}(t),$$

где $pr(v_j)$ – множество всех вершин, из которых возможен переход в v_j . Если ввести числовую характеристику $\mu_j(t)$, как интенсивность обработки задач в вычислительном узле, расположенном в v_j , то можно задать функцию $\rho_j(t) = \lambda_j(t) / \mu_j(t)$ – коэффициент загрузки узла. Комплексный подход к минимизации $\rho_j(t)$ позволит оптимизировать задержку, энергопотребление и надежность работы системы.

Рассмотрим набор из S стационарных RSU, размещенных на карте, ассоциированных с определённой вершиной или ребром графа. RSU может взаимодействовать с OBU для разгрузки задач, передачи и сбора телеметрических данных. Каждое RSU $s \in S$ оснащено ограниченным кэшем размера Z_s , который используется для

кэширования обрабатываемых данных. Считаем, что каждое RSU имеет зону покрытия в виде круга диаметром L_s .

3.2. Коммуникационная модель с учетом временных задержек. В качестве запрашиваемого контента в модели рассматриваются видеопоток, передаваемый посредством протокола передачи данных в реальном времени (Real-time Transport Protocol, RTP) [23].

Для оценки качества предоставления видеосервиса необходимо определить пороговое значение потерь пакетов, при превышении которого воспроизведение видео становится невозможным или его качество оказывается неприемлемым для восприятия. Важным этапом в рамках такого анализа является определение структуры видеопотока, а именно: типа и последовательности кадров (I-, P-, B-кадров), формирующих конкретный видеопоток.

Представленный детальный разбор структуры сжатого видеопотока необходим для того, чтобы количественно определить порог «потери» в условиях моделирования. Понимание зависимости качества от потерь пакетов позволяет корректно включить видеотрафик в расчёт функции баланса и сопоставить результаты с телеметрическим сценарием.

Видеопоток организован в группы кадров (group of pictures, GOP) [24], обычно следующих по схеме: «*IBBPBBP...I*». Расстояние между I-кадрами и количеством P/B-кадров внутри GOP определяются требованиями к сжатию, устойчивости к потерям и возможностям декодирования в реальном времени. GOP с большим интервалом между I-кадрами позволяет значительно уменьшить общий битрейт, но делает видеопоток более уязвимым к потерям.

I-кадры, или внутрикадровые изображения, кодируются независимо от других кадров, подобно одиночному изображению. Они используют только пространственное предсказание, не опираясь на данные предыдущих или последующих кадров. Являясь точками доступа в кодированном потоке (group of pictures, GOP), I-кадры играют ключевую роль при восстановлении видеоданных после потерь пакетов.

P-кадры (Predicted-frames) используют межкадровое предсказание: они кодируют только разницу относительно предыдущего I- или P-кадра с помощью векторных предсказаний движения (motion vectors) и остаточных данных.

B-кадры (Bidirectional-frames) применяют двунаправленное предсказание: они кодируют разницу сразу от предыдущего и последующего опорных кадров (I или P).

Потеря I-кадра разрушает все зависимые от него P- и B-кадры до следующего I-кадра, делая даже короткие фрагменты видео нечитаемыми. Потери P-кадров приводят к искажениям в зависимых P/B-кадрах. Потеря B-кадра менее критична, поскольку он не участвует в предсказании других кадров.

С целью анализа видеопотока для дальнейшего моделирования выбран программный инструмент FFmpeg, позволяющий извлечь и проанализировать состав видеок кадров, их тип и периодичность. Полной потерей видео считается, если упущено более 5% пакетов или, если пропущены все или большинство I-кадров, или если битрейт видео в несколько раз превышает скорость скачивания. Для моделирования передачи видеопотока, предварительно зафиксированный сетевой трафик, использования RTP был передан в собственную контролируемую среду [25]. Полученные данные в виде последовательности сетевых пакетов записаны и сохранены для последующей обработки.

Будем предполагать, что каждое RSU или mRSU может обслуживать OBU последовательно. Каждое устройство дорожной инфраструктуры может одновременно обрабатывать до 2 запросов от OBU, так как в модели предполагается использование протокола IEEE 802.11bd, имеющего важное преимущество в виде технологии соединения каналов. Это позволит увеличить скорость передачи данных и снизить задержки и величину потери пакетов [26].

Если OBU покидает область покрытия RSU, то взаимодействие прекращается. OBU может подключиться к следующему RSU, в случае если оно свободно. Считается, что RSU по окончании работы с каким-либо OBU может начать обслуживание следующего мгновенно. Блоки данных, которые не были полностью обработаны при информационном взаимодействии с предыдущим OBU, теряются.

Пусть каждое OBU и каждое RSU формируют информацию в виде вектора M некоррелированных элементов данных,

$$M = \{1, 2, \dots, m\}.$$

Предположим, что все элементы данных имеют одинаковый размер C байтов. Каждое RSU обслуживает подключенное OBU со скоростью α_s байт в секунду.

Описанная коммуникационная модель позволяет сформулировать описание механизма разгрузки задач в туманных и граничных узлах сети. Общая задержка представляет собой сумму нескольких компонент, отражающих как локальные, так и удалённые

вычислительные процессы. Как было представлено выше, задача $M = \{1, 2, \dots, m\}$ разделена на набор подзадач, каждая из которых, либо обрабатывается локально на границе (Edge Node, EN), либо выгружена на туманный узел FN для удалённой обработки.

Общая задержка выполнения i -й подзадачи, обозначаемая как $T_{i,q}$, где $q = e / f$ для EN и FN соответственно, складывается из следующих компонент:

Задержка передачи данных: $T_{i,q}^{td} = \frac{l_{i,q}}{u_{i,q}^{uplink}}$, где $l_{i,q}$ – объём данных

подзадачи (в битах), $u_{i,q}^{uplink}$ – пропускная способность канала связи между OBU и выбранным EN или FN для загрузки.

Пропускная способность канала B_i , на котором осуществляется передача данных, определяется через теорему Шеннона для канала с шумом. Используя передаточную мощность терминала p_i , пропускная способность канала вычисляется следующим образом:

$$B_i = u_{i,q}^{uplink} = \log_2 \left(1 + \frac{p_i \gamma_i \beta_i}{I_i + W N_0} \right),$$

где γ_i – фактор потерь сигнала для данного беспроводного канала, β_i – фактор затемнения, отражающий изменения в интенсивности сигнала, I_i – мощность помех в канале, W – ширина полосы частот, N_0 – спектральная плотность шума. Это выражение учитывает, как физические, так и технические параметры канала, включая расстояние между узлами, атмосферные и другие внешние воздействия, а также характеристики помех и шума.

