

# СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИТС НА БАЗЕ V2X

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-42-54

**Плотников Павел Владимирович,**

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия, [plotnikov.pv@sut.ru](mailto:plotnikov.pv@sut.ru)

**Тамбовцев Глеб Ильич,**

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия, [tambovtsev.gi@sut.ru](mailto:tambovtsev.gi@sut.ru)

**Владыко Андрей Геннадьевич,**

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия, [vladyko@sut.ru](mailto:vladyko@sut.ru)

Manuscript received 05 December 2025;

Accepted 10 February 2026

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

**Ключевые слова:** ИТС, граничные и туманные  
вычисления, V2X система, имитационное  
моделирование, simV2X

В статье рассматривается система имитационного моделирования интеллектуальных транспортных систем, основанная на технологии связи Vehicle-to-Everything. Цель разработки заключалась в создании инструмента анализа процессов взаимодействия между транспортными средствами и элементами дорожной инфраструктуры с учётом особенностей городской среды. Разработанный программный комплекс simV2X позволяет воспроизводить сценарии обмена данными, моделирования движения транспортных средств и получения оценки влияния зашумленности связи на эффективность взаимодействия элементов рассматриваемой динамической среды. Архитектура системы построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость при подборе параметров, расширении функциональности и адаптации к различным задачам. В работе приведён пример сценария, в котором мобильный узел инфраструктуры выполняет функции ретранслятора сообщений между транспортным средством и стационарным устройством передачи данных. Результаты эксперимента позволили показать различия в качестве связи при прямом и опосредованном обмене сообщениями, а также выявить влияние пространственного расположения и динамики объектов на устойчивость соединения. Полученные данные могут быть использованы для оценки эффективности распределённых архитектур в интеллектуальных транспортных системах, оптимизации размещения элементов инфраструктуры и планирования последующих экспериментальных исследований в области интеллектуальных транспортных систем.

**Информация об авторах:**

**Плотников Павел Владимирович**, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, заведующий кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербург, Россия, ORCID 0000-0001-8869-6142

**Тамбовцев Глеб Ильич**, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, аспирант, инженер студенческого конструкторского бюро, Санкт-Петербург, Россия, ORCID 0009-0006-8034-0516

**Владыко Андрей Геннадьевич**, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, декан факультета радиоэлектронных систем и робототехники, к.т.н., доцент, Санкт-Петербург, Россия, ORCID 0000-0002-8852-5607

**Для цитирования:**

Плотников П.В., Тамбовцев Г.И., Владыко А.Г. Система имитационного моделирования ИТС на базе V2X // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 42-54.

**For citation:**

P. V. Plotnikov, G. I. Tambovtsev, A. G. Vladyko, "V2X-based ITS simulation system," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 42-54. (in Russian)

**Введение**

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) стали важным элементом организации современной городской инфраструктуры. Основными задачами исследования в области ИТС являются повышение безопасности дорожного движения, рост эффективности управления дорожным движением и анализ устойчивости за счет интеграции коммуникационных, сенсорных и вычислительных технологий. В этом контексте связь между транспортными средствами и объектами инфраструктуры (Vehicle-to-Everything, V2X) играет важнейшую роль, обеспечивая обмен данными в реальном времени между транспортными средствами (Vehicle-to-Vehicle, V2V), инфраструктурой (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), пешеходами (Vehicle-to-Pedestrian, V2P) и сетями (Vehicle-to-Network, V2N) [1]. Основная цель создания V2X решений состоит в возможности предоставлять транспортным средствам информацию о ситуации на дороге, организовывать платформу для совместного принятия решений. V2X можно считать основой совместной, подключенной и автоматизированной мобильности (CCAM). При этом растущая сложность и масштабируемость ИТС требует не только создания надежной беспроводной связи, но и организации распределенных вычислительных архитектур, способных обрабатывать массивные потоки данных с низкой задержкой и высоким уровнем отказоустойчивости [2].

Граничные вычисления (Edge Computing, EC) стали ключевым технологическим фактором для ИТС нового поколения, устраняющим ограничения облачно-ориентированных архитектур. В традиционных облачных решениях данные транспортного средства передаются для обработки в удаленные центры обработки данных, что создает неприемлемую задержку для критически важных по времени приложений, например систем безопасности, отвечающих за предотвращение столкновений, организация следования в группе и динамическая перестройка маршрута в реальном времени [3]. Использование граничных вычислителей позволяет устранить эти недостатки, развертывая вычислительные мощности и ресурсы хранения ближе к источникам данных, в дорожных узлах (Roadside Unit, RSU), базовых станциях (Base Station, BS) или даже внутри самих транспортных средств (Onboard Unit, OBU). Эта парадигма позволяет принимать решения менее чем за миллисекунды, поддерживая контекстно-зависимый анализ и снижая нагрузку на транзитную сеть [4].

В системе V2X граничные вычислительные узлы (Edge Nodes, EN) выполняют роль локальных центров принятия решений, которые объединяют данные датчиков с нескольких транспортных средств и элементов инфраструктуры. Осуществляя первичную структуризацию полученных данных и управление, эти узлы обеспечивают координацию в реальном времени между транспортными средствами, повышают надежность при нестабильном подключении, например, в городской среде, и облегчают масштабируемость в сценариях с интенсивным движением. Кроме того, на EN часто реализуются архитектуры на основе микросервисов, что позволяет проводить гибкую реконфигурацию в соответствии с сетевой нагрузкой и динамикой трафика. В ряде исследований показано, что автомобильные сети с поддержкой граничных устройств могут снизить сквозную задержку до 60% и повысить надежность в средах с высокой мобильностью [5].

Дополнительно отметим, что в недавних исследованиях [6] было показано, что граничные вычисления на тестовых стендах V2X достигают более 95% пакетной доставки в смоделированных городских сценариях, хотя реальная производительность ожидаемо снижается до 85-90% из-за наличия помех при передаче данных. Использование EC повышает масштабируемость в зашумленной городской среде, где высокая плотность транспортных средств создает значительные объемы данных, и уменьшает ограничения полосы пропускания сигнала за счет высокой загрузки каналов связи.

При этом использование граничных вычислителей влечет за собой ряд проблем в средах с ограниченными ресурсами, что требует эффективных стратегий распределения ресурсов для поиска вычислительного баланса.

В связи с появлением обозначенной проблемы была предложена парадигма туманных вычислений (Fog Computing, FC), которая представляет собой промежуточный слой между граничными устройствами и облаком, предлагая распределенную вычислительную инфраструктуру. Узлы тумана (Fog Nodes, FN), обычно развертываемые на мобильных RSU (Mobile Roadside Unit, mRSU) или стационарных RSU, агрегируют и обрабатывают данные, собранные с нескольких граничных устройств, выполняя такие задачи, как оптимизация потоков трафика, оптимальное распределение нагрузки, передача и кэширование важной системной информации.

В то время как использование EC направлено на организацию локальной обработки, FC расширяет эту концепцию, вводя иерархическую и совместную структуру между EN и FN [7]. Многопоточная структура организации FC позволяет точно контролировать, где и когда обрабатываются данные, поддерживая как глобальные, так и локальные задачи [8].

Использование туманных вычислений позволяет устранить ряд ограничений граничных устройств. Например, проблема ограниченных вычислительных или энергетических ресурсов.

Исследователи в работе [9] описывают модель использования инструментов визуализации на основе тумана в тестовом стенде Smart Highway, цель которого мониторинг гибридных коммуникаций V2X, демонстрация их работы и проверка эффективности в режиме реального времени. Использование FC позволяет организовывать иерархию обработки данных, когда чувствительные ко времени задачи обрабатываются на границе, а анализ данных, например, с использованием машинного обучения для прогнозирования трафика, выполняется в узлах тумана. Такая схема организации работы повышает устойчивость системы и поддерживает гибридные протоколы V2X.

Приведем краткий сравнительный анализ рассмотренных парадигм в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ

Характеристика	Облачные вычисления (Cloud)	Туманные вычисления (Fog)	Периферийные вычисления (Edge)
Местоположение	Централизованное облако	Распределённые узлы ближе к устройствам	Прямо на устройстве или шлюзе
Задержка	Высокая	Низкая	Очень низкая
Управление	Централизованное	Туманные вычисления (Fog)	Локальное

В таблице 2 приведены основные преимущества и недостатки использования FOG в сравнении с ЕС.

