

УДК 004.942:621.396.9:656.13–519

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ СООБЩЕНИЙ 5G NR-V2X НА ПОВЕДЕНИЕ ПОДКЛЮЧЕННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А. Ю. Романов

А. В. Физулин

В. Г. Степанянц

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)

Аннотация. Поведение подключенных беспилотных транспортных средств при реализации кооперативных функций безопасности зависит от своевременного обмена V2X-сообщениями. При этом сквозное влияние нарушений доставки сообщений 5G NR-V2X Mode 2 на поведение транспортных средств требует оценки не только по агрегированным сетевым метрикам, но и по своевременности поступления V2X-сообщений в допустимый для управляющего контроллера временной интервал. В статье представлена воспроизводимая среда совместного имитационного моделирования, объединяющая симулятор транспортной мобильности SUMO, обмен информацией через TraCI, сетевое моделирование в ns-3/ms-van3t, модуль 5G-LENA NR sidelink, геометрическую модель радиоканала Sionna RT и журналы событий. В среде реализованы механизмы изменения качества связи для отдельных транспортных средств и сквозной трассировки сообщений с сохранением идентификаторов для проведения анализа сообщений и оценки влияния потерь сообщений на поведение подключенного беспилотного транспорта. Экспериментальная проверка выполнена в двух сценариях. В сценарии предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб серия из 140 независимых итераций показала, что при снижении PRR (Packet Reception Ratio) с 0,9412 до 0,0675 значение 90-го перцентиля задержки первого приема CAM (Cooperative Awareness Message) возрастает с 4,45 до 32,52 с. Ранговая корреляция Спирмена фиксирует прямую связь между txPower (мощность передатчика) и PRR ($\rho_s = 0,981$, $p < 0,001$) и обратную связь между PRR и P90 задержки ($\rho_s = -0,927$, $p < 0,001$). В сценарии конфликта на приоритетном перекрестке устойчивый обмен V2X-сообщениями обеспечивает поступление первого полезного предупреждения до критического момента формирования управляющего действия. В результате во всех 30 независимых итерациях столкновение не возникало. В режимах «только радар» и «радар + деградированная V2X-связь» предупреждение поступает позднее критического момента, поэтому каждая итерация завершается столкновением. Результаты показывают, что оценка безопасности кооперативных функций требует совместного анализа PRR, временной структуры поступления сообщений и поведения транспорта.

Ключевые слова: NR-V2X Mode 2, ns-3, Sionna RT, SUMO, V2X, задержка первого приема CAM, коэффициент приема пакетов, подключенные беспилотные транспортные средства, совместное имитационное моделирование.

UDC 004.942:621.396.9:656.13–519

MODELLING THE IMPACT OF 5G NR-V2X MESSAGE LOSSES ON THE BEHAVIOUR OF CONNECTED AUTOMATED VEHICLES

A. Yu. Romanov

A. V. Fizulin

V. G. Stepanyants

National Research University Higher School of Economics (HSE University)

Abstract. The behaviour of connected automated vehicles in implementing cooperative safety functions depends on the timely exchange of V2X messages. At the same time, the end-to-end impact of 5G NR-V2X Mode 2 message delivery failures on vehicle behaviour requires evaluation not only by aggregated network metrics but also by the timeliness of V2X message arrival within the time window acceptable for the control controller. The paper presents a reproducible co-simulation environment integrating the SUMO traffic mobility simulator, information exchange via TraCI, network simulation in ns-3/ms-van3t, the 5G-LENA NR sidelink module, the Sionna RT geometric radio channel model and event logs. The environment implements mechanisms for modifying link quality for individual vehicles and end-to-end message tracing with identifier preservation for message analysis and assessment of the impact of message losses on connected automated vehicle behaviour. Experimental validation was performed in two scenarios. In the emergency vehicle warning scenario, a series of 140 independent iterations showed that as PRR (Packet Reception Ratio) decreases from 0.9412 to 0.0675, the 90th percentile of the first CAM (Cooperative Awareness Message) reception delay increases from 4.45 to 32.52 s. Spearman's rank correlation identifies a direct relationship between txPower (transmitter power) and PRR ($\rho_s = 0.981$, $p < 0.001$) and an inverse relationship between PRR and P90 delay ($\rho_s = -0.927$, $p < 0.001$). In the priority intersection conflict scenario, stable V2X message exchange ensures that the first useful warning arrives before the critical moment of control action formation. As a result, no collision occurred in any of the 30 independent iterations. In the "radar-only" and "radar + degraded V2X" modes, the warning arrives after the critical moment, causing each iteration to end in a collision. The results show that the safety assessment of cooperative functions requires joint analysis of PRR, the temporal structure of message arrival and vehicle behaviour.

Keywords: NR-V2X Mode 2, ns-3, Sionna RT, SUMO, V2X, first CAM reception delay, packet reception ratio, connected automated vehicles, co-simulation.

Введение

Подключенные беспилотные транспортные средства предъявляют строгие требования к поддерживающей коммуникационной инфраструктуре. Кооперативное восприятие, предупреждение об опасности и согласование маневров опираются на своевременный и надежный обмен V2X-сообщениями (Vehicle-to-Everything) [1–4]. В таких условиях коммуникационные характеристики имеют прикладное значение в той мере, в какой они влияют на поведение транспортных агентов, использующих передаваемую информацию.

В большинстве исследований качество V2X-связи по-прежнему оценивается через агрегированные сетевые показатели, в том числе средний коэффициент приема пакетов PRR (Packet Reception Ratio) и среднюю задержку [5, 6]. Такие метрики полезны, но они не устанавливают, какие коммуникационные события фактически изменяют решения транспортных средств, задерживают реакции или формируют небезопасные ситуации дорожного движения. Благоприятное среднее значение PRR на сетевом уровне может скрывать небезопасное поведение в хвостовой области распределения задержки поступления полезной информации в прикладной контроллер.

Указанный разрыв между агрегированной оценкой доставки сообщений и оценкой их прикладной своевременности особенно значим для прямого канала связи 5G NR (New Radio)-V2X Mode 2, где децентрализованное распределе-

ние ресурсов формирует сложную структуру потерь. Помимо внешних помех, потери пакетов в 5G NR-V2X Mode 2 связаны с автономным выбором радиоресурсов пользовательскими устройствами, конкуренцией за ресурсы в общем ресурсном котле, ограничениями процедуры прослушивания канала и временными границами окна выбора ресурсов [7, 8]. Для кооперативных функций такие потери важны прежде всего из-за изменения информационного состояния транспортных средств и моментов обновления этого состояния.

