



Интегрированная среда моделирования для верификации и валидации программ управления подключенными и высокоавтоматизированными транспортными средствами

В.Г. Степанянц, ORCID: 0009-0000-0070-1286 <vg.stepanyants@hse.ru>
Г.С. Хорошилов, ORCID: 0009-0005-1341-1321 <gskhoroshilov_1@edu.hse.ru>
И.М. Долгов, ORCID: 0009-0007-7737-0412 <imdolgov@edu.hse.ru>
Е.А. Нархов, ORCID: 0009-0009-3519-8807 <eanarkhov_1@edu.hse.ru>
А.В. Карпукхин, ORCID: 0009-0005-9449-9803 <avkarpukhin_1@edu.hse.ru>
 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
 Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20.

Аннотация. На рынок постепенно выходят высокоавтоматизированные и подключенные транспортные средства (ТС). В настоящее время предлагаются решения, позволяющие использовать эти технологии для совместного управления дорожным движением, что может значительно повысить его безопасность. В статье анализируются требования к интегрированной среде моделирования подключенных и высокоавтоматизированных ТС и совместной автоматизации управления дорожным движением с высокодетализированным учетом влияния окружающих объектов. Проанализированы существующие проблемы и практики. Рассмотрены инструменты CARLA, OpenCDA, SUMO, OMNeT++, Artery. Предложена архитектура интегрированной среды моделирования CAVISE с полным охватом предметной области с использованием перечисленных инструментов, которая позволяет создать интерфейс CAPI (CAVISE API) между существующими инструментами для моделирования подключенного и высокоавтоматизированного ТС и его программного обеспечения (ПО) в контролируемом окружении. Приводится подробное описание разработанного интерфейса и результаты его апробации для верификации ПО подключенных высокоавтоматизированных ТС с использованием алгоритмов совместного восприятия. Разработанный интерфейс позволяет впервые среди инструментов с открытым исходным кодом проводить моделирование подключенных высокоавтоматизированных ТС с учетом реальных алгоритмов и ПО машинного восприятия и обмена информацией по беспроводным каналам связи. Полученные выводы могут быть в дальнейшем использованы при исследовании и разработке технологий и ПО высокоавтоматизированных ТС.

Ключевые слова: высокоавтоматизированные транспортные средства; подключенные транспортные средства; интегрированная среда моделирования; высокодетализированное моделирование; совместное восприятие; совместное управление дорожным движением.

Для цитирования: Степанянц В.Г., Хорошилов Г.С., Долгов И.М., Нархов Е.А., Карпукхин А.В. Интегрированная среда моделирования для верификации и валидации программ управления подключенными и высокоавтоматизированными транспортными средствами. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 3, часть 2, 2026 г., стр. 95–110. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-23.

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

Integrated Simulation Environment for Verification and Validation of Connected and Automated Vehicle Control Software

V.G. Stepanyants, ORCID: 0009-0000-0070-1286 <vg.stepanyants@hse.ru>
G.S. Khoroshilov, ORCID: 0009-0005-1341-1321 <gskhoroshilov_1@edu.hse.ru>
I.M. Dolgov, ORCID: 0009-0007-7737-0412 <imdolgov@edu.hse.ru>
E.A. Narkhov, ORCID: 0009-0009-3519-8807 <eanarkhov_1@edu.hse.ru>
A.V. Karpukhin, ORCID: 0009-0005-9449-9803 <avkarpukhin_1@edu.hse.ru>

*HSE University,
 20, Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russia.*

Abstract. Highly automated and connected vehicles are gradually entering the market. Currently, solutions are being proposed that allow these technologies to be used for cooperative driving automation, which can significantly improve traffic safety. Such technologies and their software should be tested to ensure safety before being implemented in real systems. Verification and validation of vehicular control software in the real world are difficult. Therefore, simulation computer modeling is used for this purpose. The simulation of connected and automated vehicles requires the combined use of traffic flow models, vehicle dynamics models, and automotive communication network simulators. Modern tools exist in these areas, but they are difficult to combine together, or they do not fully cover the technology domain. This article analyzes the requirements for an integrated simulation environment for modeling connected and cooperative driving automation with highly detailed consideration of the influence of surrounding objects. To this end, the existing problems and practices were analyzed. The tools CARLA, OpenCDA, SUMO, OMNeT++, Artery are considered. Taking into account the disadvantages of existing methods, the paper proposes the architecture of the CAVISE integrated modeling environment with full coverage of the subject area using the chosen open-source tools, which includes a CAPI (CAVISE API) interface between existing tools for modeling connected and automated vehicles and their software in a controlled environment. A detailed description of the developed interface and the results of its testing for the verification of connected automated vehicle software using cooperative perception algorithms are provided. The developed interface allows, for the first time among open-source tools, to simulate connected automated vehicles, simultaneously taking into account real algorithms and software for machine perception and information exchange over wireless communication channels. The findings can be further used in the research and development of technologies and software for connected and automated vehicles.

Keywords: automated vehicles; connected vehicles; integrated simulation environment; highly detailed simulation; cooperative perception; cooperative driving automation.

For citation: Stepanyants V.G., Khoroshilov G.S., Dolgov I.M., Narkhov E.A., Karpukhin A.V. Integrated Simulation Environment for Verification and Validation of Connected and Automated Vehicle Control Software. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 3, part 2, 2026, pp. 95-110 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-23.

Acknowledgements. The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 25-29-00551).

1. Введение

Урбанизация приводит к созданию все более сложных, небезопасных и перегруженных транспортных систем. Ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) погибает более 1,35 миллиона человек, и еще до 50 миллионов получают травмы или становятся инвалидами на всю жизнь. ДТП являются основной причиной смерти людей в возрасте от 5 до 29 лет [1]. По оценкам, с 2015 по 2030 год ущерб здоровью от ДТП обойдется мировой экономике в 1,8 трлн долларов США [2], в то время как стоимость потерь времени от неэффективности дорожного движения для общества только в ЕС оценивается в 270 млрд евро ежегодно [3]. Транспорт также является одним из основных источников выбросов парниковых газов и загрязнения воздуха [4].