Таблица 2

Преимущества и недостатки использования FOG и ЕС

Критерий	Fog Computing	Edge Computing
Преимущества		
Масштабируемость	Более масштабируемая архитектура с промежуточными уровнями между устройствами и облаком	Ограничена ресурсами отдельных устройств
Централизованное управление	Лучше подходит для централизованного администрирования и координации между несколькими edge-узлами	Обычно локальное управление, труднее централизовать
Распределённая обработка	Может перераспределять нагрузку между несколькими fog-узлами	Обработка строго локальна – меньше гибкости
Поддержка более сложных сервисов	Подходит для приложений с высокой вычислительной сложностью (например, предиктивная аналитика)	Ограничена ресурсами устройства (CPU, память)
Улучшенная безопасность (при правильной реализации)	Предварительная фильтрация и защита перед отправкой в облако	Только локальная защита, ограниченные функции безопасности
Недостатки		
Сложность инфраструктуры	Более сложная архитектура, требующая развёртывания промежуточных узлов	Простая реализация – достаточно edge-устройства
Задержка	Из-за дополнительного промежуточного уровня может быть чуть больше задержка по сравнению с ЕС	Минимально возможная задержка – данные обрабатываются «на месте»
Затраты на внедрение и обслуживание	Требует выделенных fog-серверов, специального программного обеспечения и администрирования	Менее затратное решение – особенно для малых систем
Энергопотребление	Дополнительные узлы увеличивают общее потребление энергии	Обычно энергосберегающий режим edge-устройств

Проведенное сравнение позволяет заключить, что использование FC позволяет обеспечить непрерывность процесса обмена ресурсами между EN, FN и облаком, обеспечивая гибкую модель управления системой в вопросах совместного развёртывания и организации взаимодействия между транспортными средствами и управления движением в городской сети. В системах V2X туманные узлы часто выполняют функции промежуточного уровня, такие как агрегация данных, предварительная обработка, анализ безопасности и распределение контента. Они также служат координаторами для разнородных сетей, обеспечивая бесшовное взаимодействие между ними [10]. Дополнительно отметим, что туманные вычисления повышают устойчивость и адаптивность ИТС, предоставляя локальные резервные мощности в случае отключения облака или нарушения целостности сети [11].

Интеллектуальные транспортные системы представляют собой многоуровневую киберфизическую систему, объединяющую транспортные средства, инфраструктуру и центры управления при помощи передовых коммуникационных и вычислительных технологий. Современные архитектуры ИТС используют V2X системы совместно с периферийными

вычислениями, машинным обучением и предиктивной аналитикой для достижения необходимого уровня управления [12]. Комбинируя локальные интеллектуальные возможности с глобальной координацией, ИТС может динамически оптимизировать транспортный поток, минимизировать заторы и повышать безопасность движения в сложных городских условиях.

В современных условиях транспортные средства и инфраструктура постоянно обмениваются информацией о состоянии системы, позволяя формировать полную картину экосистемы, корректно и эффективно принимать решения. Приложения, связанные с адаптивным управлением сигналами трафика, маршрутизацией приоритетов аварийных транспортных средств и прогнозированием столкновений, полагаются на обмен данными с малым временем ожидания через интерфейсы V2X, поддерживаемые граничными и туманными узлами [1].

Интеграция методов искусственного интеллекта (ИИ) позволяет этим системам учиться на статистических данных о дорожном движении, адаптироваться к изменениям окружающей среды и строить прогнозные модели в режиме реального времени. Так в работе [12] проводится анализ стратегии на основе ИИ для оптимизации V2X системы. Подчеркивается важность распределения ресурсов на основе данных в подключенных транспортных средствах и их положении и загрузке.

Чтобы полностью реализовать потенциал ИТС, все больше внимания уделяется интегрированным архитектурам, которые объединяют коммуникацию, вычисления и контроль. Эти комплексные подходы сочетают в себе использование периферийных вычислителей и классические облачные подходы для обеспечения масштабируемости, совместимости и качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Такие гибридные системы обеспечивают распределенные управленческие ресурсы, координируют действия между локальными кластерами транспортных средств и глобальными платформами управления движением [2, 4, 9].

Для проверки этих интегрированных подходов были разработаны многочисленные экспериментальные платформы и тестовые базы. Реальные тестовые площадки V2X, такие как SVEA, Smart Highway и 5G-CCAM инфраструктуры, предоставляют важную информацию о задержках, надежности и масштабируемости в реальных условиях. Эти среды демонстрируют схему взаимодействия EN и FN, поддерживают приложения безопасности в режиме реального времени и обеспечивают управление данными модели [5, 7].

Несмотря на значительный прогресс в этой области, остаются нерешенными некоторые проблемы. Создание комплексной модели управления V2X системой в реальном времени с использованием парадигм туманных и граничных вычислителей, безопасное управление данными с сохранением конфиденциальности в гетерогенных сетях и эффективная разгрузка задач в условиях динамической мобильности. Для решения этих задач требуются усовершенствованные сетевые технологии, математические и алгоритмические модели, способные представлять взаимодействия между уровнями связи, вычислений и управления в единой структуре.

Эффективность системы зависит от ее способности управлять распределенными ресурсами, обеспечивать сверхнадежную связь с низкой задержкой и координировать принятие

решений между транспортными средствами и инфраструктурой. Создание программных решений, позволяющих проводить имитационное моделирование является одним из главных инструментов, используемых для подтверждения теоретических результатов. Сложность проведения реальных испытаний из-за их высокой стоимости вынуждает исследователей переходить к созданию испытательных стендов. Необходимость внедрения парадигмы туманных вычислений в уже хорошо зарекомендовавшую себя связку граница-облако служит дополнительной мотивацией к разработке новых платформ и вычислительных моделей, которые смогут фиксировать реальную производительность системы. Настоящая работа направлена на описание созданной имитационной модели, моделирование и экспериментальную проверку работоспособности системы, предназначенный для поддержки совместных, подключенных и автоматизированных сценариев мобильности.

Остальная часть статьи структурирована следующим образом: в разделе 1 представлен обзор существующей литературы в соответствующей предметной области. В разделе 2 проведено краткое описание наиболее популярных имитационных моделей. В третьем разделе приведен обзор программного комплекса simV2X. Описаны его структура реализации, общая схема, ключевые параметры моделирования, а также основные задачи и методы их решения. В разделе 4 приведен сценарий имитационного моделирования, а в пятом его анализ и численные результаты, направленные на проверку теоретических результатов и их анализ в различных конфигурациях системы. Наконец, в заключительном разделе приведены некоторые замечания и выводы.

### Обзор литературы

В последние годы активно ведутся исследования в области тестовых платформ и экспериментальных стендов, позволяющих проводить обмен данными в реальном времени между транспортными средствами. При этом формируется основа для анализа и подтверждения работоспособности технологий совместной, подключённой и автоматизированной мобильности транспорта (Cooperative Connected and Automated Mobility, CCAM). Современные работы направлены на решение двух ключевых задач: обеспечение воспроизводимости экспериментов в контролируемых условиях и перенос результатов моделирования со стендов на реальные дорожные условия с максимальной достоверностью.

Далее приведем наиболее значимые подходы, реализованные в виде программно-аппаратных решений для тестирования, визуализации и анализа V2X-систем и коммуникаций.

Одним из наиболее системных подходов к решению обозначенных задач является комплекс, описание которого представлено в работе [6]. Авторы разработали интегрированную модель «симуляция – полевые испытания», обеспечивающую последовательный переход от виртуальных сценариев к моделированию дорожной автономной системы. Архитектура программы включает в себя симулятор дорожной обстановки, промежуточный программный уровень (middleware) для генерации и маршрутизации V2X-сообщений и коммуникационные модули (OBU/RSU). Особое внимание уделено синхронизации временных шкал между виртуальной и физической моделями. Программное решение позволяет

интегрировать созданные в результате симуляции сообщения в радиоканал в режиме реального времени. Система снабжена инструментами анализа производительности (задержка, уровень потери пакетов), что позволяет сопоставлять данные, полученные в результате имитационного моделирования и дорожных испытаний. Приведенные авторами результаты позволяют заключить, что сценарии в модели воспроизводимы. Это позволяет выявлять различия между неточности в моделировании в сравнении с работой реальных каналов связи, включая влияние интерференции и джиттера. Таким образом, авторами закладывается основа для создания гибридных методик тестирования автономных систем, объединяющих преимущества анализа результатов стендового моделирования и сбора реальных данных.