Для моделирования процессов ожидания обслуживания и вычисления задержки в очереди используется стохастическая модель М/М/1. Если узел смоделирован как М/М/1-система, то средняя задержка в очереди определяется как:

$$T_{i,q}^{queue} = \frac{\rho_{i,q}}{\mu_{i,q}(1 - \rho_{i,q})},$$

где $\mu_{i,q}$ – средняя интенсивность обслуживания, $\rho_{i,q}$ – коэффициент загрузки узла.

Для вычисления полной задержки необходимо учитывать также время обработки задачи на EN или FN:

$$\tau_{i,q}^{comp} = \frac{c_i}{f_{i,q}},$$

где c_i – вычислительная сложность задачи (в CPU-циклах), $f_{i,q}$ – тактовая частота EN или FN.

После завершения обработки необходимо рассчитать время передачи результата обратно на OBU:

$$T_{i,q}^{dd} = \frac{l_{i,q}^{res}}{u_{i,q}^{downlink}},$$

где $l_{i,q}^{res}$ – объём выходных данных, $u_{i,q}^{downlink}$ – пропускная способность канала связи между OBU и выбранным EN или FN для выгрузки.

Учитывая все перечисленные компоненты, можно сформировать общую задержку выполнения i -й подзадачи.

$$T_{i,q} = T_{i,q}^{td} + T_{i,q}^{queue} + \tau_{i,q}^{comp} + T_{i,q}^{dd}.$$

В ряде приложений, выполнение дальнейших операций возможно только после получения полных результатов обработки задачи, поэтому стоит учитывать ограничение на задержку следующего вида:

$$T_q^{total} = \max_i(T_{i,q}).$$

3.3. Вычислительная модель энергетических затрат. Одним из оптимизируемых параметров рассматриваемой задач является величина энергетических затрат на обслуживание функционирования системы OBU-RSU-EC-CLOUD. С ростом интенсивности движения и увеличением числа запросов ожидается увеличение количества вычислений и, как следствие, рост величины энергетических затрат, необходимых для функционирования инфокоммуникационной сети.

Каждое транспортное средство a_k оснащено OBU с ограниченным энергетическим ресурсом.

Будем считать, что на передачу, обработку и прием данных энергия затрачивается с КПД равным 1, то есть без внешних потерь. Расход энергии складывается из трех компонент:

$$E_i^{total} = E_i^{local} + E_i^{offload} + E_{i,q}^{comp},$$

где E_i^{local} – энергии локальных вычислений, $E_i^{offload}$ – энергия на передачу данных, $E_{i,q}^{comp}$ – энергии туманных вычислений.

Рассмотрим более подробно каждое из слагаемых.

1. При расчете локального энергопотребления важно учитывать три фактора: коэффициент энергоэффективности OBU h_i^{loc} , тактовую частоту процессора и вычислительную сложность задачи в циклах CPU.

$$E_i^{local} = h_i^{loc} \cdot c_i \cdot \left(f_i^{loc}\right)^2.$$

2. Энергии передачи напрямую зависит от мощности передатчика и времени обработки запроса, то есть

$$E_i^{offload} = p_i \cdot T_{i,q}^{td}.$$

3. Подсчет затрат энергии на проведение расчетов на удаленном вычислителе рассматриваются аналогично:

$$E_{i,q}^{comp} = h_{i,q}^{off} \cdot c_i \cdot \left(f_{i,q}^{off}\right)^2.$$

Общий баланс энергии OBU в момент времени t описывается выражением:

$$E^{total} = \sum_{i=1}^N \left(E_i^{local} + E_i^{offload} + E_{i,q}^{comp} \right).$$

3.4. Модель оценки ЕТА с учетом ограничений. Построение маршрутов в ИТС традиционно осуществляется на основе минимизации функции стоимости, определяемой суммарным временем проезда по участкам дорожной сети. Такая сеть формализуется в виде ориентированного графа $G = (V, R)$. Каждый маршрут моделируется как путь на графе, состоящий из последовательности рёбер и переходов между ними.

Для поиска оптимального маршрута используется алгоритм A^* , который при наличии эвристической функции обеспечивает быстрое нахождение пути с минимальными издержками. Однако на практике маршруты, построенные только по параметру минимального времени, могут не соответствовать пользовательским ожиданиям: включать, например, неудобные повороты, заезды во дворы или второстепенные улицы. Это связано с тем, что традиционные метрики не учитывают субъективное восприятие удобства и привычки водителей.

С целью повышения качества маршрутов в модель вводятся дополнительные компоненты, отражающие психологические и поведенческие предпочтения водителей. Такие компоненты реализуются в виде штрафов, то есть корректирующих добавок к функции стоимости. Различают два типа ограничений:

1. мягкие ограничения – например, штрафы за выполнение разворота на перекрёстке или проезд по участку с плохим покрытием;
2. жёсткие ограничения – полностью исключающие определённые рёбра из рассмотрения (например, физически закрытые участки).

Функция ожидаемого времени прибытия в расширенном виде принимает следующий вид:

$$ETA(route) = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{t(edge_i)}{f_t(p_{edge_i})} + \sum_{i=1}^{n_2} c^*(turn_i) + \sum_{i=1}^{n_3} r_i^*,$$

где t – базовое время проезда по участку дороги, при этом

$$c^*(turn_i) = \frac{\Delta t_{turn_i}}{f_t(p_{turn_i})}, \quad \Delta t_{turn_i} - \text{штраф за манёвр на повороте } i,$$

p_{turn_i}, p_{edge_i} – эмпирические вероятности прохождения соответствующих сегментов, полученные из пользовательских данных, $f(\bullet), f_t(\bullet)$ – функции веса, штраф за редко используемые пути, r_i^* – дополнительные (контекстные) штрафы.

Для получения эмпирических вероятностей используется сопоставление маршрутов, сгенерированных системой, с фактическими треками движения пользователей (GPS-данными). Если маршрут и реальный трек совпадают на данном участке, это увеличивает значение p_{edge_i} , и, как следствие, снижает относительный вес соответствующего ребра при последующих расчётах. Аналогично оцениваются предпочтения при поворотах.

Данный подход предполагает итеративную коррекцию модели: на каждом этапе строятся маршруты, сравниваются с фактическими треками, обновляются значения p_{edge_i} и p_{turn_i} и уточняется функция стоимости. Целью такого итерационного процесса является минимизация различия между построенными маршрутами и поведением реальных пользователей. При этом система сохраняет гибкость и возможность адаптации к изменяющимся дорожным условиям.