Существующие интегрированные среды моделирования предоставляют полезные базовые компоненты, но редко обеспечивают сопоставление сетевых событий с прикладными решениями и поведением транспорта. Среда Veins [9], Eclipse MOAIC [10], ns-3/ms-van3t [11] и Van3Twin [12] реализуют различные степени совместного моделирования транспортных и сетевых процессов, но обычно не сохраняют явную связь между конкретной потерей сообщения, решением прикладного контроллера и поведением подключенного беспилотного транспорта. Поэтому для анализа влияния потерь V2X-сообщений требуется методика, в которой сетевые события сопоставляются с прикладными решениями и поведением транспорта.

В статье предложена воспроизводимая среда совместного имитационного моделирования, объединяющая SUMO, TraCI, ns-3/ms-van3t, NR-V2X Mode 2 и Sionna RT с сохранением идентифика-

торов сообщений в коммуникационной цепочке. Также введен автоматизированный анализ потерянных сообщений, связывающий потери сообщений с решениями прикладного уровня и поведением транспорта. Сформированы два сценария: предупреждение о приближении автомобиля экстренных служб для анализа задержки первого приема CAM-сообщения (Cooperative Awareness Message) и конфликт на приоритетном перекрестке для анализа влияния раннего V2X-преду-

ждения на факт столкновения. Статистическая проверка по независимым значениям RngRun показывает устойчивую монотонную связь между мощностью передачи, PRR и задержкой первого предупреждения. Для оценки неблагоприятных случаев используется 90-й процентиль распределения задержки первого приема CAM: значение, ниже которого находится 90% наблюдений, тогда как оставшиеся 10% соответствуют наиболее позднему поступлению предупреждения.

Обзор литературы

Модели канала и совместное имитационное моделирование

Предшествующие работы рассматривали надежность автомобильных коммуникаций как с точки зрения распространения радиосигнала, так и с точки зрения имитационного моделирования. В работе [5] анализируются модели автомобильных каналов и распространения сигнала, а также показано, что применимость таких моделей зависит от учитываемых механизмов распространения, входных данных и условий дорожной среды. В работах [13, 14] разрабатываются геометрические модели, различающие условия прямой видимости, перекрытия транспортными средствами и перекрытия зданиями; эти модели показывают критическую роль учета препятствий при реалистичной оценке характеристик V2V.

Для прямого канала связи NR-V2X была обоб-

щена архитектура Mode 2 версии 16 и проблемы распределенного планирования [7]. В работе [15] рассматриваются интегрированные среды имитационного моделирования для подключенных беспилотных транспортных средств; в качестве ключевых требований выделяются их воспроизводимость и межуровневая согласованность. Среда ms-van3t [11] предоставляет многостековую среду моделирования V2X поверх ns-3, а Van3Twin [12] развивает данное направление за счет включения трассировки лучей Sionna RT в контур моделирования. Конфигурационно-зависимые сравнения IEEE802.11p и LTE-V2X дополнительно показывают необходимость совместного анализа надежности и задержки относительно временного бюджета приложения [16].

Метрики безопасности и сохраняющийся разрыв

Анализ суррогатной безопасности на основе показателей времени до столкновения и времени после пересечения конфликтной зоны широко распространен [17]. Аналогичным образом возраст информации формализован как полезная промежуточная метрика между коммуникацией и управлением [6, 18]. При этом предшествующие исследования обычно рассматривают сетевые

метрики, свежесть информации и транспортное поведение как отдельные уровни. Насколько известно авторам, в литературе по-прежнему отсутствует воспроизводимая среда, которая прослеживает отдельные потери пакетов NR-V2X Mode 2 через решения уровня приложения до исходов столкновений при использовании геометрически чувствительной трассировки лучей.

Материалы и методы

Среда совместного имитационного моделирования

Обзор архитектуры

Предложенная среда реализует двунаправленный контур совместного имитационного моделирования, объединяющий транспортную мобильность, прикладную логику кооперативного управления, сетевое моделирование обмена V2X-сообщениями, геометрически чувствительное моделирование радиоканала и последующую аналитическую обработку результатов моделирования. Архитектурно связка представлена шестью функциональными блоками: микроскопическим

симулятором дорожного движения SUMO (Simulation of Urban MObility), интерфейсом TraCI (Traffic Control Interface), прикладным контроллером, сетевым симулятором ns-3/ms-van3t с модулем 5G-LENA NR sidelink, сервисом моделирования радиоканала Sionna RT, а также контуром журналирования и постобработки результатов моделирования [12, 19–21].

На уровне транспортной мобильности симулятор SUMO формирует дорожную сцену, траектории движения, выбор полосы движения и кине-

математические параметры транспортных средств. Обмен состояниями между транспортным и сетевым контурами выполняется через TraCI. На каждом шаге моделирования TraCI передает в ns-3/ms-van3t координаты, скорости и номера полос, а в обратном направлении получает прикладные управляющие воздействия, включая команды `slowDown` и `changeLane` [20]. Такая схема поддерживает согласованный временной контур, в котором изменения в канале связи отражаются на поведении транспорта.

В составе среды моделирования прикладной контроллер представляет собой программный модуль логики управления транспортным средством. Он расположен между коммуникационным контуром и транспортной моделью: получает сведения о принятых и потерянных V2X-сообщениях и формирует управляющее воздействие для симулятора дорожного движения. В рассматриваемых экспериментах результатом работы контроллера являются команды замедления, перестроения или

отсутствие управляющего действия при недостатке своевременной информации. За счет такого модуля событие сетевого уровня, например потеря САМ или поздний прием предупреждения, связывается с поведением транспортного средства.

Сетевой уровень представлен связкой ns-3/ms-van3t, выполняющей дискретно-событийное моделирование обмена V2X-сообщениями. Внутри указанного блока используется 5G-LENA NR sidelink, реализующий процедуры NR-V2X Mode 2 на физическом и канальном уровнях [11, 19, 22]. Уровень служб ETSI Facilities содержит CA Basic Service, DEN Basic Service и CP Basic Service, обеспечивающие обработку сообщений взаимного информирования, децентрализованного оповещения и коллективного восприятия [3, 4, 23]. В рассматриваемой постановке сетевой контур отвечает за генерацию, передачу, прием и потерю сообщений, а также за фиксацию сетевых событий, значимых для последующего причинно-следственного анализа.