Альтернативное исследование [9] связано с визуализацией и интерактивным мониторингом сообщений V2X. Подход к решению проблем в этой области позволяет существенно облегчить отладку и верификацию протоколов связи. Авторами представлена универсальная программная среда, предназначенная для анализа и отображения потоков V2X-сообщений в инфраструктуре «Smart Highway». Разработанное программное решение позволяет перехватывать, декодировать и отображать в реальном времени сообщения стандартов ETSI ITS-G5 и C-V2X. При этом проводится визуализация данных на географической карте. Программа поддерживает функции фильтрации сообщений по типу (CAM, DENM, SPAT/MAP), воспроизводит временную последовательность обмена и выявляет несоответствия между непосредственным позиционированием и фактическими данными GPS. Предложенный авторами гибкий веб-интерфейс и средства экспорта логов, программное решение существенно повышает наблюдаемость системы и снижает время на диагностику ошибок. Данный подход имеет важное значение для обеспечения прозрачности и воспроизводимости экспериментов на тестовых стендах.

Важную роль в развитии методологии комплексной оценки V2X-систем сыграла работа [13]. Авторами предложен комплекс для анализа производительности сетевых стеков, реализующих протоколы ITS-G5 и C-V2X, с возможностью управляемой подстройки параметров физического и канального уровней. Система представляет собой систему, состоящую из реальных устройств OBU/RSU, генераторов нагрузки и средств для автоматизации эксперимента. Предложенный метод предусматривает измерение ключевых метрик – коэффициента доставки пакетов (packet delivery ratio, PDR), задержки, джиттера и пропускной способности в различных сценариях движения транспорта и плотности трафика. Результаты моделирования показали значительное влияние аппаратных ограничений и характеристик радиоканала на надёжность передачи данных, а также позволили определить предельные значения параметров, обеспечивающих требуемый уровень качества обслуживания для различных классов приложений. Важно отметить, что в рассматриваемой работе сформирована воспроизводимая экспериментальная установка для количественного анализа эффективности V2X-системы.

Ряд исследований ориентирован на поддержку автономных транспортных средств. Так, в статье [14] описана тестовая платформа, предназначенная для оценки взаимодействия автономных автомобилей с элементами дорожной

инфраструктуры. Архитектура включает в себя придорожные устройства, серверы периферийных вычислений и интерфейсы взаимодействия с системами автономного вождения. Особое внимание уделено применению сообщений SPAT и MAP для улучшения прогнозирования фаз светофоров и управления движением. Экспериментальные результаты подтверждают гипотезу, что наличие этих сообщений снижает неопределённость при планировании траектории и повышает безопасность манёвров. В отличие от экспериментальных тестов, описанных в [13], основной акцент сделан на интеграцию коммуникационных и прикладных уровней, что важно для комплексной оценки систем автономного вождения.

Отметим еще один важный подход к построению оценки параметров взаимодействия элементов в V2X системах. В последние годы получила развитие идея открытых и модульных платформ. В работе [15] предложен универсальный экспериментальный стенд SVEA, предназначенный для оценки типовых сценариев для V2X-коммуникаций. Платформа поддерживает различные радиointерфейсы (ITS-G5, C-V2X), предоставляет API для быстрой конфигурации сценариев и автоматизированного сбора данных. Одной из ключевых особенностей SVEA является ориентация на воспроизводимость экспериментов вживую и возможность ретроспективного анализа экспериментов – все параметры среды и конфигурации сохраняются для последующих сравнений. В качестве примеров, реализован ряд сценариев, демонстрирующих влияние характеристик связи на показатели безопасности. Работа подчёркивает важность построения универсальных методов и открытого обмена экспериментальными данными для ускорения исследований в области CCAM.

Современное поколение тестовых комплексов представлено в статье [16]. Авторы сосредоточились на оценке производительности беспроводных систем нового поколения, включая NR-V2X и гибридные 5G-технологии, применительно к задачам кооперативного вождения. Разработанная система сочетает аппаратные компоненты (OBU/RSU с поддержкой современных PHY) и программные инструменты для измерения характеристик канала, анализа интерференции и подсчета нагрузок. Тесты проводились как в лабораторных условиях, так и в реальных городских локациях. Полученные результаты позволяют количественно оценить надёжность и задержку при передаче сообщений в сценариях с высокой плотностью трафика. Предложены рекомендации по проектированию систем CCAM. Работа выделяется масштабом и актуальностью, демонстрируя переход от экспериментальных прототипов к промышленным стандартам тестирования V2X-коммуникаций.

Сравнительный анализ приведённых исследований показывает эволюцию тестовых платформ от локальных, ориентированных на отдельные протоколы, к комплексным. Работы [6, 14, 16] акцентируют свое внимание на переносе моделей в физическую среду, формируя практику «simulation-to-road». Инструменты [9] обеспечивают визуализацию, а исследования [13, 15] развивают методы количественной оценки производительности и воспроизводимости. Общим для всех направлений остаётся стремление к стандартизации методик тестирования и расширению вариантов сценария: от базовых задач безопасности до высокоуровневых задач автономного планирования и кооперативного восприятия.

Несмотря на значительный прогресс, остаются

нерешёнными вопросы масштабирования стендовых испытаний, адаптации тестовых комплексов (тестбенч) к быстро эволюционирующим радиостандартам (5G NR-V2X, 6G). Проблема воспроизводимости данных в различных конфигурациях системы и оборудования также требует дополнительного внимания. В этом контексте актуальными направлениями становятся разработка унифицированных интерфейсов между симуляторами и реальными устройствами, применение технологий цифровых двойников (Digital Twins) и использование открытых платформ, подобных SVEA, для кросс-сравнения результатов.

Подводя итог, отметим, что современная экосистема тестовых комплексов V2X формирует фундамент для надёжной и стандартизированной оценки систем CCAM. Эволюция инструментов от отдельных лабораторных экспериментов к полнофункциональным интегрированным средам обеспечивает возможность системного анализа всех уровней – от физического канала до приложений автономного управления. Такие решения создают предпосылки для разработки унифицированных стандартов испытаний и ускоряют внедрение исследовательских технологий в реальные транспортные системы.

### Обзор имитационных моделей

Имитационное моделирование (ИМ) – это метод исследования сложных систем, при котором создаётся модель, воспроизводящая их поведение во времени в приближённых или виртуальных условиях. В контексте систем связи и транспортных сетей имитационное моделирование позволяет исследовать характеристики передачи данных в динамических сценариях (движение транспортных средств, изменение расстояний, прерывания связи), анализировать поведение сети при различных параметрах, оценивать надёжность, задержку, сквозную пропускную способность.

ИМ может проводиться с учетом дискретного времени, где объекты взаимодействуют в вычислительной среде с шагом времени или с без учета дискретного времени, то есть в реальном времени.

При моделировании с учетом дискретного времени, при одинаковых входных данных, модель даёт идентичный результат. Можно ускорять или замедлять время, поддерживая масштабные сценарии с сотнями или тысячами узлов, где невозможно моделировать всё в реальном времени.

Моделирование в реальном времени выполняется синхронно с системными часами – каждое событие или кадр моделируется на лету в соответствии с системным временем. Такой подход используется, например, в тестовых полигонах (testbeds) и гибридных цифровых двойниках, где симулятор напрямую связан с физическими устройствами. Возможна интеграция с устройствами (RSU, OBU, mRSU, сенсоры, контроллеры). Подходит для тестирования систем управления, где требуется мгновенная реакция на изменяющиеся условия в реальном времени.

Современные инструменты имитационного моделирования можно условно разделить на три группы:

1. Универсальные платформы системной динамики и агентного моделирования.
2. Сетевые симуляторы и фреймворки для моделирования протоколов связи.

3. Транспортные симуляторы и гибридные среды взаимодействия.

К первой группе можно отнести такое программное решение, как AnyLogic. AnyLogic – это коммерческая мультипарадигмальная среда моделирования, поддерживающая дискретно-событийное моделирование (DES), агентное моделирование (ABM) и системную динамику (SD). Она может применяться для имитации транспортных потоков, логистических процессов, систем управления и городских инфраструктур.

Ко второй группе относят, например, модульную библиотеку и фреймворк OMNeT++ или сетевой симулятор NS-3. OMNeT++ – одна из наиболее развитых платформ для моделирования телекоммуникационных систем. Она реализует дискретно-событийную архитектуру и имеет модульную структуру: каждая сущность сети (узел, канал, пакет) представлена в виде самостоятельного модуля с параметрами. На базе OMNeT++ разработано несколько фреймворков для V2X:

- INET Framework – моделирование IP-сетей, Wi-Fi, LTE, 5G NR;
- Veins – интеграция с транспортным симулятором SUMO для моделирования движения автомобилей.