Частично решения этих проблем разрабатываются в области технологий высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) и подключенных транспортных средств (ПТС). ВАТС планируют свое движение, полагаясь исключительно на свои датчики. Таким образом, их возможности планирования траектории ограничены дальностью обнаружения датчиков. ПТС взаимодействуют посредством радиосигналов, обмениваясь сообщениями с другими участниками дорожного движения или объектами придорожной инфраструктуры в пределах их досягаемости. Эти технологии могут дополнять друг друга (ПВАТС), обеспечивая совместную автоматизацию управления дорожным движением (Cooperative Driving Automation – CDA). Технологии совместного восприятия (Cooperative Perception – CoP) [5] предполагают, что ПВАТС обмениваются своей локальной сенсорной информацией, что расширяет диапазон восприятия вплоть до границ дальности связи [6]. Благодаря большому количеству информации, доступной ПВАТС, могут быть реализованы более совершенные стратегии управления, что делает технологии CDA все более привлекательными в последние годы.[7]. ПВАТС могут повысить безопасность дорожного движения [8] и уменьшить количество заторов [9], потребление энергии [10] и углеродный след [11].

Выгоды от технологий ПВАТС зависят от стратегии их внедрения [12-14]. Поэтому, прежде чем такие технологии можно будет использовать на дорогах общего пользования, требуется их верификация и валидация. Возможности для верификации и валидации в реальном мире очень ограничены из-за высокой стоимости, проблем безопасности и начальной стадии развития данных технологий. Поэтому разработка моделей верификации должна осуществляться с использованием компьютерного моделирования. При моделировании ПВАТС и безопасности дорожного движения используется микроскопическое и наноскопическое моделирование. Микроскопические симуляторы дорожного движения учитывают упрощенное взаимодействие между транспортными средствами. Для точной оценки безопасности дорожного движения, поведенческих различий во взаимодействии и восприятии участников дорожного движения используются наноскопические симуляторы [15-16].

Для тестирования различных аспектов ПВАТС было разработано множество инструментов моделирования [16-18]. В предыдущих работах был проведен обзор более 30 коммерческих инструментов и 60 инструментов с открытым исходным кодом, который показал, что современные симуляторы не учитывают важные технологические аспекты и лишь частично представляют тестируемые системы, не позволяя одновременно тестировать реальное программное обеспечение (ПО) для машинного восприятия ВАТС и ПО для организации сетевого взаимодействия ПТС [19]. В этой статье исследуются ограничения существующих симуляторов для технологий ПВАТС, дается обзор требований к более комплексному инструменту для моделирования и анализа влияния изменяющейся обстановки и динамики транспортного средства на восприятие и коммуникацию при управлении автомобилем. На основе анализа разработана архитектура интегрированной среды моделирования ПВАТС CAVISE (Connected and Automated Integrated Simulation Environment), объединяющая современные инструменты CARLA [20], OpenCDA [21], SUMO [22], OMNeT++ [23] и Artery [24] с помощью интерфейса прикладного программирования CAPI (CAVISE Application Programming Interface).

2. Требования к среде моделирования ПВАТС

На сегодняшний день большинство исследований в области ПВАТС основаны на компьютерном моделировании из-за высокой стоимости испытаний в реальных условиях. Существуют коммерческие инструменты для моделирования ВАТС и ПТС, такие как DRIVE Sim от NVIDIA [25], 51Sim-One от 51World [26], Baidu Apollo [27], Waymo Carcraft [28], VIRES Virtual Test Drive [29], Foretellix [30], Cognata [31], PanoSim [32], Octopus от Huawei

[33], dSPACE [34], RTMaps [35], SILAB [36], CarSim [37], rFpro [38], DYNA4 от Vector [39], C-V2XSim от Fraunhofer ISS [40], Unity SystemGraph [41], BeamNG.tech от BeamNG [42], PreScan от TASS (Siemens) [43], VRXPERIENCE [44] и Autonomous Vehicle Simulation [45] от Ansys, SCANer от AVSimulation [46], Applied Intuition [47], VI-grade (панель RightHook) [48], monoDrive [49], Truevision.ai [50], 4DV-SIM от 4D-Virtualiz [51], TAD Sim 2.0 от Tencent [52], ESI PROSIVIC [53], AB Dynamics [54], и DYNACAR от TECNALIA [55]. Некоторые инструменты для моделирования сценариев дорожного движения и верификации работы ПО были также разработаны в виде надстроек для компьютерных игр – например, Grand Theft Auto V (GTA V) [56]. Однако такие инструменты не доступны для широкого использования и имеют закрытый исходный код, не позволяющий при необходимости проводить их доработку под новые задачи и виды технологий и ПО. Поэтому в данном исследовании основное внимание направлено на рассмотрение инструментов с открытым исходным кодом. Далее приведены требования к разработке современных сред моделирования ПВАТС, которым должны соответствовать инструменты, чтобы их можно было использовать для верификации реального ПО ПВАТС.

2.1 Учет широкого набора технологических областей

Анализ систем ПВАТС требует рассмотрения нескольких областей технологий. Для ВАТС такими областями являются транспортный поток и восприятие окружающей обстановки каждым транспортным средством с помощью датчиков. Для ПТС такими областями являются транспортный поток, сетевые коммуникации и распространение сигналов. Игнорирование любой из этих областей означает игнорирование того, как они влияют друг на друга. Если учитывать только поток трафика, модели теряют вариативность, возникающую из-за взаимодействия между ними.

Для каждой предметной области существуют различные типы симуляторов и моделей. Восприятие можно моделировать с помощью трехмерных графических сред, таких как реалистичные графические симуляторы, компьютерные игры или симуляторы робототехники [57]. Симуляторы дорожного движения предназначены для анализа дорожной сети и транспортных потоков. Сетевые симуляторы используются для оценки сетевых протоколов связи. Модели распространения сигналов направлены на учет характеристик распространения радиоволн в окружающей среде. Такие симуляторы и модели могут использоваться независимо друг от друга, но для удовлетворения потребностей анализа технологий ПВАТС требуется решение, в котором все они используются совместно [58].

2.2 Достоверность

Современные микроскопические симуляторы дорожного движения включают логику слежения за автомобилем и смены полосы движения для моделирования движения транспортного средства на многополосных участках дороги. Однако эти модели не обеспечивают адекватных боковых траекторий и поведения внутри полосы движения [59]. Для решения этой проблемы необходимо, по крайней мере, двумерное окружение, позволяющее точно отображать движение транспорта и динамику транспортного средства. Кроме того, транспортные средства, оснащенные различными технологиями машинного восприятия, испытывают уникальные эффекты благодаря взаимодействию с окружающей средой. Эти эффекты могут включать в себя затрудненное визуальное восприятие, потерю радиосигнала или задержку [60-61]. Однако в настоящее время во многих исследованиях, основанных на моделировании, считается, что диапазон восприятия и связи ПВАТС не ограничен. Поэтому наноскопическое моделирование в трехмерной среде используется для более точного отображения динамики транспортного средства, восприятия с помощью датчиков и средств связи, а также принятия решений [13, 16].