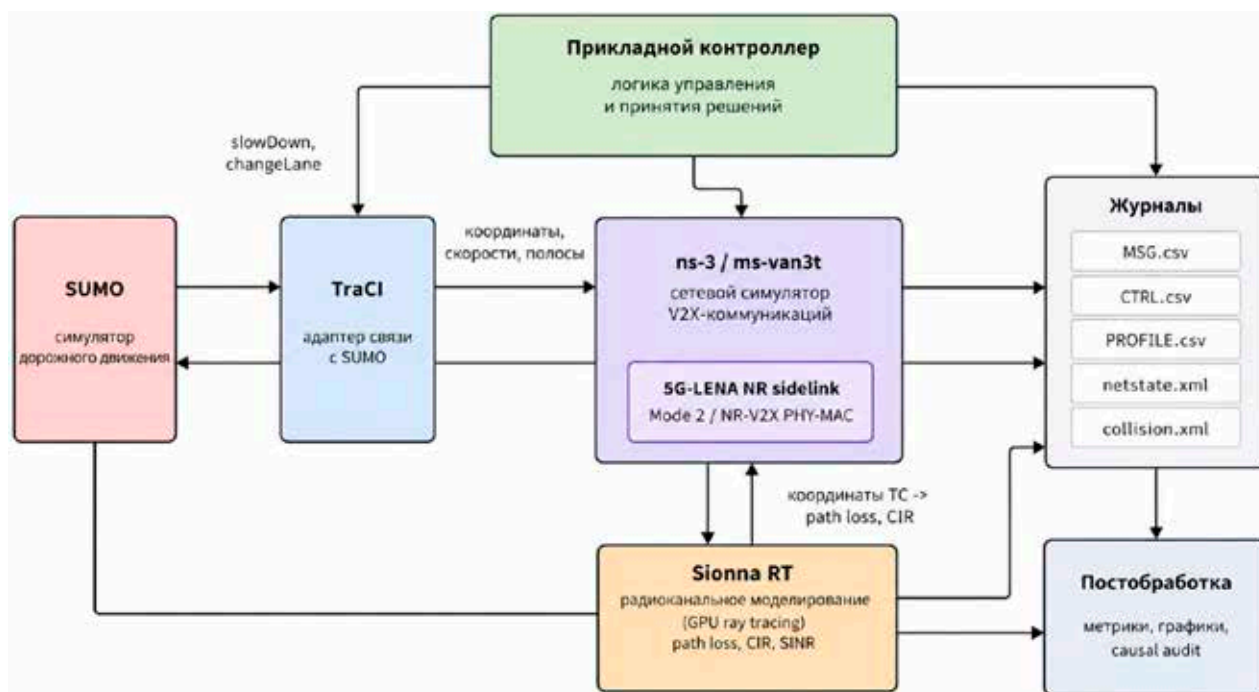


Рис. 1. Архитектура среды совместного имитационного моделирования. Источник: авторы исследования

Блок Sionna RT подключен к сетевому симулятору как внешний сервис геометрически чувствительного моделирования радиоканала [21]. В ходе моделирования в него передаются координаты транспортных средств, после чего сервис вычисляет параметры распространения сигнала и возвращает их в ns-3/ms-van3t. За счет такого включения конфигурация сцены, взаимное расположение транспортных средств и геометрия окружения влияют на характеристики канала и результаты обмена V2X-сообщениями. Такая организация следует идее включения

трассировки лучей в контур моделирования, реализованной в среде VaN3Twin, и расширяет ее функциональность за счет задания качества канала связи через мощность передатчика для отдельных транспортных средств, а также за счет сохранения идентификаторов V2X-сообщений на этапах передачи, приема и обработки результатов моделирования, что позволяет связать потерю или поздний прием сообщения с поведением транспорта [12].

Отдельный контур архитектуры образует система журналирования. В нее поступают арте-

факты сетевого и транспортного моделирования, включая MSG.csv, CTRL.csv, PROFILE.csv, netstate.xml и collision.xml. Указанные журналы фиксируют передачу, прием и потери сообщений, прикладные решения, примененные профили качества связи, транспортные состояния и события столкновений. На завершающем этапе результаты моделирования передаются в блок постобработки, где рассчитываются метрики и формируются графики.

Профили качества линии связи для отдельных транспортных средств

Для контролируемого изменения условий связи в среде реализован механизм индивидуальных профилей качества канала связи. Профиль задается для выбранного транспортного средства и содержит вероятность потери САМ-сообщений на физическом уровне, эквивалентную мощность передачи и целевое значение PRR. Входная спецификация имеет компактный вид, например: veh3:0.05:23:0.95 или veh4:0.923:-20:0.077. Такой механизм позволяет изменять качество связи только для заданных участников движения при неизменных дорожной сцене, начальных условиях и состояниях генераторов псевдослучайных последовательностей. За счет такой постановки достигается строгая изоляция влияния деградации сети на поведение подключенного беспилотного транспорта.

Трассировка пакетов с учетом идентификаторов

Каждому сообщению САМ присваивается уникальный идентификатор *pkt_uid*, сохраняющийся на всех этапах прохождения сообщения через вычислительный контур: передача, успешный

прием, потеря на физическом уровне и последующая обработка прикладным контроллером. Сквозная трассировка опирается на журналы MSG.csv, CTRL.csv и PROFILE.csv, формируемые для каждого транспортного средства. На этапе постобработки *pkt_uid* используется для сопоставления сетевых событий с последующими прикладными решениями, вследствие чего восстанавливается полная траектория отдельного сообщения через транспортный, сетевой и прикладной контуры. В серии экспериментов такой механизм обеспечивает полную прослеживаемость между зарегистрированными потерями и наблюдаемыми исходами для прикладного уровня.

Автоматизированный причинно-следственный аудит

Модуль причинно-следственного аудита предназначен для восстановления цепочки событий, в которой потеря сообщения приводит к отсутствию управляющего действия, а затем — к конфликтному или аварийному транспортному исходу. Процедура начинается с идентификации участников столкновения по журналу collision.xml, после чего из журналов движения и сетевого обмена извлекается временное окно, предшествующее столкновению. В пределах указанного окна количественно оцениваются потери, время поступления сообщений и прикладные решения типа «no action». В результате анализа сценарию присваивается причинно-следственная классификация, например: «strong_no_action_only», «mixed» или «weak». Такой подход переводит анализ из режима ручного просмотра разрозненных результатов моделирования в режим воспроизводимого доказательного контура, пригодного для серийных вычислительных экспериментов.

План экспериментов

Сценарий 1: предупреждение о приближении автомобиля экстренных служб с параметрическим перебором мощности передачи

Первый сценарий основан на открытом примере ms-van3t v2v-emergencyVehicleAlert-nrv2x [11]. Транспортные средства обмениваются САМ-сообщениями [3] при автономном распределении ресурсов NR-V2X Mode 2 [7, 22]. Параметрический перебор изменяет только мощность передачи *txPower*, тогда как траектории, параметры моделирования и начальные условия транспортной постановки остаются фиксированными. Для проверки устойчивости результата используются независимые значения *RngRun*. Характеристики

связи измеряются с помощью PRR [8]. Значимость сообщения для управления оценивается по времени первого приема САМ от автомобиля экстренных служб каждым приемником: чем позднее поступает первое предупреждение, тем меньше времени остается для формирования управляющего действия. По этой задержке рассчитываются медиана, 90-й процентиль и доверительные интервалы. Предварительные результаты указанной параметрической серии были апробированы в тезисах доклада [24].