Они позволяют высокоточно моделировать сетевые уровни (MAC, PHY, IP, UDP/TCP), с учетом точных задержек, ошибок и потерь.

NS-3 – это инструмент для моделирования сетевых стеков. Он включает модели физических уровней (Wi-Fi, LTE, 5G NR), протоколов MAC, маршрутизации и транспортных слоёв. Возможность интеграции с Linux network stack, что позволяет физически моделировать сетевые взаимодействия. NS-3 подходит для проведения комплексных экспериментов на уровне физического и канального слоя, но плохо сочетается с внешними системами моделирования транспорта и цифровыми двойниками.

К транспортным симуляторам (третья группа), относят SUMO и SVEA. SUMO (Simulation of Urban Mobility) – это открытый симулятор, ориентированный на моделирование транспортных потоков и маршрутизации автомобилей. SUMO используется как геометрическая подложка для сетевых симуляторов, например, в связке с OMNeT++ через интерфейс TraCI (Traffic Control Interface).

SVEA (Swedish Vehicle Electronics Architecture) – это аппаратно-программный тестовый стенд (testbed), созданный в Королевском технологическом институте (КТН, Швеция) для проведения экспериментов в области V2X-коммуникаций и автономного вождения. В отличие от классических программных симуляторов (таких как OMNeT++, NS-3 или SUMO), SVEA представляет собой реальную физическую платформу, на которой выполняются наиболее реалистичные эксперименты с транспортными средствами, RSU и сетевыми модулями связи.

Авторами ранее был разработан собственный инструмент имитационного моделирования VANET 2.0.0 [17, 18], который позволял проводить эксперименты в реальном времени, позволяет комплексно подходить к анализу параметров V2X системы, делая акцент на потерях при передаче данных. При этом программный модуль не мог интегрироваться с другими платформами и базами данных.

### Программный комплекс simV2X

Современные исследования в области интеллектуальных транспортных систем и технологий V2X требуют наличия гибких, масштабируемых и расширяемых инструментов имитационного моделирования.

Представляемый программный комплекс simV2X [19, 20] разработан в целях моделирования взаимодействий между транспортными средствами, объектами дорожной инфраструктуры и элементами периферийных вычислений в условиях городской транспортной среды [21, 22].

Представляемый программный комплекс simV2X разработан в целях моделирования взаимодействий между транспортными средствами, объектами дорожной инфраструктуры и элементами сети в условиях городской транспортной среды.

Программа реализована на языке Python с использованием FastAPI для серверной логики и OpenLayers для клиентской визуализации. Графовая карта дорог получена с использованием OpenStreetMap. Программа позволяет выполнять пошаговое моделирование транспортной сети, формировать сценарии движения транспортных средств, а также управлять поведением агентов и дорожной инфраструктуры.

Пример визуализации реализованного программного решения приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Визуализация имитационной модели

Архитектура simV2X модульная, что обеспечивает её расширяемость и адаптируемость под различные задачи. Каждый ключевой элемент модели представлен отдельным программным классом, реализующим соответствующий уровень или функциональную подсистему.

Все сущности описываются с помощью моделей Pydantic, что обеспечивает строгую типизацию и сериализацию данных при обмене по WebSocket/REST.

В качестве примера и для работы с базой данных, реализован AppStepSimulatorDB, выполняющий расчеты и записывающий их в базу данных SQLite.

В таблице 3 приведены основные классы, реализуемые в программном модуле имитационного моделирования simV2X.

Таблица 3

Основные классы, реализуемые в программном модуле

Объект	Описание	Основные параметры
Node	Базовый класс сетевого узла. Содержит общие параметры передатчика и антенны.	id, position, tx_power_dbm, antenna_gain_tx_db, antenna_gain_rx_db, system_loss_db
Vehicle (OBU)	Подвижный узел, представляющий транспортное средство с маршрутом и направлением движения.	id, Coordinates, speed_mps, heading_deg, route_id
RSU	Стационарный узел дорожной инфраструктуры. Обеспечивает связь с OBU.	id, Coordinates, range_m, antenna_gain_db
mRSU	Мобильный узел инфраструктуры, размещённый на транспортном средстве.	id, Vehicle, status, tx_power_dbm
Route	Маршрут, состоящий из точек пути, по которым движется транспортное средство.	id, path: List[Coordinates]
CurveRepositor	Хранилище BLER-кривых по комбинации (phy, mcs, channel).	register(), get()
AirtimeModel	Расчёт длительности передачи пакета и PER из BER или BLER-кривой.	net_bitrate_bps(), payload_airtime_s(), total_airtime_s()
Simulator	Основной симулятор: хранит узлы, создаёт каналы, выполняет шаги моделирования.	nodes, link_by_pair, default_link, summary()
AppStepSimulatorDB	Расширенный симулятор, ведущий логирование событий в базу данных SQLite.	step(), _deliver_db(), max_range_friis_m()
TrafficSource	Источник трафика. Определяет генерацию пакетов во времени.	src_id, start_s, end_s
GenericSource	Универсальный источник пользовательского трафика.	dst_id, size_bytes, period_s
SQLiteStorage	Менеджер логирования в базу данных SQLite.	log_packet(), log_reception(), schedule_packet()

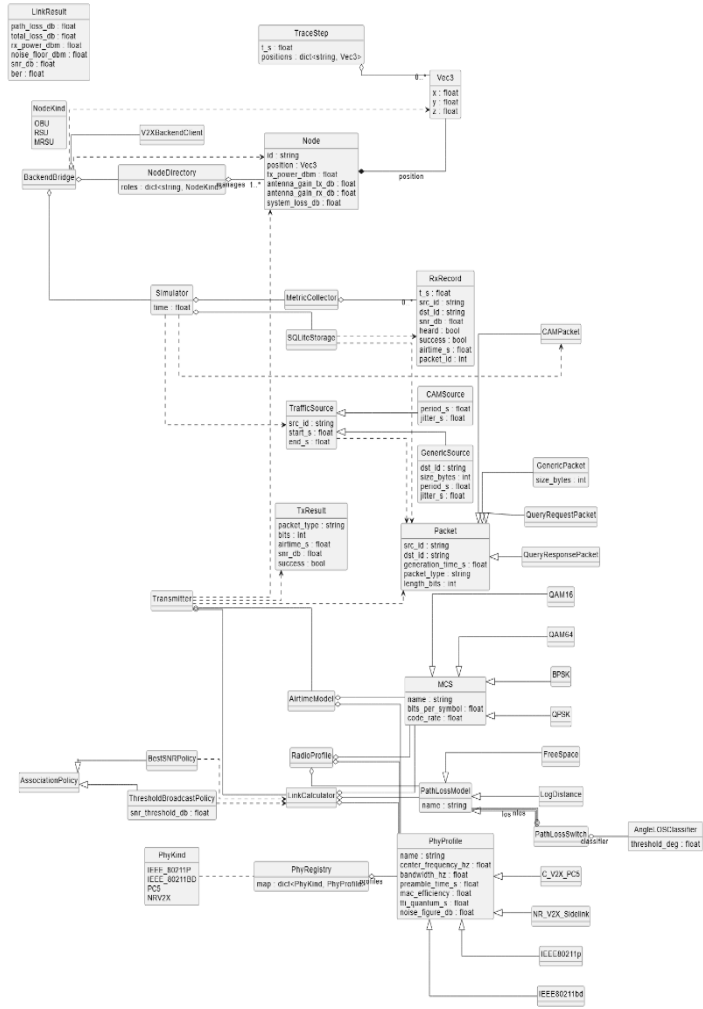


Рис. 2. Схема работы имитационной модели

Схема работы имитационной модели приведена на рисунке 2.

Результаты моделирования сохраняются в SQLite в виде таблиц (рис. 3):

1. p\_kets – все переданные пакеты;
2. receptions – результаты приёма с SNR, успехом и airtime;
3. summary – агрегированные показатели PDR, средний SNR, эфирное время.

Эти данные могут быть экспортированы в CSV, визуализированы средствами Python (библиотеки pandas, matplotlib) или сторонними программами.

Перейдем к рассмотрению основных компонент, реализованных в simV2X.