2.3 Ключевые компоненты для моделирования ПВАТС

Таким образом, можно выделить следующие ключевые компоненты симуляторов подключенного и высокоавтоматизированного транспорта.

2.3.1 Модели восприятия

Модели восприятия точно воспроизводят условия реального мира и имитируют восприятие сенсоров, в частности камер, лидаров и радаров.

2.3.2 Модели мобильности

Модели мобильности отражают движение транспортных средств, привязывая их движение к дорогам и учитывая их взаимодействие (например, изменение скорости в зависимости от условий дорожного движения).

2.3.3 Сетевые модели

Сетевые модели обеспечивают реалистичный обмен данными в автомобильных сетях. Они моделируют механизмы контроля доступа к среде (Medium Access Control – MAC), маршрутизацию и протоколы верхнего уровня.

2.3.4 Модели распространения сигналов

Модели распространения сигнала предназначены для реалистичного моделирования распространения радиосигнала в сложной среде автомобильной связи.

3. Архитектура интегрированной среды моделирования ПВАТС CAVISE

Исчерпывающий обзор инструментов для моделирования ПВАТС с открытым исходным кодом был проведен ранее [19], поэтому в данной работе будут подчеркнуты особенности только наиболее релевантных инструментов для рассматриваемых задач.

Наиболее актуальными симуляторами с открытым исходным кодом для моделирования ВАТС являются CARLA [20], LGSVL [62], и AirSim [63]. Робототехнические симуляторы, такие как Gazebo [64], Webots [65], и Chrono [66], предлагают более высокую физическую достоверность, но имеют более низкое качество графики и масштабируемость, которые необходимы для верификации ПО машинного восприятия ВАТС и ПО алгоритмов совместного восприятия ПВАТС.

CARLA и AirSim были разработаны с использованием Unreal Engine 4, в то время как LGSVL основан на Unity 3D (версия AirSim для Unity 3D также существует). Все три симулятора могут быть установлены на операционные системы Windows и Linux, AirSim также может быть установлен в macOS, а CARLA может быть установлена внутри контейнера Docker. Из этих трех симуляторов только CARLA и AirSim поддерживают моделирование нескольких управляемых транспортных средств, что делает LGSVL неподходящим для моделирования сценариев дорожного движения ПВАТС с использованием ПО алгоритмов совместного восприятия. По сравнению с CARLA, AirSim не обеспечивает достаточной точности динамики транспортных средств и не поддерживает моделирование передвижения пешеходов. CARLA предоставляет более широкий спектр функций, включая погодные условия, цифровые ресурсы, а также возможности создания карт и управления сценариями дорожного движения. Однако AirSim обладает некоторыми уникальными функциями, такими как вождение по бездорожью, и погодные сценарии, включающие снегопады. При этом, CARLA – единственный из трех инструментов, который до сих пор поддерживается и

активно развивается разработчиками. Кроме того, он имеет множество полезных интерфейсов – с SUMO, ROS, Chrono и другими инструментами.

Существует ряд сетевых симуляторов, таких как ns-2, ns-3, OMNET++, SWAN, OPNET, Jist, GloMoSiM и другие [67]. Однако для моделирования сетевого взаимодействия транспортных средств особого внимания заслуживают два симулятора с открытым исходным кодом: OMNeT++ и ns3. Среди них, ns3 демонстрирует значительно более высокую загрузку процессора для моделирования того же количества узлов (разница примерно в 10 раз для сотен узлов) [67]. Это важно при использовании сетевого симулятора как части интегрированной среды моделирования, где другие симуляторы будут запускаться одновременно для покрытия всех областей знаний, требуемых для ПВАТС.

Кроме того, существуют симуляторы для моделирования сетевого транспортного взаимодействия, которые включают в себя модели мобильности (обычно обеспеченные SUMO) и сетевого моделирования. Были рассмотрены фреймворки с открытым исходным кодом, такие как Veins, Eclipse MOSAIC, VENTOS, iTETRIS и TraNS [17]. Из них в настоящее время поддерживаются и обновляются только Veins и Eclipse MOSAIC.

Eclipse MOSAIC – это платформа для взаимодействия с различными симуляторами. Она поддерживает симуляторы мобильности SUMO, PTV Vissim и PHABMACS, а также сетевые симуляторы ns3, OMNeT++, Simple Network Simulator (SNS) и Eclipse MOSAIC Cell. Возможно также подключить другие симуляторы, такие как CARLA.

Veins [68], основанный на OMNeT++, SUMO и коммуникационном фреймворке INET [69], является более часто используемым и зрелым фреймворком с большим количеством доступных расширений. Другим подобным фреймворком является Artery [70], который был изначально разработан как дополнение к Veins для поддержки стандартов Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI C-ITS, но теперь может использоваться независимо.

OpenCDA [21] – это платформа моделирования с открытым исходным кодом для исследований совместной автоматизации управления дорожным движением с помощью ПВАТС. Она содержит модули ПО для обнаружения, вычисления, приведения в действие и совместных алгоритмов управления. CARLA и SUMO используются для визуализации окружающей среды, моделирования динамики транспортных средств и создания транспортного потока. Однако текущая версия OpenCDA не включает в себя сетевое моделирование и задержки передачи сообщений должны быть указаны непосредственно в программном коде при конфигурации сценария.

CARMA Simulation [71] – это платформа для моделирования CDA, которая объединяет CARLA, SUMO и ns3 с помощью Eclipse MOSAIC. Однако этот проект все еще находится в разработке, и в настоящее время в него интегрированы только CARLA и SUMO. Платформа CARMA Simulation использовалась для моделирования совместного восприятия без учета моделирования беспроводной связи ПТС [72], а в [73] использовалась для интеграции CARLA, SUMO и SNS (SNS – это упрощенный симулятор, который не обеспечивает моделирование распространения сигнала).

В результате анализа исследований сделан вывод, что ни один из существующих инструментов не реализует в полной мере все модули, необходимые для точного виртуального тестирования ПО ПВАТС, и им необходимы доработки для расширения их возможностей. Поэтому авторами разработана архитектура интегрированной среды моделирования ПВАТС CAVISE [19], которая подходила бы для моделирования CDA. Все ее модули доступны в виде проектов с открытым исходным кодом. В данной работе архитектура CAVISE дорабатывается за счет включения в нее интерфейса CAPI, который позволяет осуществлять синхронизированный двусторонний обмен данными между платформами моделирования OpenCDA и Artery, за счет чего возможно впервые реализовать моделирование технологий CDA с высокой детализацией.