Таким образом, рассмотренный подход сочетает традиционные алгоритмы маршрутизации с эмпирическими оценками пользовательского поведения, реализуя гибкий механизм адаптации маршрутов к реальным условиям и предпочтениям, повышая как объективную эффективность, так и субъективное восприятие качества маршрутов.

3.5. Формулировка задачи баланса. Объединяя три ключевых параметра – общую задержку, энергопотребление и ETA можно сформулировать многопараметрического уравнение баланса:

$$\min_{q \in \{e, f\}} \mathfrak{Z} = \min_{q \in \{e, f\}} \left(\omega_1 T_{q, norm}^{total} + \omega_2 E_{q, norm}^{total} + (1 - \omega_1 - \omega_2) ETA_{norm} \right),$$

где $q \in \{e, f\}$ показывает какая модель взаимодействия рассматривается, $\omega_1, \omega_2 \in [0, 1], \omega_1 + \omega_2 \leq 1$ – приоритетные веса каждой из характеристик. Индекс *norm* означает нормирование каждого ключевого аспекта уравнения баланса. Варьирование коэффициентов ω_1, ω_2 позволяет найти относительный баланс по вкладу компонент в целевую функцию относительно своих минимальных значений.

4. Результаты численного моделирования. Численные результаты строятся на основе ранее полученных данных моделирования. В предыдущих исследованиях [3, 4] авторами была определена средняя величина потерь пакетов для системы, передающей сообщения формата CAM, – эти значения использованы как базовый ориентир. В настоящей работе проводится дополнение модели оценкой

того, как сеть будет вести себя при передаче видеоданных в аналогичных условиях. Для этого, далее проводится анализ предельных возможностей системы при передаче видеоданных, включая определение зон устойчивой работы и точек деградации качества при росте числа подключённых машин. Такой подход позволяет понять, как изменяются характеристики трафика при переходе от передачи коротких телеметрических сообщений к более ресурсоёмким видеопотокам и сопоставить поведение системы в обоих сценариях.

Условия для моделирования остались неизменными: при формировании маршрута каждое OBU определяет целевую точку назначения, которая остаётся неизменной в течение всего пути. Путь к цели может адаптироваться в процессе движения: при обнаружении затора на участке дороги выполняется перестроение маршрута с использованием алгоритма A^* , что позволяет учитывать локальные изменения трафика. Источниками заторов в модели выступают только заранее определённые события – замедления или кратковременные остановки транспортных средств (с вероятностью 1:10 на 1–5 секунд), создающие цепочку пробок. При этом не моделируются непредсказуемые внешние воздействия (экстремальные погодные условия, массовые эвакуации, появление новых объектов в сети), что является одним из ограничений модели.

Для обеспечения достоверности моделирования сетевого трафика были проведены эксперименты, заключающиеся в физической передаче видеоданных с последующим анализом сетевого трафика с помощью программного инструмента WireShark. В результате экспериментов было зафиксировано общее количество сетевых пакетов, необходимых для передачи заданного видеофайла с заранее установленными параметрами скорости передачи данных и битрейта. Именно эти экспериментально полученные данные служат ориентиром для имитации передачи пакетов в модели.

В рамках эксперимента, для задания видеотрафика, используется тестовая видеопоследовательность «Akiyo», закодированная с использованием кодека libx264 при среднем битрейте 500 кбит/с [27]. Структура GOP представлена в следующем виде: I-, B- и P-кадры чередуются в определённой последовательности. Согласно анализу, получены следующие количественные характеристики:

I-кадров: 2, P-кадров: 216, B-кадров: 82.

Ниже приведена последовательность типов кадров (фрагмент выборки): «*IBPPPPBPPP...*». Такое распределение отражает высокую

плотность межкадрового предсказания: большинство кадров являются Р- или В-типов, опирающихся на один или два опорных кадра соответственно. Учитывая наличие всего двух I-кадров на весь видеопоток, утрата любого из них приведёт к невозможности декодирования целых фрагментов видео между GOP.

Для оценки параметров передаваемого видеопотока дополнительно зафиксированы следующие характеристики:

- Bitrate (заданный): 500 кбит/с
- Количество переданных пакетов: 581
- Средняя скорость передачи: 498.66 кбит/с
- Общий объём переданных данных: 4 986 624 бит (~ 623 328 байт).

При анализе передачи видеопотока с различными значениями битрейта необходимо учитывать, что увеличение битрейта приводит к росту объёма передаваемых данных, а также числа сетевых пакетов, необходимых для доставки полного файла, что отражено на рисунке 2.

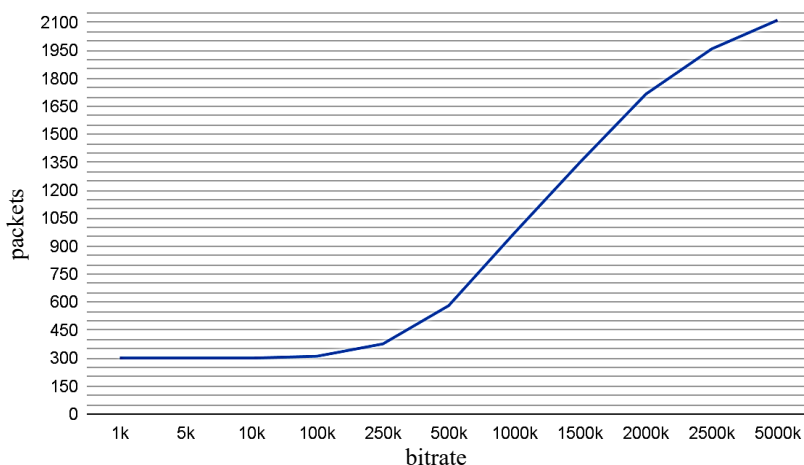


Рис. 2. Зависимость количества пакетов от битрейта

Существенное значение имеет соотношение между заданным битрейтом видеопотока и доступной скоростью получения данных конечным узлом. В случае, если пропускная способность канала оказывается ниже требуемого битрейта, наблюдаются значительные потери пакетов, приводящие к снижению качества видеопотока вплоть до его полной непригодности к использованию.