Сценарий 2: конфликт на приоритетном перекрестке при раннем V2X-предупреждении

Второй сценарий рассматривает конфликт на приоритетном перекрестке. Транспортные средства *veh2* и *veh3* образуют конфликтную пару в зоне пересечения траекторий. Локальное обнаружение препятствия с помощью радара реализовано во всех режимах; сравнение позволяет установить, достаточно ли обнаружения только с помощью радара в быстром конфликте при отсутствии или запаздывании раннего V2X-предупреждения.

Серия экспериментов содержит три режима. В режиме «только радар» САМ-передача отключена. В режиме «радар + деградирован-

ная V2X-связь» САМ-передача активирована, но прием для *veh3* ухудшен. В режиме «радар + качественная V2X-связь» используется та же транспортная постановка, но без искусственного ухудшения приема сообщений для *veh3*. Для каждого режима выполнено 30 независимых итераций при $RngRun \in \{1, \dots, 30\}$; всего получено 90 наблюдений уровня «режим — *RngRun*». Геометрия перекрестка, маршруты *veh2* и *veh3*, длительность моделирования и локальное восприятие фиксируются, а различие между режимами связано с доступностью и качеством V2X-информации.

Меры обеспечения воспроизводимости

Все эксперименты соответствуют протоколу воспроизводимости [15]. Дорожная сеть, маршруты, микроскопические параметры SUMO, сетевые настройки, конфигурация Sionna RT для сценария перекрестка, мощность передатчика и состояния генераторов псевдослучайных чисел фиксируются и версионизируются. Помимо итоговых графиков, среда сохраняет исходные журналы CSV и XML, позволяющие независимо и повторно проанализировать каждый запуск. В сценарии предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб используется штатная конфигурация NR-V2X Mode 2 без внешнего расчета Sionna RT; ухудшение задается параметрами передачи для изоляции влияния качества приема. В сценарии перекрестка Sionna RT используется как геометрическая модель радиоканала.

Результаты

Результаты основаны на двух сериях независимых запусков экспериментов. В сценарии предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб выполнено 140 итераций: 14 уровней *txPower* и 10 независимых значений *RngRun* для каждого уровня. Итоговая выборка включает 2660 наблюдений задержки на уровне приемников и 947834 потенциальных приемов САМ-сообщений. В сценарии перекрестка выполнено 90 итераций: три режима доступности V2X-информации и 30 независимых значений *RngRun* для каждого режима. Такая постановка устраняет прежнее ограничение одиночного запуска и позволяет оценивать устойчивость выводов по повторным реализациям сетевых случайных процессов.

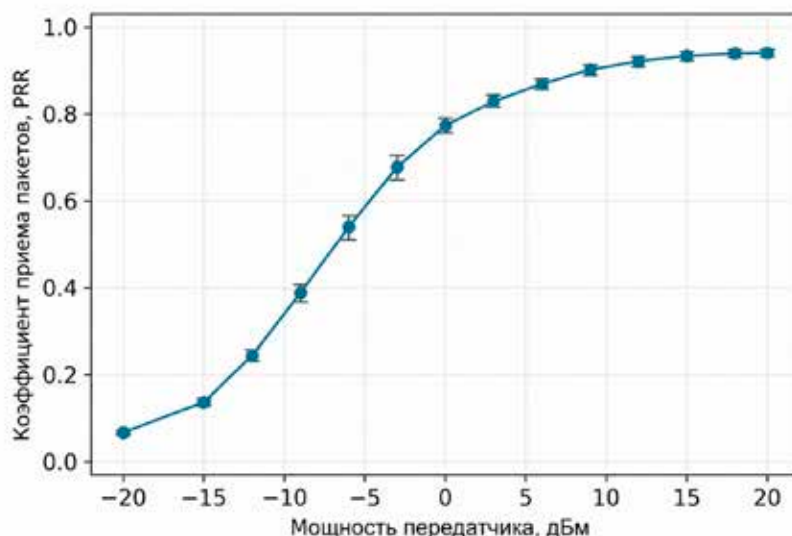


Рис. 2. Зависимость PRR приема САМ от мощности передачи *txPower*; интервалы соответствуют 95% доверительным интервалам по 10 независимым итерациям для каждого уровня мощности. Источник: авторы исследования

PRR как функция мощности передачи

Рисунок 2 показывает, что PRR монотонно возрастает с увеличением мощности передачи в условиях NR-V2X Mode 2. При минимальной мощности -20 дБм значение PRR составляет $0,0675$, а при максимальной мощности 20 дБм достигает $0,9412$. Переход имеет выражено

Задержка кооперативной реакции

На рисунке 3 приведен 90-й процентиль задержки первого приема CAM как функция PRR. Переход от устойчивого приема к деградированному режиму сопровождается ростом верхних процентилей задержки первого предупреждения. При $PRR = 0,9412$ значение 90-го процентилей задержки первого приема CAM равно $4,45$ с, 95% доверительный интервал составляет $4,11$ – $5,32$ с. При $PRR = 0,0675$ значение возрастает до $32,52$ с, 95% доверительный интервал составляет $31,99$ – $33,46$ с. Следовательно, ухудшение приема влияет не только на долю доставленных сообщений, но и на момент поступления пригодной для управления информации.

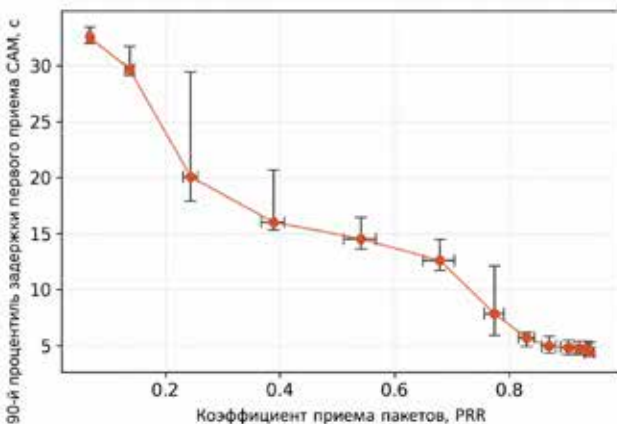


Рис. 3. Зависимость 90-го процентилей задержки первого приема CAM от PRR; показаны 95% доверительные интервалы. Источник: авторы исследования

Устойчивость результата и ранговая корреляция

Устойчивость вывода проверена на основе распределения задержки первого приема CAM по приемникам и независимым итерациям эксперимента с различными значениями *RngRun*. Рост задержки наблюдается не в одном запуске, а в серии запусков с различными начальными состояниями генераторов псевдослучайных последовательностей. Такая проверка исключает интерпретацию результата как артефакта отдельной реализации сетевых случайных процессов.

нелинейный характер, причем наиболее резкое изменение наблюдается в промежуточной области мощности. Следовательно, изменение *txPower* позволяет сформировать несколько уровней качества связи и проверить, как изменение PRR влияет на задержку получения предупреждения.