На рис. 1 представлена предлагаемая архитектура. Черно-белыми рамками показаны существующие модули интегрированных систем моделирования, цветными – модули, работающие с одними и теми же данными (например, оранжевые и бирюзовые модули должны быть синхронизированы), а модули, обведенные красной рамкой – те, которые были добавлены вместе с интерфейсом CAPI.

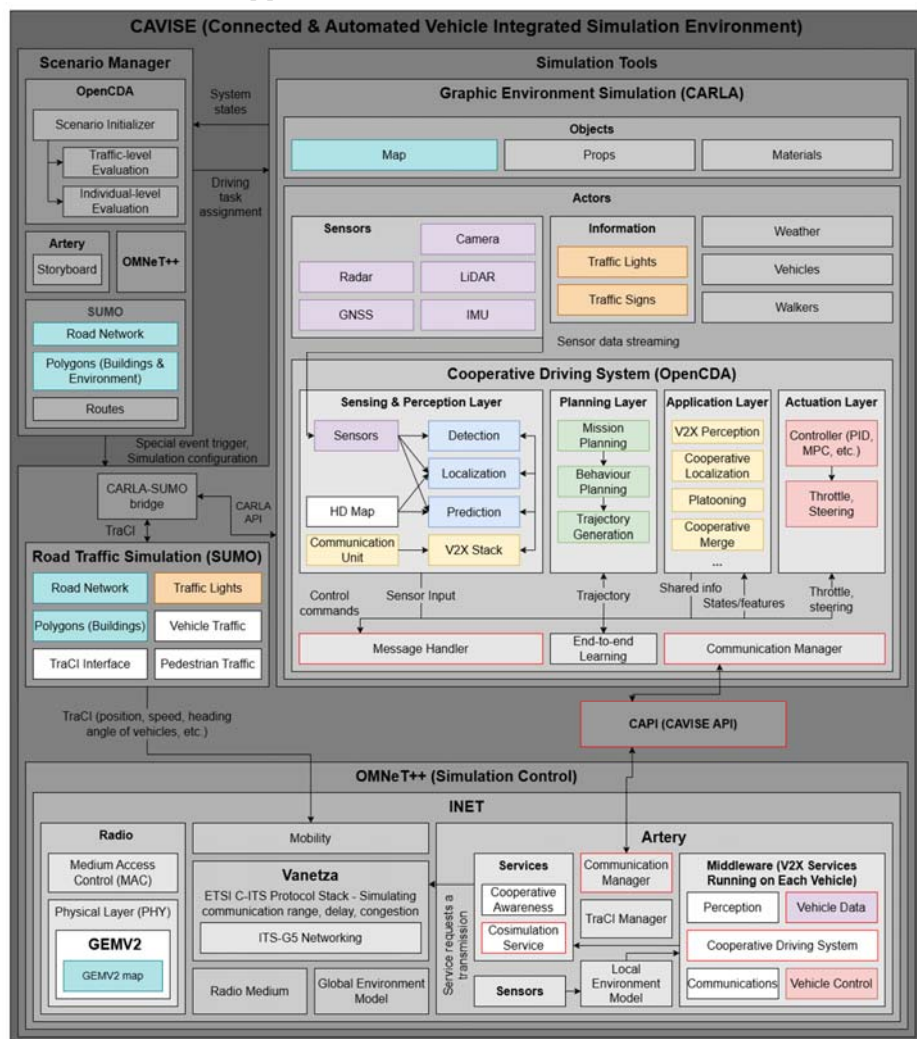


Рис. 1. Модульная архитектура предлагаемой интегрированной среды моделирования.
Fig. 1. Modular architecture of the proposed integrated simulation environment.

В качестве основы используется фреймворк OpenCDA, поскольку он включает в себя интеграцию с инструментами CARLA и SUMO. Для создания сетей и моделей распространения сигналов следует использовать Artery, интегрированную с платформой

INET [69], и модель GEMV2 [74], которые напрямую взаимодействуют с OpenCDA через интерфейс TraCI, предоставляемый SUMO.

OpenCDA предлагает комплексный пакет программного обеспечения, который включает в себя основные компоненты для управления ВАС: распознавание, планирование и приведения в действие решений. Для CoP и CDA сервер OpenCDA отправляет информацию с других транспортных средств клиенту каждого транспортного средства. Выполняются вычисления, и управляющие решения отправляются обратно на сервер.

Artery выступает в качестве центра взаимодействия сервисов связи Vehicle-to-Everything (V2X), работающих на каждом транспортном средстве. Artery сама по себе не предоставляет никакой имитационной модели беспроводной связи, но использует существующие модели. Модуль INET имитирует протокол беспроводного канального уровня для связи V2X, в то время как Vanetza [75] имитирует стек протоколов ETSI ITS-G5. Эти модули имитируют дальность связи, задержку сообщений и перегрузку каналов.

Протокол TraCI, предоставляемый SUMO, используется для взаимодействия OMNeT++ и CARLA для совместного синхронизированного моделирования. Этот протокол позволяет обмениваться данными о местоположении транспортного средства, скорости, угле поворота и датчиках между симуляторами.

Таким образом, данные датчиков с каждого транспортного средства CARLA передаются в Artery через разработанный интерфейс CAPI. Затем Artery моделирует работу автомобильной связи, чтобы определить, какие сообщения передаются и принимаются на каждом временном шаге. После получения сообщения ПВАТС рассчитывает данные с помощью CoP. Затем Artery снова моделирует обмен сообщениями, и улучшенные данные о восприятии могут быть использованы для CDA. Итоговые команды управления будут переданы обратно в CARLA.

Далее приводится подробное описание принципа работы интерфейса CAPI.

4. Интерфейс прикладного программирования CAPI

4.1 CommunicationManager (OpenCDA)

Communication Manager (OpenCDA) – программный модуль, реализующий компонент CAPI в составе OpenCDA. Предназначен для установления соединения, а также обмена сообщениями со сторонним сервисом (потому что Communication Manager – независимый компонент вызываемый в OpenCDA). В текущей реализации среды моделирования CAVISE посредством CAPI осуществляется подключение OpenCDA к Artery. В основе сетевого взаимодействия лежит ZeroMQ (Zero broker Message Queue) – высокоуровневая асинхронная библиотека для обмена сообщениями. ZeroMQ поддерживает множество паттернов коммуникации (Request-reply, Pub-Sub, Pipeline, Exclusive pair, Client-server, Radio-dish). Для CAPI используется Exclusive pair, реализующий паттерн однорангового (peer-to-peer) взаимодействия.