При проведении численного моделирования рассматривается беспроводной канал шириной 20 МГц с применением протокола IEEE 802.11bd. Выбор схемы модуляции осуществляется с учетом отношения сигнал/шум (SNR), которое определяет способность системы различать полезный сигнал на фоне фоновых шумов. Повышенное значение SNR свидетельствует о более чистом приёме сигнала, что позволяет применять модуляции более высокого порядка и, соответственно, достигать большей скорости передачи данных [28]. Низкоуровневые модуляции (BPSK, QPSK) обеспечивают стабильную передачу на малом количестве пользователей, но быстро деградируют по мере роста числа машин. Модуляции высокого порядка (например, 1024-QAM 3/4) обеспечивают максимальную пропускную способность на одного пользователя, но требуют высоких значений SNR, вследствие чего применимы только при минимальной нагрузке или высококачественном канале.

На рисунке 3 представлена предельная способность сети по передаче видеопотока с заданным битрейтом в зависимости от количества обслуживаемых транспортных средств, подключённых к одной RSU.

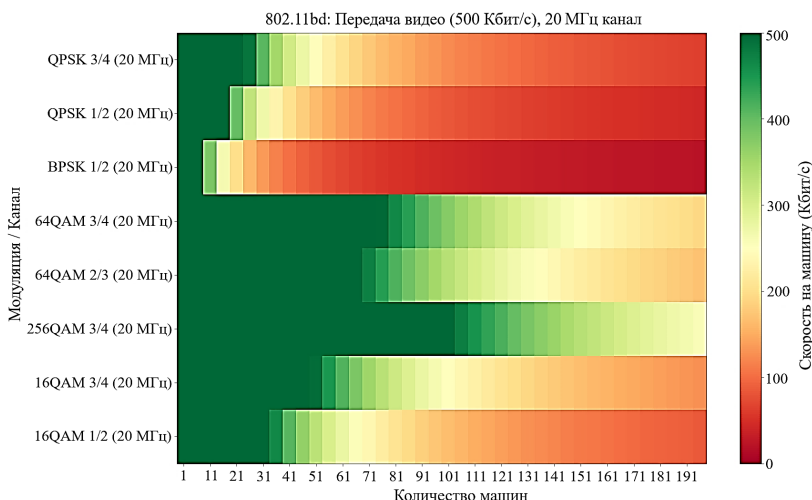


Рис. 3. Предельная способность сети по передаче видеопотока с заданным битрейтом на одно RSU

Зелёная зона (скорость передачи более 500 Кбит/с) указывает на участки, где возможна устойчивая передача видеопотока без потерь.

Здесь используются как устойчивые схемы модуляции (например, QPSK 3/4), так и более производительные (например, 256-QAM 3/4) при ограниченном числе машин.

Жёлтая зона (200–400 Кбит/с) свидетельствует о частичной деградации качества: при превышении определённого порога количества пользователей модуляция становится недостаточно эффективной для поддержания необходимого битрейта.

Красная зона (менее 100 Кбит/с) демонстрирует непригодность схемы модуляции для данной нагрузки: при числе машин выше определённого предела скорость падает настолько, что не может обеспечить даже базовое качество видео.

Энергопотребление при передаче данных в беспроводных сетях определяется не только продолжительностью передачи, но и эффективностью используемой модуляции, а также доступной пропускной способностью канала. На рисунке 4 визуализированы энергетические затраты на передачу видеопотока объёмом 0.5 Мбит при использовании канала шириной 20 МГц и протокола IEEE 802.11bd.

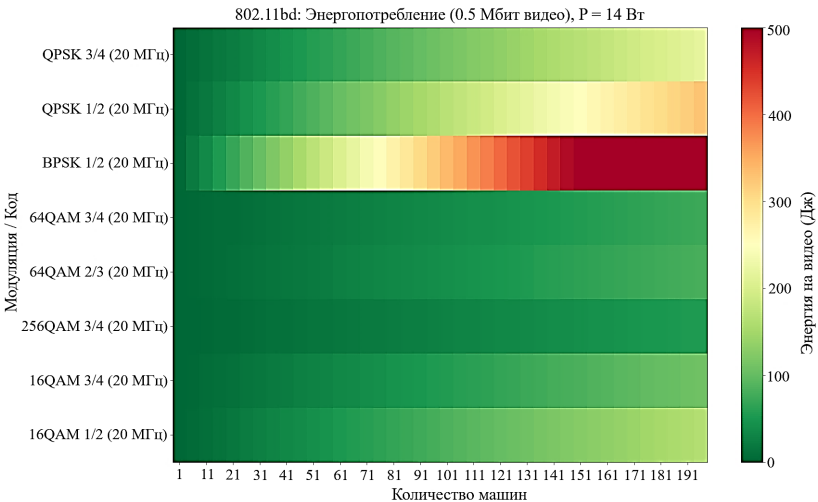


Рис. 4. Энергетические затраты на передачу видеопотока

Значения на графике интерпретируются следующим образом: чем выше энергия на одно видео (в джоулях), тем менее энергоэффективна схема передачи при заданной нагрузке. Заметно, что схемы с низкоуровневыми модуляциями (например, BPSK 1/2 и

QPSK 1/2) демонстрируют существенно более высокое потребление энергии при увеличении количества подключённых устройств. Это объясняется необходимостью более длительной передачи, обусловленной низкой физической скоростью передачи данных (PHY-rate), что при фиксированной мощности приводит к росту общего энергопотребления. В отличие от них, высокоуровневые модуляции, такие как 64-QAM и 256-QAM, позволяют существенно сократить энергетические затраты за счёт более высокой пропускной способности, даже при увеличенном числе пользователей. Однако эти схемы требуют стабильного канала и высокого значения SNR, что ограничивает их применение в условиях подвижной среды и радиопомех. Таким образом, для достижения оптимального баланса между энергоэффективностью и стабильностью связи, выбор схемы модуляции должен быть адаптивным, опирающимся как на текущую загрузку RSU, так и на измеренные характеристики канала.

Рассмотрим значения параметров моделирования. Для задержки прибытия mRSU, учитывая динамическое перераспределение нагрузки, показатель ETA применяются следующие допущения: согласно ранее опубликованному результату [16], прибытие mRSU в перегруженную зону позволяет достичь разгрузки до 20%. Исходя из этого, вероятность прибытия mRSU в зону покрытия конкретного OBU принимается равной 0.2 (20%). В случае, если mRSU уже находится в зоне, показатель ETA принимается равным нулю. Для оставшихся 80% вероятность распределяется по нормальному закону, при этом предельное значение расстояния установлено на уровне 1.5 км. При средней скорости движения mRSU, составляющей 30 км/ч, формируется аппроксимация временного окна прибытия, используемая в вычислениях задержки.