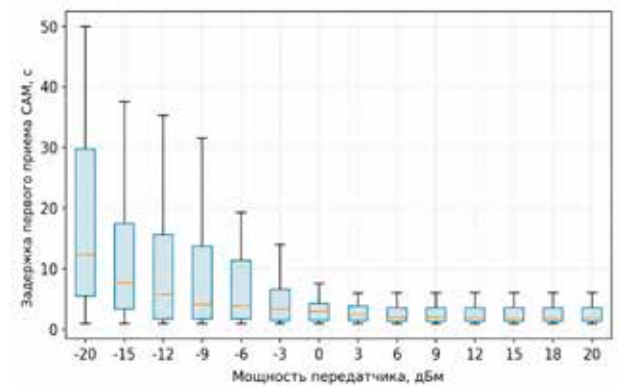


Рис. 4. Распределение задержки первого приема CAM по приемникам и независимым итерациям эксперимента с разными значениями *RngRun* для разных уровней *txPower*.

Источник: авторы исследования

Для количественной проверки связи между *txPower*, PRR и задержкой первого предупреждения использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Метод выбран как непараметрическая мера монотонной связи: расчет выполняется по рангам и не требует линейной формы зависимости. Такой подход особенно важен для параметрической серии экспериментов с нелинейной связью между *txPower*, PRR и задержкой, а также при наличии повторяющихся уровней *txPower*. В описании NIST коэффициент Спирмена определяется как корреляция Пирсона, вычисляемая по рангам двух выборок; при совпадающих наблюдениях применяются средние ранги [25]. Предметная применимость метода подтверждается работами по моделированию VANET, где ранговая корреляция используется для сопоставления параметров сценария с сетевыми метриками, включая коэффициент доставки пакетов, пропускную способность и задержку в *ns-3* [26].

Пусть x_i обозначает значение варьируемого параметра в i -м наблюдении, а y_i обозначает значение анализируемой метрики. После ранжирования выборок формируются ранги $R(x_i)$ и $R(y_i)$. Коэффициент Спирмена рассчитывается как коэффициент корреляции Пирсона между ранговыми значениями:

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \bar{R}_x) (R(y_i) - \bar{R}_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \bar{R}_x)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (R(y_i) - \bar{R}_y)^2}}, \quad (1)$$

где n — объем выборки, $R(x_i)$ и $R(y_i)$ — ранги наблюдений, $\bar{R}_x$ и $\bar{R}_y$ — средние значения соответствующих рангов.

При отсутствии совпадающих рангов используется эквивалентная сокращенная форма записи:

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad d_i = R(x_i) - R(y_i), \quad (2)$$

В расчетах применена общая формула через корреляцию ранговых векторов, так как экспериментальная матрица содержит повторяющиеся

уровни txPower и повторяющиеся значения метрик по независимым итерациям. Сокращенная форма через сумму квадратов разностей рангов приведена как справочная запись для случая без совпадающих рангов.

Расчет выполнен по 140 наблюдениям уровня «txPower — RngRun». Для пары txPower-PRR получено $\rho_s = 0,981$ при $p < 0,001$, что фиксирует устойчивый монотонный рост PRR при увеличении мощности передачи. Для пары PRR-P90 получено $\rho_s = 0,927$ при $p < 0,001$, что фиксирует устойчивую обратную связь между качеством приема и верхним процентилем задержки первого приема САМ. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета ранговой корреляции Спирмена

Пара параметров	n	ρ	p	Тип связи
txPower-PRR	140	0,981	< 0,001	прямая
PRR-P90	140	-0,927	< 0,001	обратная

Источник: авторы исследования

Таким образом, снижение PRR приводит к росту верхних процентилей задержки кооперативной реакции. При высоком уровне приема сигнала предупреждение распространяется в пределах временного окна, пригодного для раннего изменения поведения участников движения. При глубокой деградации связи часть приемников получает предупреждение с задержкой, выходящей за пределы полезного временного окна.

Сценарий предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб демонстрирует ограниченность изолированных сетевых

метрик. PRR фиксирует долю доставленных сообщений, но не раскрывает момент поступления первого полезного предупреждения. Задержка первого приема САМ переводит сетевой результат в прикладную плоскость и характеризует временные условия кооперативной реакции. Совместный анализ PRR, P90 задержки и ранговой корреляции Спирмена подтверждает причинно-следственную цепочку: снижение качества доставки сообщений увеличивает задержку поступления актуальной информации, что ухудшает условия принятия решения контроллером транспортного средства.

Результаты сценария моделирования перекрестка

Сводные результаты сценария приоритетного перекрестка показывают различие между режимами с использованием только радара и режимом с параллельно поступающей актуальной V2X-информацией (табл. 2). В режимах «только радар» и «радар + деградированная V2X-связь» столкновение *veh3* с *veh2* зафиксировано во всех 30 итерациях. В режиме «радар + качественная V2X-связь» столкновения не зафиксированы. В квадратных скобках в табл. 2 приведены 95% доверительные интервалы.

В режимах с активной V2X-передачей качественная связь обеспечивает более высокий PRR приема САМ от *veh2* к *veh3*: 0,909 против 0,664 в деградированном режиме. Это различие сопровождается сдвигом времени первого полезного предупреждения: 2,060 с в режиме качественной V2X-связи против 4,794 с в режиме деградированной V2X-связи и 5,000 с в режиме «только радар». Качественная V2X-связь переносит поступление полезной информации в раннее временное окно относительно конфликта и предотвращает столкновение в выбранной геометрии.

Таблица 2

Сводные результаты сценария приоритетного перекрестка

Режим	N	PRR	Медиана предупреждения, с	Доля столкновений
Деградированная V2X-связь	30	0,664 [0,651; 0,678]	4,794 [4,771; 4,806]	1,000 [0,886; 1,000]
Только радар	30	н/д	5,000 [5,000; 5,000]	1,000 [0,886; 1,000]
Качественная V2X-связь	30	0,909 [0,898; 0,920]	2,060 [2,038; 2,272]	0,000 [0,000; 0,114]

Источник: авторы исследования

На рисунке 5 показано, что качественная V2X-связь переносит момент поступления первого полезного предупреждения в более раннее временное окно. На рисунке 6 показано, что только в режиме «радар + качественная V2X-связь» доля столкновений снижается до нуля.