Набор функций модуля реализован в нескольких методах:

- Метод `create_socket` отвечает за инициализацию сокета, указанного типа с заданным режимом работы;
- Методы `send_message` и `receive_message` реализуют отправку и прием сообщений соответственно;
- Методы `close_socket`, `close_context` необходимы для закрытия сокета и контекста при завершении работы CommunicationManager.

Использование в сценарии моделирования CommunicationManager осуществляется путем указания флага `--with_capi`, при запуске сценария OpenCDA в CAVISE. В случае активации

CАPI, при инициализации объекта класса CavWorld создается объект CommunicationManager, и ему передается адрес Artery.

Scenario – основной класс, управляющий сценариями моделирования. При его инициализации происходит проверка, создан ли CommunicationManager, и создается сокет типа PAIR в режиме connect.

В рамках метода run, управляющего выполнением сценария, отправляется и принимается сообщение. Сообщение, отправляемое Communication Manager со стороны OpenCDA представляет собой структурированный набор данных, сериализованный в формате Protobuf, обмен которыми требует моделирования в Artery. Для наполнения сообщения может использоваться любая информация, доступная в OpenCDA.

4.2 MessageHandler

MessageHandler – модуль, собирающий данные, обмен которыми с учетом реалистичных условий затухания сигнала требует моделирования в Artery (например, скорость и позиции автомобилей, матрицы предсказаний объектов, признаки (features), якорные окна (anchor boxes) для CoP, или спланированные траектории для CDA). MessageHandler обрабатывает protobuf сообщения для отправки в Artery и приема от Artery соответственно. Процесс работы модуля MessageHandler описан ниже:

1. На начальном этапе некоторая функция берет данные из стороннего модуля (информация из которого должна быть обработана и обмен которой должен быть смоделирован в Artery) и сохраняет их в переменную current_message_opencda, которая представляет из себя словарь, ключами которого являются идентификаторы CAV (Connected Automated Vehicle), RSU (Road Side Unit) или PlatoonCAV (CAV, движущиеся в составе колонны аналогичных CAV, оснащены специальными переменными для отслеживания вместимости колонны и хранения информации о находящихся поблизости PlatoonCAV).
2. Сохранение данных в переменную current_message_opencda происходит с помощью контекстного менеджера handle_opencda_message. Контекстный менеджер handle_opencda_message предоставляет доступ к ссылке на переменную current_message_opencda, позволяя считывать или записывать данные в рамках блока with.
3. После того, как все необходимые данные были собраны в current_message_opencda, используется функция make_opencda_message, преобразующая словарь current_message_opencda в сообщение protobuf и сериализующая его в строку. Стоит отметить, что эта функция работает универсально и сама определяет, как надо сложить данные в сообщение, формируемое protobuf.
4. Далее происходит отправка сообщений, сформированных с помощью protobuf, в Artery, а затем их прием, с использованием функций send_message и receive_message. На стороне Artery происходит моделирование отправленных данных.
5. Для обработки сообщения полученного CommunicationManager OpenCDA от Artery используется функция make_artery_data, десериализующая строку в сообщение и преобразующая сообщение в переменную current_message_artery, которая представляет из себя словарь.
6. Следующим этапом является использование полученной от Artery информации в стороннем модуле, который нуждался в реалистичном моделировании распространения сообщения. Для этого используется некоторая функция, которая реализована в стороннем модуле для обработки полученной информации.
7. Последним этапом идет очистка переменных current_message_opencda и

current_message_artery от данных с помощью функции clear_messages, для использования MessageHandler в следующих итерациях.

4.3 CosimService

CosimService – прикладной модуль в среде Artery, реализующий обмен сообщениями между участниками дорожного движения (CAV, RSU и PlatoonCAV), а также отправку и прием сообщений от внешнего сервиса подключенного через CАPI. В текущей конфигурации CosimService интегрирован с платформой OpenCDA и использует его в качестве источника данных при моделировании обмена сообщениями.

Каждый такт в OpenCDA формируется агрегированное сообщение с информацией о сообщениях от всех участников дорожного движения, управляемых на стороне OpenCDA, которое затем сериализуется и отправляется CommunicationManager'у, работающему на стороне OpenCDA.

В связи с особенностями интеграции SUMO и Artery (все узлы создаются на основе импортируемых объектов из SUMO), экземпляр CosimService создается на каждом узле. Но фактическая обработка сообщений работает исключительно на объектах, принадлежащих OpenCDA.

CosimService реализован в виде класса наследника ItsG5Service (является наиболее популярным родительским классом для сервисов в Artery). Логика работы сервиса реализована через переопределение методов родительского класса. Рассмотрим каждый из них подробнее:

- Метод initialize выполняет инициализацию сервиса, с данного метода начинается жизненный цикл сервиса. Метод выполняется единожды при запуске моделирования. После осуществляется подписка сервиса на CAM-сообщения. Ключевым этапом с точки зрения CАPI является настройка сетевого интерфейса взаимодействия с внешним сервисом – OpenCDA, посредством CommunicationManager.
- Метод trigger реализует периодически вызываемую логику передачи сообщений от узла (CAV/RSU/PlatoonCAV) в сеть транспортной связи. В соответствии с архитектурой Artery, данный метод вызывается по определенному расписанию (временному слоту сервиса), составленному с учетом очереди из всех сервисов, функционирующий во время моделирования сценария дорожного движения. Методом извлекается идентификатор текущего узла с использованием VehicleController, проверяется префикс идентификатора узла на содержание cav/rsu/platooncav. Далее выполняется попытка извлечения сообщения, типа OpenCDA_message от OpenCDA из CommunicationManager. Определяется количество Entity, что реализует проверку сообщения на пустоту (0 entities – пустой сообщение), при успешности происходит распространение информации, обладаемой объектом OpenCDA внутри сети в Artery.
- indicate – стандартный метод artery, вызывающийся автоматически middleware Artery при получении сервисом сообщения. Данный метод необходим для реализации логики обработки сообщений, полученных от других узлов. При вызове метода в первую очередь получается объект контроллера узла, через который можно получить доступ к характеристикам cav/rsu/platooncav, и проверяется тип пришедшего пакета (могут быть все, которые реализованы в Artery, и наш OpenCdaPayload). Если тип пакета не соответствует OpenCdaPayload, то он удаляется, дальнейшая обработка прекращается.