Передача видеопотока осуществляется с битрейтом 500 Кбит/с и длительностью 10 секунд, что формирует общий размер данных, равный 0.5 Мбит. Расчёт энергетических затрат на обработку и передачу видеопотока основывается на формулах из пункта 3.3., где

- Тактовая частота центрального процессора RSU $716 \cdot 10^6$ Гц.
- Средняя потребляемая мощность узла 14 Вт.
- Количество процессорных тактов на обработку одного байта информации – 500.

Общее количество обслуживаемых транспортных средств (OBU) в пределах одной станции RSU колеблется от 20 до 30. Используемый канал связи имеет ширину 20 МГц. При этом уровень отношения сигнал/шум на участке принимается равным 10 дБ, что

накладывает ограничения на допустимые схемы модуляции и снижает спектральную эффективность по сравнению с высокочастотными участками.

Для комплексного анализа характеристик сети в условиях различной нагрузки важно учитывать не только параметры задержки и пропускной способности, но и надёжность передачи данных. Одним из ключевых показателей, характеризующих надёжность радиоканала, является коэффициент потерь пакетов (Packet Error Rate, PER). Он отражает долю пакетов, не доставленных корректно до получателя, и непосредственно влияет на целостность медиапотока, особенно в приложениях реального времени – таких как видеотрансляции. На рисунке 5 отображена зависимость PER от количества подключённых транспортных средств (OBU) к одной RSU.



Рис. 5. Зависимость PER от количества подключённых транспортных средств (OBU) к одной RSU

Как видно из графика, при количестве машин менее 25 наблюдается практически полное отсутствие потерь, что свидетельствует о достаточной пропускной способности радиоканала и эффективной обработке пакетов на уровне MAC (Media Access Control, MAC) и PHY. Однако начиная с 26 и особенно после 27 машин на RSU наблюдается резкий рост PER. Уже при 28 устройствах потери достигают 10%, а при 30 – превышают 16%, что является критическим значением для мультимедийного трафика. Такие потери делают видеопоток практически непригодным для потребления, вызывая артефакты и прерывания воспроизведения.

Полученные результаты указывают на наличие порогового значения нагрузки на RSU, превышение которого приводит к экспоненциальному росту потерь пакетов. Для устойчивой передачи видео при заданных параметрах канала (20 МГц, 802.11bd, битрейт 500 Кбит/с), допустимое количество одновременных подключений к одной базовой станции не должно превышать 25 машин. Это значение должно учитываться при проектировании архитектуры сетей V2X и распределении нагрузки между RSU и mRSU.

В исследовании были рассмотрены следующие варианты:

- Равный приоритет [0.33, 0.33, 0.33] – Сценарий, в котором система стремится сбалансировать все параметры без акцента на какой-либо из них. Этот подход универсален, но может уступать в экстремальных условиях.

- Приоритет DELAY [0.5, 0.25, 0.25] – Нацелен на минимизацию задержек, что особенно актуально для критически чувствительных к времени приложений (например, управления движением или видеоконференций в реальном времени).

- Приоритет ENERGY [0.25, 0.5, 0.25] – Подходит для сценариев с ограниченными энергетическими ресурсами, например, при длительной автономной работе RSU.

- Приоритет ETA [0.25, 0.25, 0.5] – Предпочтителен в условиях высокой мобильности или частого прибытия/ухода mRSU, так как минимизация ETA позволяет оперативно перераспределять нагрузку и предсказывать оптимальные интервалы передачи.

- Без ETA [0.5, 0.5, 0] – Этот подход исключает параметр ETA, что снижает способность системы учитывать динамику мобильных узлов. Как показывают результаты, именно этот вариант демонстрирует наихудшие показатели в условиях высокой плотности трафика.

На рисунке 6 отображена зависимость метрики FFF (общая задержка – «Delay», энергопотребление – «Energy», ETA) от количества машин, подключённых к одной RSU. Можно отметить, что при небольшом числе подключённых машин (20–23) различия между стратегиями невелики, что обусловлено низкой загрузкой канала и отсутствием существенных конфликтов в передаче. Однако с увеличением числа машин эффективность стратегии «Без ETA» (фиолетовый) быстро деградирует: метрика FFF существенно возрастает, что свидетельствует о снижении общей эффективности передачи. В то же время стратегии с учётом ETA демонстрируют стабильно более низкие значения FFF, особенно в сценарии с приоритетом ETA (красный цвет), что говорит о преимуществе в

условиях ограниченного ресурса и подвижной инфраструктуры. Стратегия с приоритетом по энергопотреблению (зелёный) показывает среднюю эффективность, уступая по задержке и ожидаемому времени прибытия mRSU.

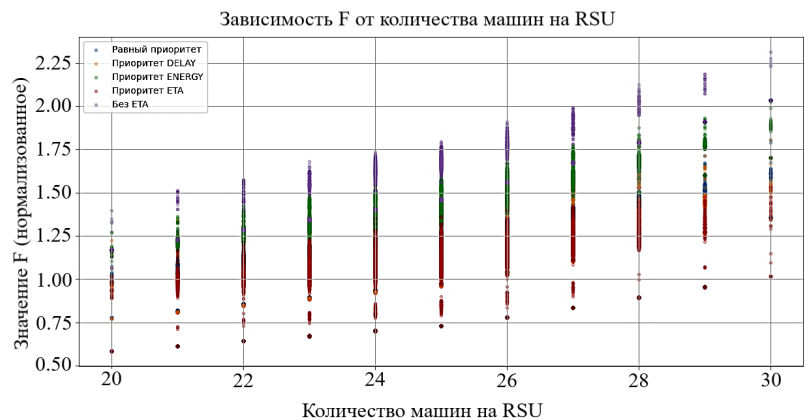


Рис. 6. Зависимость метрики FFF от количества машин, подключённых к одной RSU

На рисунке 7 представлена связь между метрикой FFF и уровнем потерь пакетов (PER).