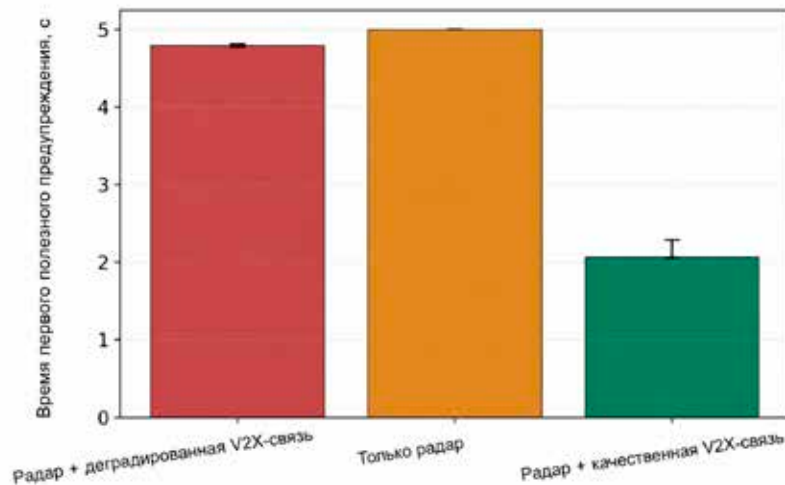


Рис. 5. Время первого полезного предупреждения в сценарии перекрестка для режимов локального обнаружения и V2X-связи. Источник: авторы исследования

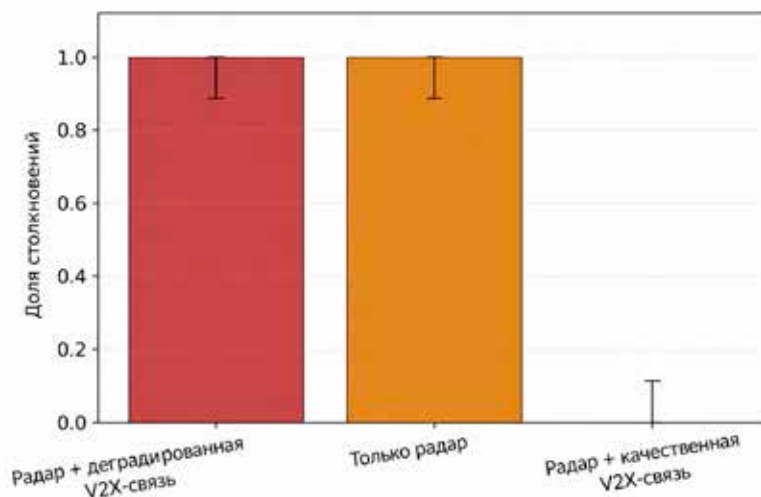


Рис. 6. Доля столкновений veh3 с veh2 в сценарии перекрестка для режимов локального обнаружения и V2X-связи. Источник: авторы исследования

Обсуждение

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что требования к системе связи для кооперативных функций безопасности не следует задавать только через средний PRR. В первом сценарии 90-й перцентиль задержки первого приема CAM возрастает нелинейно при снижении качества приема, а ранговая корреляция подтверждает устойчивую связь между $txPower$, PRR и P90 задержки. Поэтому поведенческие метрики, учитывающие одновременно как момент поступления пер-

вого полезного предупреждения, так и хвостовую область распределения задержки информации, более информативны для оценки безопасности, чем средние агрегированные сетевые метрики.

Трассировка с сохранением идентификаторов и автоматизированный причинно-следственный аудит позволяют атрибутировать транспортные исходы конкретным коммуникационным событиям, а не обобщенным представлениям о низком качестве канала. Такая возможность важна, когда среда используется не только для оценки производительности, но и для анализа отказов и исследо-

Ограничения и дальнейшая работа

Исследование имеет несколько ограничений. Представленные серии экспериментов повышают устойчивость выводов по сравнению с единичным запуском, но остаются ограниченными выбранными дорожными геометриями, прикладной логикой и диапазонами параметров связи. Сценарий предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб использует штатную конфигурацию NR-V2X Mode 2 без внешнего расчета Sionna RT. Полученные значения не следует переносить на все дорожные конфигурации.

Текущий анализ сосредоточен на первом полезном предупреждении, PRR, верхних процентилях задержки и факте столкновения. В работе не рассматривается поведение транспортного средства после первого маневра при длительном

Заключение

В статье представлена воспроизводимая среда совместного имитационного моделирования для оценки влияния потерь сообщений 5G NR-V2X Mode 2 на поведение подключенных беспилотных транспортных средств. Среда объединяет SUMO, TraCI, ns-3/ms-van3t, 5G-LENA NR sidelink и Sionna RT, а также профили качества линии связи для отдельных транспортных средств, трассировку сообщений с сохранением идентификаторов и модуль автоматизированного причинно-следственного аудита. Такая связка обеспечивает сквозной анализ — от деградации беспроводной связи до прикладного решения и транспортного исхода.

Предложенная методология продемонстрирована на двух сценариях. В сценарии предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб снижение PRR с 0,9412 до 0,0675 увеличило 90-й процентиль задержки первого приема CAM с 4,45 до 32,52 с. Проверка по 140 наблюдениям уровня «txPower — RngRun» показала прямую ранговую связь между txPower и PRR и обратную

связь пространства проектных решений.

Параметрическое изменение мощности передатчика для отдельных транспортных средств дает практический механизм изоляции эффектов связи. Поскольку геометрия дороги остается фиксированной, а деградирует только уровень сети для конкретного транспортного средства либо изменяется режим доступности V2X-информации, поставленные эксперименты позволяют явно отобразить влияние сети на поведение подключенного беспилотного транспорта.

ухудшении V2X-связи. За пределами исследования также остаются устойчивость маневров при повторяющихся потерях сообщений и серии потерь, возникающие из-за конфликтов доступа к радиоресурсам в NR-V2X Mode 2 [7].

Дальнейшая работа будет направлена на расширение контура аудита за счет включения промежуточных переменных, в том числе времени между приемами пакетов и возраста информации, на оценку дополнительных кооперативных приложений, таких как движение в колонне [27], на проведение статистических кампаний с доверительными интервалами и на сопоставление результатов моделирования с измерениями на экспериментальном стенде V2X.

связь между PRR и P90. В сценарии приоритетного перекрестка качественная V2X-связь снизила медиану первого полезного предупреждения до 2,060 с и устранила столкновения во всех 30 независимых итерациях, тогда как режимы «только радар» и «радар + деградированная V2X-связь» приводили к столкновению во всех итерациях.

Полученные результаты показывают, что деградацию связи необходимо оценивать совместно на сетевом, прикладном и транспортном уровнях. PRR характеризует долю доставленных сообщений, задержка первого приема CAM описывает момент поступления полезной информации в прикладной контур, а транспортный исход фиксирует итог сценария. Совместный анализ указанных уровней формирует основу для достоверной оценки рисков безопасности, вызванных нарушениями обмена V2X-сообщениями в сценариях подключенного беспилотного движения.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 25–29–00551).