После получения OpenCdaPayload происходит извлечение JSON строки из поля OpenCdaPayload::getJSON(). Затем извлеченная строка десериализуется в protobuf-объект

OpenCDA_message. После происходит фильтрация ID текущего узла, если ID не имеет префикс sav/rsu/platoonsav, то обработка прекращается.

Далее создается объект Artery_message, содержащий полученную текущим узлом информацию. Внутри объекта создается вложенный блок (абстрактно набор каких-то данных), привязанный к ID текущего узла. В данный блок копируется информация обо всех Entity полученных в сообщении. После чего созданный объект сериализуется обратно в JSON и передается CommunicationManager, для дальнейшей агрегации и передачи OpenCDA.

5. Апробация разработанной интегрированной среды моделирования

В качестве доказательства работоспособности разработанной среды моделирования CAVISE была реализована модель CoP с использованием визуализации [76]. На рис. 2 показаны прогнозы модели CoP для местоположения окружающих участников дорожного движения, полученные с использованием симулятора вместо предзаписанных датасетов, и с учетом обратной связи, позволяющей ПО управления ПВАТС принимать решения на основе реалистичных обновляемых данных об окружающей обстановке.



Рис. 2. Демонстрация моделирования алгоритма совместного восприятия ПВАТС в разработанной интегрированной среде моделирования.

Fig. 2. Demonstration of the simulated connected automated vehicle cooperative perception model in the developed integrated simulation environment.

6. Заключение

В данном исследовании представлен анализ существующих подходов к моделированию технологий ПВАТС. Исходя из этого предложена улучшенная архитектура среды моделирования CAVISE, основанную на высокоточных симуляторах, которая позволяет

моделировать распространение сигнала и совместное восприятие с помощью интерфейса САPI для обеспечения возможности верификации используемого на них реального ПО в контролируемом моделируемом окружении. Такой результат получен впервые за счет объединения симуляторов, покрывающих отдельные области технологий, в одну систему, и создания между ними интерфейса, обеспечивающего двухсторонний синхронизированный процесс обмена информацией. Данный результат впервые позволил провести моделирование алгоритмов совместного восприятия (CoP) с использованием симулятора вместо предзаписанных датасетов, и с учетом обратной связи, позволяющей ПО управления ПВАТС принимать решения на основе реалистичных обновляемых данных об окружающей обстановке. Архитектура может быть расширена с помощью обновленных версий симуляторов или новых сред моделирования, а также более точных моделей распространения сигнала, учитывающих радиопомехи, такие как погодные эффекты и небольшие затухания.

Разработанное программное обеспечение в глобальной сети и доступно всем желающим [77].

Список литературы / References

- [1]. Global status report on road safety 2018. Geneva, Jun. 2018.
- [2]. Chen S., Kuhn M., Prettnner K., Bloom D.E. The global macroeconomic burden of road injuries: estimates and projections for 166 countries. *Lancet Planet. Heal.*, vol. 3, no. 9, pp. e390-e398, Sep. 2019, DOI: 10.1016/S2542-5196(19)30170-6.
- [3]. Sustainable urban mobility in the EU: No substantial improvement is possible without Member States' commitment, 2020.
- [4]. Bazaz A. et al. Summary for urban policymakers – what the IPCC special report on 1.5C means for cities, Dec. 2018. DOI: 10.24943/SCPM.2018.
- [5]. Doroshev I., Khoroshilov G., Stepanyants V. Evaluation of Cooperative Perception Algorithms in Simulation Environments with Realistic Communication Models. In *RusAutoCon – Proceedings of the International Russian Automation Conference*, 2024, no. 2024, pp. 943-947, DOI: 10.1109/RUSAUTOCON61949.2024.10694627.
- [6]. Kim S. W., Liu W., Ang M.H., Frazzoli E., Rus D. The impact of cooperative perception on decision making and planning of autonomous vehicles. *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 7, no. 3, pp. 39-50, Sep. 2015, DOI: 10.1109/ITS.2015.2409883.
- [7]. Fagnant D. J., Kockelman K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 77, pp. 167-181, Jul. 2015, DOI: 10.1016/J.TRA.2015.04.003.
- [8]. Papadoulis A., Qudus M., Imprialou M. Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 124, pp. 12-22, Mar. 2019, DOI: 10.1016/J.AAP.2018.12.019.
- [9]. Talebpoor A., Mahmassani H.S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 71, pp. 143-163, Oct. 2016, DOI: 10.1016/j.trc.2016.07.007.
- [10]. Qu X., Yu Y., Zhou M., Lin C.T., Wang X. Jointly dampening traffic oscillations and improving energy consumption with electric, connected and automated vehicles: a reinforcement learning based approach. *Appl. Energy*, vol. 257, p. 114030, Jan. 2020, DOI: 10.1016/J.APENERGY.2019.114030.
- [11]. Patella S.M., Scrucca F., Asdrubali F., Carrese S. Carbon footprint of autonomous vehicles at the urban mobility system level: a traffic simulation-based approach. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 74, pp. 189-200, Sep. 2019, DOI: 10.1016/J.TRD.2019.08.007.
- [12]. Taiebat M., Brown A.L., Safford H. S. R., Qu, Xu M. A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 20, pp. 11449-11465, Sep. 2018, DOI: 10.1021/acs.est.8b00127.
- [13]. Ersal et al. Connected and automated road vehicles: state of the art and future challenges. *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 58, no. 5, pp. 672-704, Mar. 2020, DOI: 10.1080/00423114.2020.1741652.
- [14]. Soteropoulos A., Berger M., Ciari F., Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies/ *Transp. Rev.*, vol. 39, no. 1, pp. 29-49, Sep. 2019, DOI: 10.1080/01441647.2018.1523253.