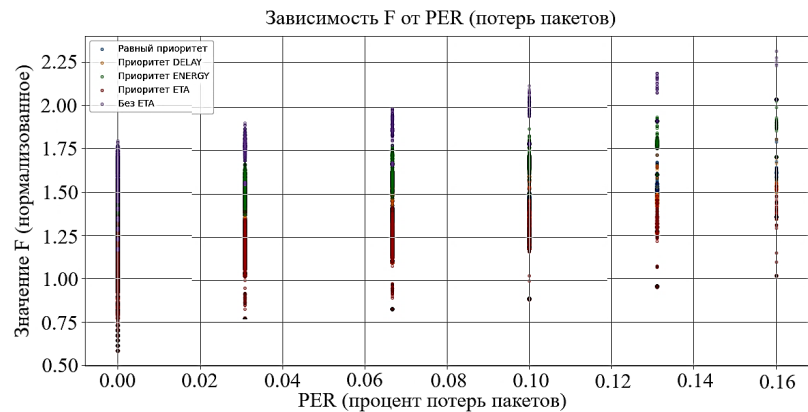


Рис. 7. Связь между метрикой FFF и уровнем потерь пакетов (PER)

Здесь отчётливо прослеживается, что при возрастании PER значение FFF также увеличивается, особенно в сценариях, не

учитывающих ЕТА. Это подтверждает, что потери пакетов критически влияют на общую производительность системы. Сценарии, учитывающие ЕТА (особенно с его приоритетом), демонстрируют наименьшее увеличение FFF при росте PER, что подчёркивает устойчивость этих подходов к ухудшению условий канала. В противоположность им, равный приоритет и особенно «Без ЕТА» теряют эффективность при даже умеренных потерях, что делает их менее подходящими для подвижных и нестабильных сетей.

5. Заключение. В представленной работе разработана математическая модель многопараметрической балансировки параметров функционирования V2X-системы, направленная на совместную оптимизацию трёх ключевых характеристик: задержки передачи, энергопотребления и ожидаемого времени прибытия вычислительного ресурса. Центральной задачей исследования стало построение уравнения баланса, отражающего взаимосвязь между этими параметрами в условиях ограниченной пропускной способности и переменной сетевой нагрузки.

Вклад авторов можно обобщить следующим образом:

1. Представлено обобщение входных данных оптимизационной задачи балансировки нагрузки для системы OBU-RSU-EC-CLOUD с классификацией их на компоненты: универсальные данные (влияющие на энергопотребление и общую задержку), и данные, ориентированные на мобильность системы.

2. Предложена задача оптимизации балансировки нагрузки и распределения ресурсов, при этом цель оптимизации заключается в минимизации общей задержки ответа для всех задач в период оптимизации.

3. Представлены результаты моделирования на примере балансировки нагрузки при выгрузке данных типа «Real-Time Video Streaming» по средствам протокола RTP, подтверждающие рациональность использования предложенного подхода к решению поставленной задачи оптимизации.

Модель формализует структуру транспортной системы в виде ориентированного графа, с заданными маршрутами движения, размещением стационарных (RSU) и мобильных (mRSU) вычислительных узлов, а также параметрами обмена видео между ними и терминальными устройствами (OBU). Имитационная модель [25], созданная в рамках работы, позволила рассчитать задержки, потери и энергозатраты при различных сценариях передачи, учитывающих ширину канала, количество обслуживаемых устройств и уровень сигнала (SNR). Отдельные параметры, использованные в

уравнении, были получены в результате моделирования, другие – верифицированы на основе ранее опубликованного результата [4]. Эти данные были скомбинированы и интегрированы в аналитическую модель.

Для оценки эффективности передачи использовалась многопараметрическая функция, позволяющая варьировать весовые коэффициенты между тремя показателями. Это дало возможность адаптировать поведение системы под конкретные условия эксплуатации: например, в условиях высокой плотности трафика особую значимость приобретает ETA, тогда как в условиях энергодефицита целесообразно смещать приоритет в сторону минимизации энергопотребления. Введённая метрика FFF обеспечила количественную оценку различных сценариев балансировки, а численные эксперименты подтвердили применимость подхода в задачах выбора оптимального маршрута и ресурса передачи.

Проведённое исследование показало, что функция баланса применима как к телеметрическим, так и к мультимедийным (видеопоток) сценариям, адекватно отражая изменения производительности системы при смене типа трафика. Использование ранее измеренных параметров потерь для телеметрических сообщений в моделировании видеопотока позволило провести прямое сопоставление и подтвердить универсальность предложенного подхода. Полученные результаты важны для проектирования V2X-систем, способных стабильно работать при разных профилях трафика и уровнях нагрузки.

Таким образом, в результате исследования была сформирована прикладная и формализованная модель баланса в V2X-системах, обеспечивающая обоснованную оценку эффективности передачи данных с учётом комплексных ограничений. Полученные результаты могут быть использованы при построении архитектур интеллектуальных транспортных систем, включающих распределённые вычислительные механизмы, и при разработке адаптивных стратегий управления нагрузкой в реальных условиях эксплуатации. В будущих работах авторами планируется постановка серии имитационных тестов на комплекте V2X-оборудования для оценки эффективности разработанной модели.

Литература

1. Singh M., Baranwal G. Quality of Service (QoS) in Internet of Things // Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU). 2018. pp. 1–6.
2. Singh S.P., Singh P., Diwakar M., Kumar P. Improving quality of service for Internet of Things (IoT) in real life application: A novel adaptation-based Hybrid Evolutionary Algorithm // Internet of Things. 2024. vol. 27.

3. Vladkyo 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. no. 13.
4. Vladkyo A., Plotnikov P., Tambovtsev G. Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure // *Network*. 2025. vol. 5. no. 1.
5. Aldhanhani T., Abraham A., Hamidouche W., Shaaban M. Future Trends in Smart Green IoV: Vehicle-to-Everything in the Era of Electric Vehicles // *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2024. vol. 5. pp. 278–297.
6. Dhinesh Kumar R., Rammohan A. Revolutionizing Intelligent Transportation Systems with Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) technology: Current trends, use cases, emerging technologies, standardization bodies, industry analytics and future directions // *Vehicular Communications*. 2023. vol. 43. DOI: 10.1016/j.vehcom.2023.100638.
7. Kong X., Wu Y., Wang H., Xia F. Edge Computing for Internet of Everything: A Survey // *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. vol. 9. no. 23. pp. 23472–23485.
8. Mukherjee M., Shu L., Wang D. Survey of Fog Computing: Fundamental, Network Applications, and Research Challenges // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2018. vol. 20. no. 3. pp. 1826–1857.
9. Caiazza C., Giordano S., Luconi V., Vecchio A. Edge computing vs centralized cloud: Impact of communication latency on the energy consumption of LTE terminal nodes // *Computer Communications*. 2022. vol. 194. pp. 213–225.
10. Ruchika Chhillar R.S. Performance Evaluation of Hybrid Cloud-Fog Computing Architectures in Smart Home IoT Environments: A Comparative Simulation Study across Multiple Tools // *Journal of Grid Computing*. 2025. vol. 23. DOI: 10.1007/s10723-025-09802-9.
11. Плотников П.Б., 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.
12. Bali R.S., Kumar N., Rodrigues J.J. Clustering in vehicular ad hoc networks: taxonomy, challenges and solutions // *Vehicular Communications*. 2014. vol. 1. no. 3. pp. 134–152.
13. Cooper C., Franklin D., Ros M., Safaei F., Abolhasan M. A Comparative Survey of VANET Clustering Techniques // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2016. vol. 19. no. 1. pp. 657–681.
14. Raza S., Wang S., Ahmed M., Anwar M.R. A survey on vehicular edge computing: architecture, applications, technical issues, and future directions // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019. vol. 2019(1).
15. Hou X., Li Y., Chen M., Wu D., Jin D., Chen S. Vehicular Fog Computing: A Viewpoint of Vehicles as the Infrastructures // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. vol. 65. no. 6. pp. 3860–3873.
16. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladkyo A.G. Evaluating the Performance of Using Mobile Roadside Units for Task Offloading in V2X Systems // *Proceedings of the Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. 2024. pp. 1–4.
17. Elgendy I.A., Muthanna A., Alshahrani A., Hassan D.S.M., Alkanhel R., Elkawkagy M. Optimizing Energy Efficiency in Vehicular Edge-Cloud Networks Through Deep Reinforcement Learning-Based Computation Offloading // *IEEE Access*. 2024. vol. 12. pp. 191537–191550.
18. Клименко А.Б. Двухкритериальный метод обеспечения ресурсосбережения в краевом и туманном слоях сети // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023. Т. 23. № 1. С. 85–94.
19. Elgendy I.A., Khakimov A., Muthanna A. Energy-Efficient Framework for Task Caching and Computation Offloading in Multitier Vehicular Edge-Cloud Systems // *Lecture Notes in Computer Science*. Springer. 2025. vol. 15460. pp. 42–53.