Signal-to-Noise Ratio (SNR) – это отношение мощности полезного сигнала к мощности шума на приёмной стороне, выражаемое в децибелах (дБ). В simV2X этот показатель используется как основной критерий для оценки качества радиоканала и расчёта вероятности ошибок (BER, PER).

id	packet_id	t_s	rx_id	snr_db	heard	success	airtime_s
121	1	0	mrsu459	20.740825037720427	1	1	0.00017013333333333334
122	1	0	mrsu460	10.385582470769734	1	1	0.00017013333333333334
123	1	0	mrsu461	13.274126315454211	1	1	0.00017013333333333334
124	1	0	mrsu462	13.455828749606923	1	1	0.00017013333333333334
125	1	0	mrsu463	18.990323819803056	1	1	0.00017013333333333334
126	1	0	mrsu464	13.832823960013215	1	1	0.00017013333333333334
127	1	0	mrsu465	9.86634333397083	1	1	0.00017013333333333334
128	1	0	mrsu466	11.663481756457045	1	1	0.00017013333333333334
129	1	0	mrsu467	8.886091390104554	1	1	0.00017013333333333334
130	1	0	mrsu468	8.878679436355554	1	1	0.00017013333333333334
131	1	0	mrsu469	14.11625230583253	1	1	0.00017013333333333334
132	1	0	mrsu470	29.94394927625268	1	1	0.00017013333333333334
133	1	0	mrsu471	11.43988558857923	1	1	0.00017013333333333334
134	1	0	mrsu472	10.417595515843118	1	1	0.00017013333333333334
135	1	0	mrsu473	22.450010221754468	1	1	0.00017013333333333334
136	1	0	mrsu474	12.417869894526234	1	1	0.00017013333333333334
137	1	0	mrsu475	13.747937122337788	1	1	0.00017013333333333334
138	2	0	rsu1	15.842506341057955	1	1	0.00017013333333333334
139	2	0	rsu2	14.78661267550259	1	1	0.00017013333333333334
140	2	0	rsu3	13.648115754808742	1	1	0.00017013333333333334
141	2	0	rsu4	13.042342060405787	1	1	0.00017013333333333334
142	2	0	rsu5	12.421038645803321	1	1	0.00017013333333333334
143	2	0	rsu6	11.872292200194934	1	1	0.00017013333333333334
144	2	0	rsu7	11.271793819726398	1	1	0.00017013333333333334
145	2	0	rsu8	10.649882873838251	1	1	0.00017013333333333334
146	2	0	rsu9	10.10114324756809	1	1	0.00017013333333333334

Рис. 3. Результаты моделирования в SQLite

Расчетная формула:

$$SNR_{dB} = P_r - N_0,$$

где  $P_r$  – мощность принимаемого сигнала в дБм,  $N_0$  – мощность шума в полосе канала, вычисляемая по следующей схеме:

$$N_0 = -174 + 10 \log_{10}(B)$$

где  $B$  – ширина полосы в Гц.

При высоком SNR (> 15 дБ) канал считается надёжным (вероятность ошибок мала), при низком SNR (< 5 дБ) растёт вероятность ошибок и потерь пакетов, а при SNR ниже чувствительности (Modulation and Coding Scheme, MCS) передача невозможна. SNR напрямую влияет на Bit Error Rate (BER) и Packet Error Rate (PER), определяя вероятность успешного приёма пакета.

Bit Error Rate (BER) – вероятность ошибки отдельного бита при передаче через радиоканал. В simV2X этот показатель рассчитывается на основе выбранной схемы модуляции и отношения сигнал/шум (SNR).

Packet Error Rate (PER) – вероятность того, что хотя бы один бит в пакете передан ошибочно, т.е. весь пакет не будет принят корректно. Реализуется в методе `AirtimeModel.per_from_ber` (bits, ber).

Packet Delivery Ratio (PDR) – доля успешно доставленных пакетов от общего количества, переданных за период моделирования.

`Airtime` – это время, в течение которого пакет занимает эфир. Зависит от полезной нагрузки, пропускной способности канала и накладных расходов PHY. Рассчитывается в `AirtimeModel.total_airtime_s` (bits).

Расчетная формула:

$$T_{air} = T_{preamble} + \frac{N_{bits}}{R_{net}},$$

где  $T_{preamble}$  – время преамбулы и служебных полей,  $N_{bits}$  – количество бит в пакете,  $R_{net}$  – эффективная скорость передачи (с учетом MAC efficiency и spectral efficiency).

Path Loss (PL) – ослабление мощности радиосигнала между передатчиком и приёмником вследствие распространения в пространстве. В simV2X реализованы модели 3GPP и обычного логарифмического расстояния. Для определения PL требуется определить LOS и NLOS. Решение о том, является ли связь прямой (LOS) или непрямой (NLOS), принимается на основе пространственного положения и ориентации транспортного средства.

Для определения уровня доступности устройства в соответствии и уровнем сигнал-шум, с учетом прямой или непрямой видимости в имитационной модели реализуется с использованием алгоритма, представленного на рисунке 4.

Алгоритм определяет, какие устройства (OBU, RSU, mRSU) могут «услышать» конкретное устройство в пределах сети. Его работа основана на сравнении параметров передаваемого сигнала с пороговыми характеристиками приёмников других устройств, а также на учёте расстояния и углового положения между объектами.

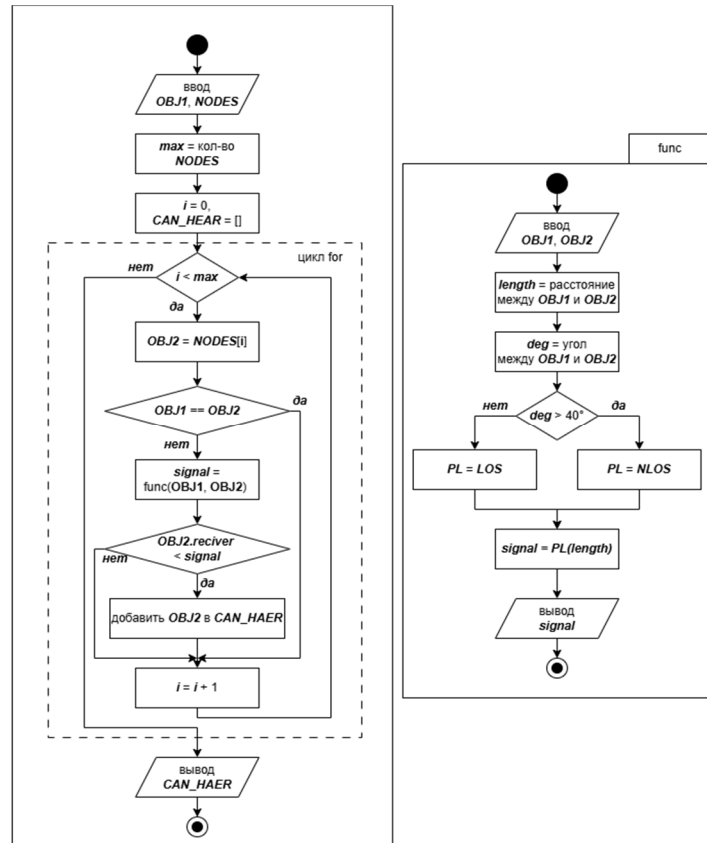


Рис. 4. Алгоритм определения уровня доступности устройства

Входными данными алгоритма являются объект OBJ1, представляющий устройство, для которого определяется зона слышимости, и множество NODES, содержащее все устройства сети, включая OBJ1. Переменная `max` задаёт количество элементов множества NODES, а переменная `CAN_HEAR` инициализируется как пустое множество, в которое будут добавляться устройства, способные принять сигнал от OBJ1, включая сам OBJ1. Далее выполняется цикл по всем элементам множества NODES.

Для каждого устройства из NODES проверяется, не совпадает ли оно с OBJ1; если совпадает, итерация пропускается, поскольку устройство не может передавать сигнал само себе. В противном случае вызывается вспомогательная функция, обозначенная на рисунке как `func`, которая вычисляет уровень сигнала, получаемого устройством OBJ2 от источника OBJ1.

После получения значения сигнала выполняется проверка условия: если порог чувствительности приёмника устройства OBJ2 меньше рассчитанного значения сигнала, то есть устройство способно принять передачу, OBJ2 добавляется в множество `CAN_HEAR`. После завершения цикла результатом работы алгоритма становится множество `CAN_HEAR`, содержащее все устройства, находящиеся в зоне слышимости OBJ1.

Функция `func(OBJ1, OBJ2)` моделирует распространение сигнала между двумя устройствами. На вход она получает те же объекты OBJ1 и OBJ2. Внутри функции вычисляются расстояние `length` между объектами и угол `deg` между направлениями их антенн.