Список литературы

1. SAE International. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles: SAE J3016. Rev. Apr. 2021.—DOI 10.4271/J3016_202104.
2. NHTSA. Vehicle-to-Vehicle Communication: Readiness of V2V Technology for Application: DOT HS812014.—Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2014.
3. ETSI EN302 637-2 V1.4.1. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.—Sophia Antipolis: ETSI, 2019.
4. ETSI EN302 637-3 V1.3.1. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specification of Decentralized Environmental Notification Basic Service.—Sophia Antipolis: ETSI, 2019.
5. Viriyasitavat W., Boban M., Tsai H.—M., Vasilakos A. Vehicular communications: Survey and challenges of channel and propagation models // IEEE Vehicular Technology Magazine.—2015.—Vol. 10, no. 2.—P. 55–66.—DOI 10.1109/MVT.2015.2410341.
6. Abd-Elmagid M. A., Pappas N., Dhillon H. S. On the role of age of information in the Internet of Things // IEEE Communications Magazine.—2019.—Vol. 57, no. 12.—P. 72–77.—DOI 10.1109/MCOM.001.1900041.
7. Harounabadi M. et al. V2X in 3GPP standardization: NR sidelink in Rel-16 and beyond // IEEE Communications Standards Magazine.—2021.—Vol. 5, no. 1.—P. 12–21.—DOI 10.1109/MCOMSTD.001.2000070.
8. 3GPP TR37.885. Study on evaluation methodology of new V2X use cases for LTE and NR. Version 15.3.0.—3GPP, 2019.
9. Sommer C., German R., Dressler F. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis // IEEE Transactions on Mobile Computing.—2011.—Vol. 10, no. 1.—P. 3–15.—DOI 10.1109/TMC.2010.133.
10. Eclipse MOSAIC. Multi-Domain and Multi-Scale Simulation for Connected and Automated Mobility [Электронный ресурс].—URL: <https://eclipse.dev/mosaic/> (дата обращения: 28.05.2026).
11. DriveX-devs. ms-van3t: Multi-stack vehicular network simulation framework [Электронный ресурс].—URL: <https://github.com/DriveX-devs/ms-van3t> (дата обращения: 28.05.2026).
12. DriveX-devs. VaN3Twin: Vehicular digital twin framework with ray-tracing-in-the-loop [Электронный ресурс].—URL: <https://github.com/DriveX-devs/VaN3Twin> (дата обращения: 28.05.2026).
13. Boban M., Barros J., Tonguz O. K. Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation // IEEE Transactions on Vehicular Technology.—2014.—Vol. 63, no. 9.—P. 4146–4164.—DOI 10.1109/TVT.2014.2317803.
14. Boban M., Vinhoza T. T. V., Ferreira M., Barros J., Tonguz O. K. Impact of vehicles as obstacles in vehicular ad hoc networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications.—2011.—Vol. 29, no. 1.—P. 15–28.—DOI 10.1109/JSAC.2011.110103.
15. Stepanyants V. G., Romanov A. Yu. A survey of integrated simulation environments for connected automated vehicles: Requirements, tools, and architecture // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine.—2024.—Vol. 16, no. 2.—P. 6–22.—DOI 10.1109/MITS.2023.3335126.
16. Molina-Masegosa A., Gozalvez J., Sepulcre M. Comparison of IEEE802.11p and LTE-V2X: An evaluation with periodic and aperiodic messages of constant and variable size // IEEE Access.—2020.—Vol. 8.—P. 121526–121548.—DOI 10.1109/ACCESS.2020.3007115.
17. FHWA. Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report. FHWA-HRT-08-051.—McLean, VA: Federal Highway Administration, 2008.
18. Sun Y., Uysal-Biyikoglu E., Yates R. D., Koksall C. E., Shroff N. B. Update or wait: How to keep your data fresh // IEEE Transactions on Information Theory.—2017.—Vol. 63, no. 11.—P. 7492–7508.—DOI 10.1109/TIT.2017.2735804.
19. 3GPP TS23.287 V17.5.0. Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services.—3GPP, 2022.
20. Krajzewicz D., Erdmann J., Behrisch M., Bieker L. Recent development and applications of SUMO — Simulation of Urban Mobility // International Journal on Advances in Systems and Measurements.—2012.—Vol. 5, no. 3–4.—P. 128–138.
21. Hoydis J. et al. Sionna RT: Differentiable Ray Tracing for Radio Propagation Modeling [Электронный ресурс].—arXiv, 2023.—DOI 10.48550/ARXIV.2303.11103.
22. 3GPP TS38.321. NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification. Release 16. Version 16.7.0.—3GPP, 2021.
23. ETSI TS103 324 V2.1.1. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications;

Collective Perception Service; Release 2.—Sophia Antipolis: ETSI, 2023.

24. Физулин А. В. Влияние потерь сообщений 5G NR-V2X Mode 2 на задержку кооперативной реакции в сценарии предупреждения о приближении автомобиля экстренных служб // Конференция им. Е. В. Арменского. Секция 7 «Телекоммуникационные системы и сети»: тезисы доклада.—Москва: НИУ ВШЭ, 2026.—В печати.

25. National Institute of Standards and Technology. Rank Correlation Independence Test // Dataplot Reference Manual [Электронный ресурс].—URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman1/auxillar/rankcorr.htm> (дата обращения: 16.05.2026).

26. Manurung R. C., Perdana D., Munadi R. Performance evaluation Gauss-Markov mobility model in vehicular ad-hoc network with Spearman correlation coefficient // 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA).—Lombok: IEEE, 2016.—P. 351–356.—DOI 10.1109/ISITIA.2016.7828685.

27. Heinovski J., Buse D. S., Dressler F. Scalable Simulation of Platoon formation maneuvers with PlaFoSim // Proceedings of the IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Poster Session.—2021.—P. 137–138.—DOI 10.1109/VNC52810.2021.9644678.

References

1. SAE International—Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles: SAE J3016. Rev. Apr. 2021. DOI: 10.4271/J3016_202104.

2. NHTSA—Vehicle-to-Vehicle Communication: Readiness of V2V Technology for Application: DOT HS812014. Washington, DC, National Highway Traffic Safety Administration, 2014.

3. ETSI EN302 637–2 V1.4.1—Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. Sophia Antipolis, ETSI, 2019.

4. ETSI EN302 637–3 V1.3.1—Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specification of Decentralized Environmental Notification Basic Service. Sophia Antipolis, ETSI, 2019.

5. Viriyasitavat W., Boban M., Tsai H.—M., Vasilakos A.—Vehicular communications: Survey and challenges of channel and propagation models. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 55–66. DOI: 10.1109/MVT.2015.2410341.

6. Abd-Elmagid M. A., Pappas N., Dhillon H. S.—On the role of age of information in the Internet of Things. IEEE Communications Magazine, 2019, vol. 57, no. 12, pp. 72–77. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900041.

7. Harounabadi M. et al.—V2X in 3GPP standardization: NR sidelink in Rel-16 and beyond. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 12–21. DOI: 10.1109/MCOM-STD.001.2000070.

8. 3GPP TR37.885—Study on evaluation methodology of new V2X use cases for LTE and NR. Version 15.3.0. 3GPP, 2019.

9. Sommer C., German R., Dressler F.—Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, vol. 10, no. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1109/TMC.2010.133.