20. Zhang G., Shen F., Yang Y., Qian H., Yao W. Fair Task Offloading among Fog Nodes in Fog Computing Networks // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). 2018. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422316.
21. Zhang G., Shen F., Liu Z., Yang Y., Wang K., Zhou M.T. FEMTO: Fair and Energy-Minimized Task Offloading for Fog-Enabled IoT Networks // IEEE Internet of Things Journal. 2019. vol. 6. no. 3. pp. 4388–4400.
22. Abuelenin S.M., Abul-Magd A.Y. Empirical study of traffic velocity distribution and its effect on VANETs connectivity // Proceedings of 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). 2014. pp. 391–395.
23. Schulzrinne H., Rao A., Lanphier R., Westerlund M., Stiemerling M. Real-Time Streaming Protocol Version 2.0. RFC 7826. 2016.
24. Lee J., Shin I., Park H. Adaptive Intra-Frame Assignment and Bit-Rate Estimation for Variable GOP Length in H.264 // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2006. vol. 16. no. 10. pp. 1271–1279.
25. Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladko A. VANET Ver. 2.0.0 – Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices, 2024. URL: <https://github.com/quanuhs/VANET> (дата обращения: 11.09.2025).
26. Iliopoulos C., Iossifides A., Foh C.H., Chatzimisios P. IEEE 802.11 bd for Next-Generation V2X Communications: From Protocol to Services // IEEE Communications Standards Magazine. 2025. vol. 9. no. 2. pp. 88–98.
27. Jiang X., He P., Sun T., Xie F., Wang S. Detection of Double Compression With the Same Coding Parameters Based on Quality Degradation Mechanism Analysis // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2017. vol. 13. no. 1. pp. 170–185.
28. Xue S., Gong S., Li X. A Comparative Study of IEEE 802.11bd and IEEE 802.11p on the Data Dissemination Properties in Dynamic Traffic Scenarios // Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 5.

Плотников Павел Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра высшей математики, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Область научных интересов: математическое моделирование, телекоммуникационные системы транспортных средств, vehicle-to-everything. Число научных публикаций — 57. plotnikov.pv@sut.ru; проспект Большевиков, 22/1, 193232, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)305-1218.

Тамбовцев Глеб Ильич — аспирант, инженер, студенческое конструкторское бюро, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Область научных интересов: программная инженерия, математическое моделирование, телекоммуникационные системы транспортных средств. Число научных публикаций — 17. tambovcev.gi@sut.ru; проспект Большевиков, 22/1, 193232, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)326-3163.

Владыко Андрей Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, декан факультета, факультет радиоэлектронных систем и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Область научных интересов: телекоммуникационные системы транспортных средств, vehicle-to-everything, граничные и туманные вычисления. Число научных публикаций — 158. [vladyko@sut.ru](mailto:vladko@sut.ru); проспект Большевиков, 22/1, 193232, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)305-1263.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00304, <https://rscf.ru/project/24-29-00304/>.

P. PLOTNIKOV, G. TAMBOVTSEV, A. VLADYKO
**MATHEMATICAL MODEL OF MULTI-CRITERIA BALANCING
 OF V2X-SYSTEM PARAMETERS**

Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladiko A. Mathematical Model of Multi-Criteria Balancing Of V2X-System Parameters.

Abstract. The development of intelligent transportation systems and the introduction of V2X (Vehicle-to-Everything) architecture place high demands on the characteristics of network communication, such as minimum latency, high reliability, and energy efficiency. At the same time, a decrease in one of the parameters entails an increase in another, which makes the task of their balanced tuning relevant and practically significant. It is especially important to consider not only the total delay (communication network delay and computational delay) and energy consumption, but also the expected arrival time of a mobile computing node based on a vehicle, which is an integral indicator of service quality in a dynamically changing environment. In this paper, we propose a mathematical model for multi-parameter optimization of V2X-system operation parameters that takes into account three interrelated indicators: total delay, energy consumption, and expected arrival time. The model formalizes the structure of the transport system as a directed graph with specified traffic routes, the location of stationary and mobile computing nodes of the transport infrastructure, and the parameters of video data exchange between them and terminal devices. The model is presented as an optimization problem and allows tuning the system according to external conditions and application goals. Simulation modeling methods with realistic vehicle traffic scenarios and variable network load are used as a research tool. The results of numerical experiments demonstrate that the use of the proposed model will allow achieving more balanced modes of system operation, reducing the total delays and energy consumption without deterioration of the arrival time parameters. Compared to traditional approaches based on single- or two-criteria optimization, the proposed method provides greater adaptability and stability of V2X systems to changing operating conditions. The findings can be useful for researchers in designing and implementing energy-efficient and reliable distributed architectures in modern transportation networks.

Keywords: V2X systems, multi-parameter optimization, mathematical modeling, intelligent transportation systems, edge computing, fog computing.