- [15]. Archer J., Kosonen I. The potential of micro-simulation modeling in relation to traffic safety assessment, 2000.
- [16]. Raju N., Farah H., Evolution of traffic microsimulation and its use for modeling connected and automated vehicles. *J. Adv. Transp.*, vol. 2021, no Article ID 2444363, p. 29, Sep 2021, DOI: 10.1155/2021/2444363.
- [17]. Weber J. S., Neves M., Ferreto T. VANET simulators: an updated review. *J. Brazilian Comput. Soc.*, vol. 27, no. 1, pp. 1-31, May 2021, DOI: 10.1186/S13173-021-00113-X/TABLES/4.
- [18]. Alghodhaifi H., Lakshmanan S. Autonomous vehicle evaluation: a comprehensive survey on modeling and simulation approaches. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 151531-151566, Nov. 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3125620.
- [19]. Stepanyants V.G., Romanov A.Y. A survey of integrated simulation environments for connected automated vehicles: requirements, tools, architecture. *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 6-22, 2024, DOI: 10.1109/MITS.2023.3335126.
- [20]. Dosovitskiy A., Ros G., Codevilla F., López A., Koltun V. CARLA: An open urban driving simulator. In 1st Conference on Robot Learning (CoRL 2017), 2017, pp. 1-16.
- [21]. Xu R., Guo Y., Han X., Xia X., Xiang H., Ma J. OpenCDA: An open cooperative driving automation framework integrated with co-simulation. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, Sep. 2021, vol. 2021-Sept, pp. 1155-1162, DOI: 10.1109/ITSC48978.2021.9564825.
- [22]. Behrisch M., Bieker L., Erdmann J., Krajzewicz D. SUMO – Simulation of Urban MObility: An overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, Oct. 2011, pp. 1-6.
- [23]. OMNeT++ Discrete Event Simulator. Available at: <https://omnetpp.org/>, accessed 13.07.2025.
- [24]. Riebl R., Günther H.J., Facchi C., Wolf L. Artery: Extending Veins for VANET applications. In 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2015, Jun. 2015, pp. 450-456, DOI: 10.1109/MTITS.2015.7223293.
- [25]. NVIDIA DRIVE Sim | NVIDIA Developer. Available at: <https://developer.nvidia.com/drive/simulation>, accessed 08.03.2023.
- [26]. 51Sim-One Cloud. Available at: <https://simone.51aes.com/login>, accessed 08.03.2023.
- [27]. Apollo. Available at: <https://developer.apollo.auto/gamesim.html>, accessed 08.03.2023.
- [28]. Waymo – ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics. Available at: <https://robots.ieee.org/robots/waymo/>, accessed 08.03.2023.
- [29]. VTD – Enabling safety validation in autonomous driving and ADAS system simulation. Available at: <https://vires.msccsoftware.com/>, accessed 08.03.2023.
- [30]. Foretellix – Automated driving systems testing tools for simulations. Available at: <https://www.foretellix.com/>, accessed 08.03.2023.
- [31]. Cognata | Autonomous and ADAS Vehicles Simulation. Available at: <https://www.cognata.com/simulation/>, accessed 08.03.2023.
- [32]. PanoSim. Available at: <https://www.panosim.com/>, accessed 08.03.2023.
- [33]. Huawei Octopus Tools – Huawei. Available at: <https://support.huawei.com/enterprise/en/intelligent-automotive-solution/octopus-pid-250809323/tool>, accessed 08.03.2023.
- [34]. Home – dSPACE. Available at: <https://www.dspace.com/en/pub/home.cfm>, accessed 08.03.2023.
- [35]. RTMaps – Intempora. Available at: <https://intempora.com/products/rmaps/>, accessed 08.03.2023.
- [36]. Driving Simulation and SILAB. Available at: <https://wivw.de/en/silab>, accessed 08.03.2023.
- [37]. Mechanical Simulation. Available at: <https://www.carsim.com/>, accessed 08.03.2023.
- [38]. Automotive Simulation. Driving Simulation. Autonomous Driving. rFpro. Available at: <https://rfpro.com/>, accessed 08.03.2023.
- [39]. DYNA4 | Virtual Test Driving | Vector. Available at: <https://www.vector.com/int/en/products/products-a-z/software/dyna4/>, accessed 08.03.2023.
- [40]. Simulation C-V2X. Available at: <https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/kom/mobile-kom/simulation.html>, accessed 08.03.2023.
- [41]. Mechatronics Simulation. | Unity. Available at: <https://unity.com/features/unity-systemgraph>, accessed 08.03.2023.
- [42]. BeamNG.tech. Available at: <https://beamng.tech/>, accessed 08.03.2023.
- [43]. PreScan Applications | TASS International. Available at: <https://tass.plm.automation.siemens.com/node/310>, accessed 08.03.2023.
- [44]. Ansys Inc., Ansys VRXPERIENCE, 2020.

- [45]. ADAS & Autonomous Vehicle Simulation Software | Ansys. Available at: <https://www.ansys.com/products/av-simulation>, accessed 08.03.2023.
- [46]. AVSimulation | AVS: Automotive simulation software and solutions. Available at: <https://www.avsimulation.com/>, accessed 08.03.2023.
- [47]. ADAS and AV simulation and development | Applied Intuition. Available at: <https://www.appliedintuition.com/>, accessed 08.03.2023.
- [48]. Driving Simulator | VI-grade. Available at: <https://www.vi-grade.com/>, accessed 08.03.2023.
- [49]. monoDrive: Autonomous Vehicle Simulation. Available at: <https://www.monodrive.io/>, accessed 08.03.2023.
- [50]. Truevision.ai – Simulation For Self-Driving Cars. Available at: <https://www.truevision.ai/>, accessed 08.03.2023.
- [51]. Robotics-Simulator 4D-Virtualiz. Available at: <https://www.4d-virtualiz.com/en/robotics-simulator/>, accessed 08.03.2023.
- [52]. 腾讯云发布新一代虚拟仿真平台TAD Sim 2.0 – 腾讯云开发者社区-腾讯云. Available at: <https://cloud.tencent.com/developer/news/649103>, accessed 08.03.2023.
- [53]. Virtual Systems & Controls Simulation Software. Available at: <https://www.esi-group.com/products/prosivic>, accessed 08.03.2023.
- [54]. A leading specialist in automotive test systems | AB Dynamics. Available at: <https://www.abdynamics.com/>, accessed 08.03.2023.
- [55]. DYNACAR: advanced research full electric vehicle. Available at: <https://dynacar.es/en/tecnalia-research-innovation.php>, accessed 08.03.2023.
- [56]. Hurl B., Czarnecki K., Waslander S. Precise synthetic image and LiDAR (PreSIL) dataset for autonomous vehicle perception. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Jun. 2019, vol. 2019-June, pp. 2522-2529, DOI: 10.1109/IVS.2019.8813809.
- [57]. Collins J., Chand S., Vanderkop A., Howard D. A review of physics simulators for robotic applications, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 51416-51431, Mar. 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068769.
- [58]. Stepanyants V., Romanov A. Analysis of requirements for next-generation complex urban and transportation system simulation. In *2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Jan. 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/DYNAMICS56256.2022.10014795.
- [59]. Mullakkal-Babu F.A., Wang M., Van Arem B., Shyrokau B., Happee R. A hybrid submicroscopic-microscopic traffic flow simulation framework. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 6, pp. 3430-3443, Jun. 2021, DOI: 10.1109/TITS.2020.2990376.
- [60]. Stepanyants V.G., Romanov A.Y. Influence of Realistic Perception and Surroundings on Qualitative Results in Automated and Connected Vehicle Simulation. *IEEE Access*, vol. 12, pp. 43721-43733, 2024, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380369.
- [61]. Stepanyants V.G., Mkrtchyan G.A., Rakhimullina V.E., Romanov A.Y. Integrating OPAL into CAVISE for Connected Vehicle Simulation with 3D Signal Propagation. *IEEE Access*, vol. 13, pp. 134793-134803, Jul. 2025, DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3593477.
- [62]. Rong G. et al. LGSVL simulator: A high fidelity simulator for autonomous driving. Sep. 2020, DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294422.
- [63]. Shah S., Dey D., Lovett C., Kapoor A. AirSim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles. In *Springer Proceedings in Advanced Robotics*, 2018, vol. 5, pp. 621-635, DOI: 10.1007/978-3-319-67361-5_40/FIGURES/5.
- [64]. Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2004, vol. 3, pp. 2149-2154, DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727.
- [65]. Michel O. Webots: Symbiosis between virtual and real mobile robots. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1998, vol. 1434, pp. 254-263, DOI: 10.1007/3-540-68686-X_24/COVER.
- [66]. Mazhar H. et al. CHRONO: A parallel multi-physics library for rigid-body, flexible-body, and fluid dynamics. *Mech. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 49-64, 2013, DOI: 10.5194/MS-4-49-2013.
- [67]. Khan A.R., Bilal S. M., Othman M. A performance comparison of open source network simulators for wireless networks. In *Proceedings – 2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2012*, Nov. 2012, pp. 34-38, DOI: 10.1109/ICCSCE.2012.6487111.