На основании значения угла определяется тип распространения сигнала: если  $\text{deg}$  не превышает  $40^\circ$ , предполагается наличие прямой видимости Line of Sight (LOS), иначе считается, что сигнал распространяется с препятствиями Non-Line of Sight (NLOS). Далее определяется функция потерь сигнала PL, соответствующая выбранному типу распространения, и вычисляется итоговый уровень сигнала  $\text{signal} = \text{PL}(\text{length})$ , который возвращается в основной алгоритм. Для определения распространения сигнала может использоваться не только расстояние, передаются все необходимые данные от объектов, однако для данного сценария достаточно считать расстояние. Функцией потери сигнала могут являться модели 3GPP, Neta или другие.

Для каждого узла (транспортного средства или инфраструктурной точки) известны координаты  $(x, y)$  и направление движения (вектор ориентации, выраженный через угол  $\text{heading\_deg}$ ). Для пары узлов А (передатчик) и В (приёмник) вычисляется вектор направления на приёмник:

$$\vec{v}_{AB} = (x_B - x_A, y_B - y_A)$$

Затем определяется угол отклонения между направлением движения передатчика (вектор ориентации автомобиля) и направлением на приёмник:

$$\theta = \arccos \left( \frac{\vec{v}_{\text{heading}} \cdot \vec{v}_{AB}}{|\vec{v}_{\text{heading}}| \cdot |\vec{v}_{AB}|} \right)$$

где  $\vec{v}_{\text{heading}}$  – единичный вектор направления движения А,  $\vec{v}_{AB}$  – нормализованный вектор на приёмник В.

После вычисления угла, сравнивается значение углового порога. Считаем, что для NLOS отклонение превышает  $40^\circ$  градусов. Таким образом, если приёмник находится в пределах  $40^\circ$  перед направлением движения автомобиля – считается, что между ними прямая видимость (LOS). Если приёмник расположен позади или под большим углом – канал считается затенённым (NLOS). Это наиболее простое динамическое определение LOS/NLOS. Альтернативным методом мог бы выступать «RayCasting» – запуск лучей до точек. Однако, в таком случае, необходимо было бы иметь координаты возможных препятствий на пути.

### Сценарий имитационного моделирования

При проведении реальных испытаний возникает необходимость формирования предварительной статистической информации о тех или иных параметрах системы. Так, для определения плотности распределения RSU на перекрестках, необходимо определить силу влияния прямой видимости устройства на обработку сообщения.

Был рассмотрен сценарий (рис. 5), в котором предполагается, что устройство OBU не имеет прямой видимости с RSU, но находится в зоне действия mRSU, которое, в свою очередь, имеет прямую видимость с RSU. Таким образом, связь между OBU и RSU – NLOS (без прямой видимости), между mRSU и RSU – LOS (с прямой видимостью), между OBU и mRSU – LOS (с прямой видимостью).

Исходное предположение заключается в том, что передача данных по цепочке LOS–LOS может обеспечивать

меньшие задержки по сравнению с прямой передачей по каналу NLOS. Схема сценария приведена на рисунке 4. В рассматриваемом случае также предполагается, что mRSU и RSU не взаимодействуют с другими OBU. mRSU выполняет роль ретранслятора, передавая задачу на RSU, при этом не располагая кэшированными результатами. В то же время RSU содержит уже закэшированный результат, что исключает необходимость ожидания отклика от ES или облачной инфраструктуры. OBU должно находится в зоне покрытия RSU, т.е. сигнал должен быть «услышан». В сценарии используется модель распространения 3GPP в городской среде.

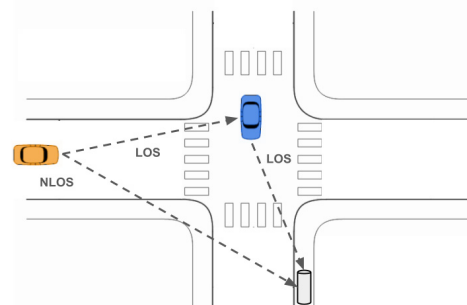


Рис. 5. Сценарий имитационного моделирования

Скорости транспортных средств назначались случайным образом в начале каждого повтора моделирования. Скорость OBU от 30 до 60 км/ч. Скорость mRSU от 20 до 45 км/ч. Высота антенны OBU составляет 1.5 метра, mRSU – 4 метра, RSU – 10 метров. Моделирование проводилось с характеристиками IEEE 802.11bd, на частоте 5.9 ГГц. Коэффициент шума 7.0 дБ, расчетная мощность шума ~ -97 дБм.

### Результаты имитационного моделирования

Для проверки работоспособности предложенной архитектуры ретрансляции было проведено имитационное моделирование сценария, описанного в предыдущем разделе. Целью моделирования является сравнение качества связи (SNR) при прямой передаче данных от OBU к RSU и при передаче через мобильный ретранслятор mRSU. Для анализа были использованы две конфигурации модели канала:

1. Каналу OBU-RSU статически присвоен тип NLOS, а каналам OBU-mRSU и mRSU-RSU – тип LOS, в соответствии с базовой гипотезой.
2. Тип канала (LOS или NLOS) для OBU-RSU и mRSU-RSU определяется динамически.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования первой конфигурации. Синяя пунктирная линия показывает SNR для прямого канала. Качество связи нелинейно и достигает пика в точке максимального сближения OBU с RSU. После этой точки SNR быстро деградирует, опускаясь ниже порога работоспособности. Зеленая сплошная линия показывает SNR канала через ретранслятор. Поскольку OBU и mRSU движутся (OBU догоняет mRSU), SNR этого канала плавно растет. Хотя прямой канал (синий) временно обеспечивает более высокий SNR вблизи RSU, он полностью теряет работоспособность на дистанции. Канал через ретранслятор (зеленый), напротив, обеспечивает стабильно высокий SNR на всем смоделированном диапазоне, решая задачу расширения зоны покрытия V2X.

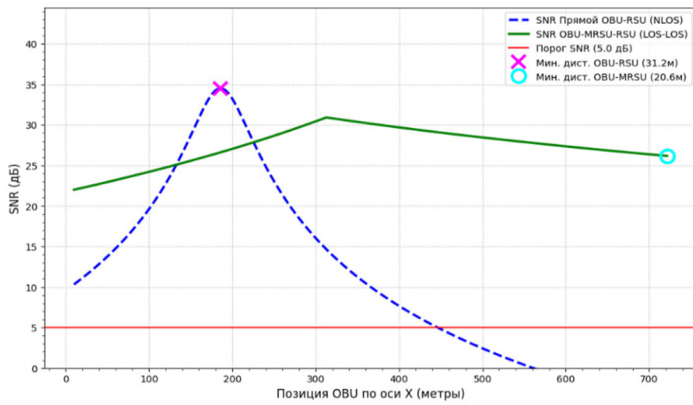


Рис. 6. Результаты моделирования в первой конфигурации

На рисунках 7 и 8 представлена вторая конфигурация, где модель канала динамически переключается с LOS на NLOS, когда OBU или mRSU удаляются от RSU. Синяя линия демонстрирует пик в зоне LOS, однако, как только OBU теряет RSU из видимости, модель канала переключается на NLOS и это приводит к мгновенному падению SNR. После этого обрыва канал быстро деградирует и становится неработоспособным. Зеленая линия показывает SNR ретранслятора. Этот SNR определяется самым низким уровнем из двух взаимодействий. На графиках (рис. 7 и 8) виден резкий вертикальный обрыв зеленой линии. Это происходит в тот момент, когда мобильный mRSU покидает зону видимости RSU, и его канал деградирует до NLOS, мгновенно становясь узким местом всей цепи ретрансляции. Тем не менее, сигнал ретрансляции деградирует позднее, чем прямое соединение.