References

1. Singh M., Baranwal G. Quality of Service (QoS) in Internet of Things. Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU). 2018. pp. 1–6.
2. Singh S.P., Singh P., Diwakar M., Kumar P. Improving quality of service for Internet of Things (IoT) in real life application: A novel adaptation-based Hybrid Evolutionary Algorithm. Internet of Things. 2024. vol. 27.
3. Vladiko 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. no. 13.
4. Vladiko A., Plotnikov P., Tambovtsev G. Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure. Network. 2025. vol. 5. no. 1.
5. Aldhanhani T., Abraham A., Hamidouche W., Shaaban M. Future Trends in Smart Green IoV: Vehicle-to-Everything in the Era of Electric Vehicles. IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2024. vol. 5. pp. 278–297.

6. Dhinesh Kumar R., Rammohan A. Revolutionizing Intelligent Transportation Systems with Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) technology: Current trends, use cases, emerging technologies, standardization bodies, industry analytics and future directions. *Vehicular Communications*. 2023. vol. 43. DOI: 10.1016/j.vehcom.2023.100638.
7. Kong X., Wu Y., Wang H., Xia F. Edge Computing for Internet of Everything: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. vol. 9. no. 23. pp. 23472–23485.
8. Mukherjee M., Shu L., Wang D. Survey of Fog Computing: Fundamental, Network Applications, and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2018. vol. 20. no. 3. pp. 1826–1857.
9. Caiazza C., Giordano S., Luconi V., Vecchio A. Edge computing vs centralized cloud: Impact of communication latency on the energy consumption of LTE terminal nodes. *Computer Communications*. 2022. vol. 194. pp. 213–225.
10. Ruchika Chhillar R.S. Performance Evaluation of Hybrid Cloud-Fog Computing Architectures in Smart Home IoT Environments: A Comparative Simulation Study across Multiple Tools. *Journal of Grid Computing*. 2025. vol. 23. DOI: 10.1007/s10723-025-09802-9.
11. Plotnikov P.V., Vladyko A.G. [Analysis of approaches to V2X-systems optimization: clustering, edge and fog computing]. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi – Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024. vol. 10. no. 3. pp. 7–22. (In Russ.).
12. Bali R.S., Kumar N., Rodrigues J.J. Clustering in vehicular ad hoc networks: taxonomy, challenges and solutions. *Vehicular Communications*. 2014. vol. 1. no. 3. pp. 134–152.
13. Cooper C., Franklin D., Ros M., Safaei F., Abolhasan M. A. Comparative Survey of VANET Clustering Techniques. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2016. vol. 19. no. 1. pp. 657–681.
14. Raza S., Wang S., Ahmed M., Anwar M.R. A survey on vehicular edge computing: architecture, applications, technical issues, and future directions. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019. vol. 2019(1).
15. Hou X., Li Y., Chen M., Wu D., Jin D., Chen S. Vehicular Fog Computing: A Viewpoint of Vehicles as the Infrastructures. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. vol. 65. no. 6. pp. 3860–3873.
16. Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G. Evaluating the Performance of Using Mobile Roadside Units for Task Offloading in V2X Systems. *Proceedings of the Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. 2024. pp. 1–4.
17. Elgendy I.A., Muthanna A., Alshahrani A., Hassan D.S.M., Alkanhel R., Elkawkagy M. Optimizing Energy Efficiency in Vehicular Edge-Cloud Networks Through Deep Reinforcement Learning-Based Computation Offloading. *IEEE Access*. 2024. vol. 12. pp. 191537–191550.
18. Klimenko A.B. [A two-criteria method to ensure resource conservation in the edge and fog layers of the network]. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023. vol. 23. no. 1. pp. 85–94.
19. Elgendy I.A., Khakimov A., Muthanna A. Energy-Efficient Framework for Task Caching and Computation Offloading in Multitier Vehicular Edge-Cloud Systems. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer. 2025. vol. 15460. pp. 42–53.
20. Zhang G., Shen F., Yang Y., Qian H., Yao W. Fair Task Offloading among Fog Nodes in Fog Computing Networks. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2018. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422316.
21. Zhang G., Shen F., Liu Z., Yang Y., Wang K., Zhou M.T. FEMTO: Fair and Energy-Minimized Task Offloading for Fog-Enabled IoT Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. vol. 6. no. 3. pp. 4388–4400.

22. Abuelenin S.M., Abul-Magd A.Y. Empirical study of traffic velocity distribution and its effect on VANETs connectivity. Proceedings of 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). 2014. pp. 391–395.
23. Schulzrinne H., Rao A., Lanphier R., Westerlund M., Stiemerling M. Real-Time Streaming Protocol Version 2.0. RFC 7826. 2016.
24. Lee J., Shin I., Park H. Adaptive Intra-Frame Assignment and Bit-Rate Estimation for Variable GOP Length in H.264. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2006. vol. 16. no. 10. pp. 1271–1279.
25. Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladiko A. VANET Ver. 2.0.0 – Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices, 2024. Available at: <https://github.com/quanhs/VANET> (accessed 11.09.2025).
26. Iliopoulos C., Iossifides A., Foh C.H., Chatzimisios P. IEEE 802.11 bd for Next-Generation V2X Communications: From Protocol to Services. IEEE Communications Standards Magazine. 2025. vol. 9. no. 2. pp. 88–98.
27. Jiang X., He P., Sun T., Xie F., Wang S. Detection of Double Compression With the Same Coding Parameters Based on Quality Degradation Mechanism Analysis. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2017. vol. 13. no. 1. pp. 170–185.
28. Xue S., Gong S., Li X. A Comparative Study of IEEE 802.11bd and IEEE 802.11p on the Data Dissemination Properties in Dynamic Traffic Scenarios. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 5.

Plotnikov Pavel — Ph.D., Associate Professor, Head of the department, Department of higher mathematics, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT). Research interests: mathematical modeling, vehicular communication systems, vehicle-to-everything. The number of publications — 57. plotnikov.pv@sut.ru; 22/1, Bolshhevikov Ave., 193232, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)305-1218.

Tambovtsev Gleb — Graduate student, engineer, Student design bureau, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT). Research interests: software engineering, mathematical modeling, vehicular communication systems. The number of publications — 17. tambovtsev.gi@sut.ru; 22/1, Bolshhevikov Ave., 193232, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)326-3163.

Vladiko Andrei — Ph.D., Associate Professor, Dean of the faculty, Faculty of radioelectronic systems and robotics, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT). Research interests: vehicular communication systems, vehicle-to-everything, edge/fog computing. The number of publications — 158. vladyko@sut.ru; 22/1, Bolshhevikov Ave., 193232, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)305-1263.

Acknowledgements. This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 24-29-00304, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00304/>.