- [68]. Sommer C. et al. Veins: The open source vehicular network simulation framework. In EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019, pp. 215-252.
- [69]. Mészáros L., Varga A., Kirsche M. INET framework. In EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019, pp. 55-106.
- [70]. Riebl R., Günther H. J., Facchi C., Wolf L. Artery: Extending Veins for VANET applications. In 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Aug. 2015, pp. 450-456, DOI: 10.1109/MTITS.2015.7223293.
- [71]. CARMA simulation. Available at: <https://github.com/usdot-fhwa-stol/carma-simulation>, accessed 06.02.2023.
- [72]. Chen H., Liu B., Zhang X., Qian F., Mao Z. M., Feng Y. A cooperative perception environment for traffic operations and control, pp. 1-19, Aug. 2022, DOI: 10.48550/arxiv.2208.02792.
- [73]. Cui D. et al. Extensible co-simulation framework for supporting cooperative driving automation research, p. 036119812211212, Sep. 2022, DOI: 10.1177/03611981221121263.
- [74]. Boban M. GEMV2: Geometry-based efficient propagation model for V2V communications. 2014.
- [75]. Chair G., Co-Chairs O., Hielscher K.-S., German R., Sommer C., Eckhoff D. Vanetza: Boosting Research on Inter-Vehicle Communication. In Proceedings of the 5th GI/ITG KuVS Fachgespräch Inter-Vehicle Communication (FG-IVC 2017), 2017, pp. 37-40.
- [76]. Where2comm/opencood/visualization at main MediaBrain-SJTU/Where2comm GitHub. Available at: <https://github.com/MediaBrain-SJTU/Where2comm/tree/main/opencood/visualization>, accessed 15.06.2024.
- [77]. CAVISE: Available at: <https://github.com/CAVISE>, accessed 16.03.2026.

Информация об авторах / Information about authors

Виталий Гургенович СТЕПАНЯНЦ – аспирант, преподаватель Департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Сфера научных интересов: высокоавтоматизированные транспортные средства, подключенные транспортные средства, совместное восприятие, совместное управление дорожным движением, интеллектуальные транспортные системы, компьютерное моделирование, сложные системы, умный город, оптимизация, САПР, устойчивое развитие, цифровые двойники.

Vitaly Gurgenovitch STEPANYANTS – postgraduate student and Lecturer at HSE University, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, Russia. Research interests: Intelligent Transportation Systems (ITS), connected vehicles, automated vehicles, modeling and simulation, digital twins, complex systems, Smart City, optimization, and sustainable development.

Григорий Сергеевич ХОРОШИЛОВ – студент 4 курса бакалавриата Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» по направлению Информационная безопасность. Сфера научных интересов: моделирование взаимодействия беспилотного подключенного транспорта, кибербезопасность алгоритмов совместного восприятия.

Grigorii Sergeevich KHOROSHILOV – 4th-year B.Sc. student of the HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, HSE University, majoring in Information Security. Research interests: modeling of interaction between connected autonomous vehicles, cybersecurity of cooperative perception algorithms.

Илья Михайлович ДОЛГОВ – студент 4 курса Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», факультета Московского института электроники и математики (МИЭМ) имени А.Н. Тихонова, направления «Информационная безопасность». Стажер-исследователь учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования.

Сфера научных интересов: интеллектуальные транспортные системы, модели совместного управления дорожным движением, кибербезопасность.

Илья Михайлович ДОЛГОВ – 4th-year B.Sc. student of the HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, HSE University, majoring in Information Security. Research intern at the Educational Laboratory of Computer-Aided Design Systems. Research interests: intelligent transportation systems, models of cooperative traffic management, cybersecurity.

Евгений Антонович НАРХОВ – студент 4 курса бакалавриата Московского института электроники и математики А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» по направлению Информационная безопасность. Сфера научных интересов: интеллектуальные транспортные системы, мобильные системы связи, в частности модели vehicle-2-everything коммуникаций.

Evgeny Antonovich NARKHOV – 4th-year B.Sc. student of the HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, HSE University, majoring in Information Security. Research interests: intelligent transportation systems, mobile communications and vehicle-2-everything (V2X) communications in particular.

Андрей Валерьевич КАРПУХИН – студент 4 курса бакалавриата Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» по направлению Информационная безопасность. Сфера научных интересов: моделирование взаимодействия беспилотного подключенного транспорта, кибербезопасность беспилотного подключенного транспорта.

Andrey Valerievich KARPUKHIN – 4th-year B.Sc. student of the HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, HSE University, majoring in Information Security. Research interests: modeling of interaction between connected autonomous vehicles, cybersecurity of connected autonomous vehicles.