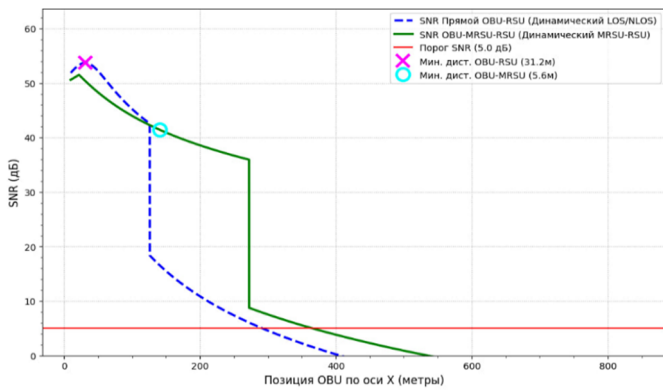


Рис. 7. Результаты моделирования во второй конфигурации

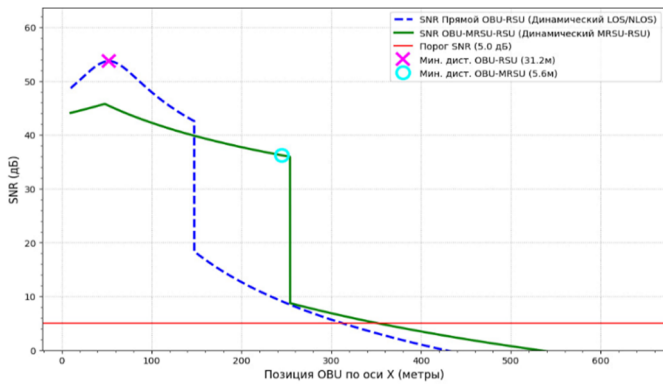


Рис. 8. Результаты моделирования во второй конфигурации

Конечно, реальное падение будет проходить несколько плавнее, резкий спад обусловлен переключением моделей. Ретрансляция mRSU эффективна только тогда, когда оба ее сегмента (OBU-mRSU, mRSU-RSU) имеют высокий SNR. Преимущество от mRSU проявляется на больших расстояниях, где быстрое затухание прямого NLOS-канала делает его неработоспособным, в то время как mRSU продолжает обеспечивать связь. mRSU позволяет расширить зону покрытия, но эта зона все равно ограничена моментом, когда сам mRSU теряет LOS-связь с RSU.

### Заключение

Проведённое исследование посвящено разработке системы имитационного моделирования V2X-сетей и оценке эффективности архитектуры, использующей мобильный узел туманных вычислений в качестве ретранслятора между бортовым устройством и стационарной дорожной инфраструктурой [23].

Проведенное имитационное моделирование в условиях отсутствия прямой видимости показало, что передача по каналу связи между OBU и RSU характеризуется быстрым нелинейным затуханием сигнала. Использование mRSU обеспечивает устойчивое качество передачи только на больших расстояниях, где прямой канал связи уже не имеет возможности для функционирования. На малых расстояниях преимущество ретрансляции выражено незначительно.

Имитационное моделирование подтвердило, что геометрия и высота антенн являются ключевыми факторами для стабильной настройки канала для передачи данных. Низкое положение антенны OBU (около 1,5 м) приводит к быстрому переходу в режим NLOS, что вызывает мгновенное снижение уровня SNR. При этом использование mRSU с антенной высотой около 4 м позволяет дольше сохранять прямую видимость с RSU и эффективно ретранслировать данные, расширяя рабочую зону покрытия для OBU.

Эффективность функционирования системы OBU-mRSU-RSU определяется наиболее слабым звеном – каналом между mRSU и RSU. При увеличении расстояния между ними свыше порога прямой видимости наблюдается деградация канала, что приводит к потере связи всей системы. Это подчёркивает необходимость разработки алгоритмов прогнозирования потери соединения и выбора оптимальных ретрансляторов в динамической среде.

Разработанная система имитационного моделирования подтвердила, что использование мобильных узлов туманных вычислений в качестве ретрансляторов является эффективным способом повышения надёжности связи в городской среде.

Следующим этапом исследования в рассматриваемой области является разработка адаптивных алгоритмов выбора ретранслятора с учётом не только уровня SNR, но и прогнозируемого времени потери прямой видимости в канале между mRSU и RSU. Предусматривается внедрение моделей многолучевого распространения Релея и Райса для учёта замираний и отражений в городских условиях. Также планируется провести оценку влияния использования mRSU на общую пропускную способность и задержку передачи данных в системе с учётом двухзвенного канала связи.

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

### Литература

1. Wang J., Topilin I., Feofilova A., Shao M., Wang Y. Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies on Road Safety and Traffic Efficiency // *Sensors*. 2025. Vol. 25, pp. 2132. DOI: 10.3390/s25072132.
2. Zhang X., Li J., Zhou J. et al. Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy // *Automot. Innov.* 2025. Vol. 8, pp. 13-45. DOI: 10.1007/s42154-024-00310-2.
3. Pawar V. et al. Intelligent Transportation System With 5G Vehicle-to-Everything (V2X): Architectures Vehicular Use Cases, Emergency Vehicles, Current Challenges, and Future Directions // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12, pp. 183937-183960. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3506815.
4. Khan A.A., Laghari A.A., Shafiq M., Awan S.A., Gu Z. Vehicle to Everything (V2X) and Edge Computing: A Secure Lifecycle for UAV-Assisted Vehicle Network and Offloading with Blockchain // *Drones*. 2022. Vol. 6. P. 377. DOI: 10.3390/drones6120377.
5. Rehman M. A. U., Salah ud din M., Mastorakis S., Kim B.-S. FoggyEdge: An Information-Centric Computation Offloading and Management Framework for Edge-Based Vehicular Fog Computing // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2023. Vol. 15. No. 5, pp. 78-90. DOI: 10.1109/MITS.2023.3268046.
6. Elmoghazy A., Elgazzar K., Alwidian S. A Real-World Testbed for V2X in Autonomous Vehicles: From Simulation to Actual Road Testing // *IEEE 8th International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC)*. Philadelphia. PA. USA. 2024, pp. 1234-1245. DOI: 10.1109/ICFEC61590.2024.00012.
7. Ning Z., Huang J., Wang X. Vehicular Fog Computing: Enabling Real-Time Traffic Management for Smart Cities // *IEEE Wireless Communications*. 2019. Vol. 26. No. 1, pp. 87-93. DOI: 10.1109/MWC.2019.1700441.
8. Glazkov R., Moltchanov D., Srikanthaswara S., Samuylov A., Arrobo G., Zhang Y., Feng H., Himayat N., Spoczynski M., Koucheryavy Y. Provisioning of Fog Computing over Named-Data Networking in Dynamic Wireless Mesh Systems // *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 1120. DOI: 10.3390/s24041120.
9. De Britto e Silva E., Vranckx J., De Bruyn T., Charpentier V., Hadiwardoyo S. A., Marquez-Barja J. M. A Toolkit for Visualizing V2X Messages on the Smart Highway Testbed // *2021 IEEE/ACM 25th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. Valencia. Spain. 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/DS-RT52167.2021.9576123.
10. Thakur A., Malekian R. Fog Computing for Detecting Vehicular Congestion, an Internet of Vehicles Based Approach: A Review // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2019. Vol. 11. No. 2, pp. 8-16. DOI: 10.1109/MITS.2019.2903551.
11. Ma H., Wu Y., Tong Y. Research on the Application and Optimization of V2X Communication Technology for Intelligent Transportation // *International Core Journal of Engineering*. Vol. 11. No. 6, pp. 363-376. DOI: 10.6919/ICJE.202506\_11(6).0040.
12. Tong W., Hussain A., Bo W. X., Maharjan S. Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 10823-10843. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891073.
13. Duan X., Yang Y., Tian D., Wang Y., Li T. A V2X communication system and its performance evaluation test bed. // *2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014)*. Vancouver. BC. Canada. 2014, pp. 1-2. DOI: 10.1109/WIVEC.2014.6953212.
14. Bouchemal N., Kallel S. Testbed of V2X infrastructure for autonomous vehicles // *Ann. Telecommun.* 2021. Vol. 76, pp. 731-743. DOI: 10.1007/s12243-021-00880-w.
15. Jiang F. J., Al-Janabi M., Bolin T., Johansson K. H., Mårtensson J. SVEA: an experimental testbed for evaluating V2X use-cases // *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Macau. China. 2022, pp. 3484-3489. DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922544.
16. Dakić A., et al. Wireless V2X Communication Testbed for Connected, Cooperative and Automated Mobility // *2024 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. Kobe. Japan. 2024, pp. 9-16. DOI: 10.1109/VNC61989.2024.10575958.
17. Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladyko A. VANET Ver. 2.0.0 – Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices, 2024. URL: <https://github.com/quanuh/VANET> (accessed 01.11.2025).
18. Тамбовцев Г.И., Плотников П.В., Владыко А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664933 Российская Федерация. Программный модуль баланса нагрузки на объектах V2X системы : заявл. 26.05.2025 : опубл. 09.06.2025.
19. Tambovtsev G., Plotnikov P., Vladyko A. SimV2X – Software Module for Modeling the Interaction of Edge and Fog Devices, 2025. URL: <https://github.com/quanuh/simV2X> (accessed 01.11.2025).
20. Тамбовцев Г.И., Плотников П.В., Владыко А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689008 Российская Федерация. Программный модуль системы имитационного моделирования V2X среды (simV2X): заявл. 23.10.2025 : опубл. 23.10.2025.
21. Vladyko A., Plotnikov P., Tambovtsev G. Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure // *Network*. 2025. Vol. 5. No. 1. P. 4. DOI: 10.3390/network5010004.
22. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladyko A. G. The Balance Model for V2X System with Variable Infrastructure // *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow. Russian Federation. 2025, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948102.
23. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladyko A. G. Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units // *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. Moscow. Russian Federation. 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332617.