10. Eclipse MOSAIC—Multi-Domain and Multi-Scale Simulation for Connected and Automated Mobility. Available at: <https://eclipse.dev/mosaic/> (accessed 28.05.2026).

11. DriveX-devs—ms-van3t: Multi-stack vehicular network simulation framework. Available at: <https://github.com/DriveX-devs/ms-van3t> (accessed 28.05.2026).

12. DriveX-devs—VaN3Twin: Vehicular digital twin framework with ray-tracing-in-the-loop. Available at: <https://github.com/DriveX-devs/VaN3Twin> (accessed 28.05.2026).

13. Boban M., Barros J., Tonguz O. K.—Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, vol. 63, no. 9, pp. 4146–4164. DOI: 10.1109/TVT.2014.2317803.

14. Boban M., Vinhoza T. T. V., Ferreira M., Barros J., Tonguz O. K.—Impact of vehicles as obstacles in vehicular ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, vol. 29, no. 1, pp. 15–28. DOI: 10.1109/JSAC.2011.110103.

15. Stepanyants V. G., Romanov A. Yu.—A survey of integrated simulation environments for connected automated vehicles: Requirements, tools, and architecture. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 6–22. DOI: 10.1109/MITS.2023.3335126.

16. Molina-Masegosa A., Gozalvez J., Sepulcre M.—Comparison of IEEE802.11p and LTE-V2X: An evaluation with periodic and aperiodic messages

of constant and variable size. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 121526–121548. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007115.

17. FHWA—Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report. FHWA-HRT-08–051. McLean, VA, Federal Highway Administration, 2008.

18. Sun Y., Uysal-Biyikoglu E., Yates R. D., Koksall C. E., Shroff N. B.—Update or wait: How to keep your data fresh. IEEE Transactions on Information Theory, 2017, vol. 63, no. 11, pp. 7492–7508. DOI: 10.1109/TIT.2017.2735804.

19. 3GPP TS23.287 V17.5.0—Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services. 3GPP, 2022.

20. Krajzewicz D., Erdmann J., Behrisch M., Bieker L.—Recent development and applications of SUMO—Simulation of Urban Mobility. International Journal on Advances in Systems and Measurements, 2012, vol. 5, no. 3–4, pp. 128–138.

21. Hoydis J. et al.—Sionna RT: Differentiable Ray Tracing for Radio Propagation Modeling. arXiv, 2023. DOI: 10.48550/ARXIV.2303.11103.

22. 3GPP TS38.321—NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification. Release 16. Version 16.7.0. 3GPP, 2021.

23. ETSI TS103 324 V2.1.1—Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Collective Perception Service; Release 2. Sophia Antipolis, ETSI, 2023.

24. Fizulin A. V.—Vliyaniye poter soobshchenij 5G NR-V2X Mode 2 na zaderzhku kooperativnoj reaktsii v stsennarii preduprezhdeniya o priblizhenii avtomobilya ekstrennykh sluzhbb [The impact of 5G NR-V2X Mode 2 message losses on cooperative response delay in the emergency vehicle warning scenario]. In: Konferentsiya im. E. V. Armenskogo. Sektsiya 7 “Telekommunikatsionnye sistemy i seti”: tezisy doklada. Moscow, HSE University, 2026. In press. (In Russ.).

25. National Institute of Standards and Technology—Rank Correlation Independence Test. Dataplot Reference Manual. Available at: <https://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman1/auxillar/rankcorr.htm> (accessed 16.05.2026).

26. Manurung R. C., Perdana D., Munadi R.—Performance evaluation Gauss–Markov mobility model in vehicular ad hoc network with Spearman correlation coefficient. In: 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). Lombok, IEEE, 2016, pp. 351–356. DOI: 10.1109/ISITIA.2016.7828685.

27. Heinovski J., Buse D. S., Dressler F.—Scalable Simulation of Platoon formation maneuvers with PlaFoSim. In: Proceedings of the IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Poster Session. 2021, pp. 137–138. DOI: 10.1109/VNC52810.2021.9644678.

Сведения об авторах	Information about the authors
Романов Александр Юрьевич доктор технических наук, доцент, профессор Департамента компьютерной инженерии ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова заместитель заведующего лабораторией интеллектуальных беспилотных систем МИЭМ НИУ ВШЭ руководитель учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования МИЭМ НИУ ВШЭ Адрес: 123458, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34 ORCID: 0000–0002–9410–9431 E-mail: a.romanov@hse.ru	Romanov Alexander Yurievich Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Professor of the Department of Computer Engineering, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM HSE) Deputy Head, Laboratory of Intelligent Unmanned Systems, MIEM HSE; Head, Laboratory of Computer-aided Design Systems, MIEM HSE Address: 34 Tallinskaya Street, Moscow, 123458, Russia ORCID: 0000–0002–9410–9431 E-mail: a.romanov@hse.ru
Степаныц Виталий Гургенович аспирант образовательной программы «Системный анализ. Математическое моделирование. Информационные технологии» по специальности «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования» старший преподаватель Департамента компьютерной инженерии ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова заместитель заведующего лабораторией интеллектуальных беспилотных систем МИЭМ НИУ ВШЭ стажер-исследователь учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования МИЭМ НИУ ВШЭ Адрес: 123458, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34 ORCID: 0009–0000–0070–1286 E-mail: vg.stepanyants@hse.ru	Stepanyants Vitaly Gurgenovitch Postgraduate Student, Educational Programme “Systems Analysis. Mathematical Modelling. Information Technologies”, specialisation “Computer Modelling and Computer-Aided Design”; Senior Lecturer, School of Computer Engineering; HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM HSE) Deputy Head, Laboratory of Intelligent Unmanned Systems, MIEM HSE; Research Trainee, Academic Laboratory of Computer-Aided Design Systems, MIEM HSE Address: 34 Tallinskaya Street, Moscow, 123458, Russia ORCID: 0009–0000–0070–1286 E-mail: vg.stepanyants@hse.ru
Физулин Андрей Вадимович магистрант образовательной программы «Интернет вещей и киберфизические системы» по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова инженер лаборатории интеллектуальных беспилотных систем МИЭМ НИУ ВШЭ инженер-конструктор бюро телематических сервисов АО «АВТОВАЗ» Адрес: 123458, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34 ORCID: 0009–0001–5327–203X E-mail: afizulin@hse.ru	Fizulin Andrey Vadimovich Master’s Student, Educational Programme “Internet of Things and Cyber-Physical Systems”, field of “Infocommunication Technologies and Communication Systems”, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM HSE) Engineer, Laboratory of Intelligent Unmanned Systems, MIEM HSE; Design Engineer, Telematics Services Bureau, JSC AVTOVAZ Address: 34 Tallinskaya Street, Moscow, 123458, Russia ORCID: 0009–0001–5327–203X E-mail: afizulin@hse.ru

Статья получена 25.05.2026 | статья опубликована 25.06.2026

Article received 25.05.2026 | Article published 25.06.2026