## V2X-BASED ITS SIMULATION SYSTEM

**Pavel V. Plotnikov**, SPbSUT, St. Petersburg, Russia, [plotnikov.pv@sut.ru](mailto:plotnikov.pv@sut.ru)  
**Gleb I. Tambovtsev**, SPbSUT, St. Petersburg, Russia, [tambovcev.gi@sut.ru](mailto:tambovcev.gi@sut.ru)  
**Andrei G. Vladyko**, SPbSUT, St. Petersburg, Russia, [vladyko@sut.ru](mailto:vladyko@sut.ru)

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

**Abstract**

The paper discusses a simulation system for intelligent transportation systems (ITS) based on Vehicle-to-Everything (V2X) communication technology. The development objective is to create a tool for analyzing the interaction processes between vehicles and road infrastructure elements, taking into account the specific characteristics of the urban environment. The developed software package simV2X allows for reproducible data exchange scenarios, vehicle movement modeling, and assessment of how communication noise affects the efficiency of interactions within a dynamic system. The system architecture follows a modular design, providing flexibility in parameter configuration, functional expansion, and adaptation to various application tasks. The paper presents a simulation scenario in which a mobile infrastructure node operates as a relay between a vehicles on-board unit and a stationary data transmission unit known as mobile roadside unit. The experimental results demonstrate differences in communication quality between direct and relay-based message exchange and reveal the influence of spatial positioning and object dynamics on connection stability. The obtained data can be applied to evaluate the efficiency of distributed ITS architectures, optimize the placement of infrastructure elements, and plan further experimental studies in the field of cooperative and automated mobility.

**Keywords:** ITS, edge and fog computing, V2X system, simulation, simV2X

**References**

- [1] J. Wang, I. Topilin, A. Feofilova, M. Shao, Y. Wang, "Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies on Road Safety and Traffic Efficiency," *Sensors*, 2025, vol. 25, pp. 2132, doi: 10.3390/s25072132.
- [2] X. Zhang, J. Li, J. Zhou, et al. "Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy," *Automot. Innov.*, 2025, vol. 8, pp. 13-45, doi: 10.1007/s42154-024-00310-2.
- [3] V. Pawar et al. "Intelligent Transportation System With 5G Vehicle-to-Everything (V2X): Architectures, Vehicular Use Cases, Emergency Vehicles, Current Challenges, and Future Directions," *IEEE Access*, 2025, vol. 12, pp. 183937-183960, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3506815.
- [4] A.A. Khan, A.A. Laghari, M. Shafiq, S.A. Awan, Z. Gu, "Vehicle to Everything (V2X) and Edge Computing: A Secure Lifecycle for UAV-Assisted Vehicle Network and Offloading with Blockchain," *Drones*, 2022, vol. 6, pp. 377, doi: 10.3390/drones6120377.
- [5] M. A. U. Rehman, M. Salah ud din, S. Mastorakis and B. -S. Kim, "FoggyEdge: An Information-Centric Computation Offloading and Management Framework for Edge-Based Vehicular Fog Computing," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 78-90, doi: 10.1109/MITS.2023.3268046.
- [6] A. Elmoghazy, K. Elgazzar, S. Alwidian, "A Real-World Testbed for V2X in Autonomous Vehicles: From Simulation to Actual Road Testing," *IEEE 8th International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC)*. Philadelphia, PA, USA, 2024, pp. 1234-1245, doi: 10.1109/ICFEC61590.2024.00012.
- [7] Z. Ning, J. Huang and X. Wang, "Vehicular Fog Computing: Enabling Real-Time Traffic Management for Smart Cities," *IEEE Wireless Communications*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 87-93, doi: 10.1109/MWC.2019.1700441.
- [8] R. Glazkov, D. Moltchanov, S. Srikanteswara, A. Samuylov, G. Arrobo, Y. Zhang, H. Feng, N. Himayat, M. Spoczynski, Y. Koucheryavy, "Provisioning of Fog Computing over Named-Data Networking in Dynamic Wireless Mesh Systems," *Sensors*, 2024, vol. 24, pp. 1120, doi: 10.3390/s24041120.
- [9] E. De Britto e Silva, J. Vranckx, T. De Bruyn, V. Charpentier, S. A. Hadiwardoyo and J. M. Marquez-Barja, "A Toolkit for Visualizing V2X Messages on the Smart Highway Testbed," *2021 IEEE/ACM 25th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, Valencia, Spain, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/DS-RT52167.2021.9576123.
- [10] A. Thakur, R. Malekian, "Fog Computing for Detecting Vehicular Congestion, an Internet of Vehicles Based Approach: A Review," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 8-16, doi: 10.1109/MITS.2019.2903551.
- [11] H. Ma, Y. Wu, Y. Tong, "Research on the Application and Optimization of V2X Communication Technology for Intelligent Transportation," *International Core Journal of Engineering*, 2025, Vol. 11, no. 6, pp. 363-376, doi: 10.6919/ICJE.202506\_11(6).0040.
- [12] W. Tong, A. Hussain, W. X. Bo, S. Maharjan, "Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey," *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 10823-10843, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891073.
- [13] X. Duan, Y. Yang, D. Tian, Y. Wang, T. Li, "A V2X communication system and its performance evaluation test bed," *2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014)*, Vancouver, BC, Canada, 2014, pp. 1-2, doi: 10.1109/WIVEC.2014.6953212.
- [14] N. Bouchemal, S. Kallel, "Testbed of V2X infrastructure for autonomous vehicles," *Ann. Telecommun.*, 2021, vol. 76, pp. 731-743, doi: 10.1007/s12243-021-00880-w.
- [15] F. J. Jiang, M. Al-Janabi, T. Bolin, K. H. Johansson and J. Martensson, "SVEA: an experimental testbed for evaluating V2X use-cases," *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Macau, China, 2022, pp. 3484-3489, doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9922544.

- [16] A. Dakic et al., "Wireless V2X Communication Testbed for Connected, Cooperative and Automated Mobility," *2024 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Kobe, Japan, 2024, pp. 9-16, doi: 10.1109/VNC61989.2024.10575958.
- [17] Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladyko A. VANET Ver. 2.0.0 – Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices, 2024. URL: <https://github.com/quanuhs/VANET> (accessed 11.09.2025).
- [18] Tambovtsev G.I., Plotnikov P.V., Vladyko A.G. "Load balance software module on V2X system objects". Patent RF, no. 2025664933, 09.06.2025. (in Russ.)
- [19] Tambovtsev G., Plotnikov P., Vladyko A. SimV2X – Software Module for Modeling the Interaction of Edge and Fog Devices, 2025. URL: <https://github.com/quanuhs/simV2X> (accessed 01.11.2025).
- [20] Tambovtsev G.I., Plotnikov P.V., Vladyko A.G. "V2X Simulation Software Module (simV2X)". Patent RF, no. 2025689008, 23.10.2025. (in Russ.)
- [21] A. Vladyko, P. Plotnikov, G. Tambovtsev, "Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure," *Network*, 2025, vol. 5, pp. 4, doi: 10.3390/network5010004.
- [22] P. V. Plotnikov, G. I. Tambovtsev and A. G. Vladyko, "The Balance Model for V2X System with Variable Infrastructure," *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948102.
- [23] P. V. Plotnikov, G. I. Tambovtsev, A. G. Vladyko, "Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units," *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332617.

**Information about authors:**

**Pavel V. Plotnikov**, SPbSUT, Head of Department of Higher Mathematics, St. Petersburg, Russia, ORCID 0000-0001-8869-6142

**Gleb I. Tambovtsev**, SPbSUT, graduate student, Engineer of the Student Design Bureau, St. Petersburg, Russia, ORCID 0009-0006-8034-0516

**Andrei G. Vladyko**, SPbSUT, Dean of Faculty of Radioelectronic Systems and Robotics, St. Petersburg, Russia, ORCID 0000-0002-8852-5607