

УДК 004.722

Аналитический обзор подходов к построению моделей V2X-систем

Суравцев Р. В.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: В современных интеллектуальных транспортных системах значительное влияние приобретают технологии V2V (аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle), способствующие обмену информацией между транспортными средствами, и V2I (аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure), обеспечивающие взаимодействие между транспортными средствами и инфраструктурой. Процесс внедрения данных технологий в интеллектуальные транспортные системы направлен на оптимизацию организации передачи данных с целью минимизации чрезвычайных ситуаций на дороге и более эффективного управления транспортным потоком. Тем не менее высокая мобильность транспортного потока и ненадежность автомобильной связи, в т. ч. задержки и потери данных, могут нарушить стабильность функционирования системы совместного управления. **Целью работы** является аналитический обзор технологий V2V и V2I в контексте их важной роли в развитии автономного движения и интеллектуальных транспортных систем. Предлагается рассмотреть совместное использование, построение моделей V2V и V2I с технологией store-carry-and-forward с целью оптимизации задействованных ресурсов и минимизации задержки доставки данных. **Новизна:** в рамках данной статьи предлагается сравнительный анализ технологий V2V и V2I, который позволяет подробно изучить особенности, преимущества и ограничения каждой из них. Кроме того, в статье рассматривается перспектива интеграции технологий V2V и V2I в интеллектуальные транспортные системы с использованием метода store-carry-and-forward. Представленная концепция актуальна и способствует оптимизации передачи данных в интеллектуальных транспортных системах. **Результат:** сформулирован аналитический обзор подходов к построению моделей и принципов работы V2X-систем, подробно рассмотрены их функциональность и взаимодействие в контексте современных информационных и транспортных систем. Был проведен сравнительный анализ двух важных аспектов V2X-технологий: V2V и V2I. Сравнительный анализ технологий V2V и V2I показал, что V2V более проста в реализации, в то время как V2I обладает широкими возможностями для управления движением и повышения безопасности. Приведены возможности совместного применения V2V и V2I, как с использованием технологии store-carry-and-forward, так и без нее. Исследование показало, что такой подход способен оптимизировать обмен данными и повысить надежность связи в дорожной среде, особенно в сравнении с методами без применения данной технологии. **Теоретическая / Практическая значимость:** Теоретическая значимость статьи заключается в расширении знаний об интеграции подхода технологий V2V и V2I с методом store-carry-and-forward, что открывает новые возможности для оптимизации транспортных систем и эффективной передачи данных в интеллектуальных транспортных системах. Представленный подход предлагается реализовать в виде конкретных алгоритмов и программных модулей, которые могут быть интегрированы в существующие транспортные системы и практически применены для оптимизации передачи данных и управления транспортным потоком.

Ключевые слова: V2X, V2V, V2I, store-carry-and-forward, модель, аналитический обзор

Библиографическая ссылка на статью:

Суравцев Р. В. Аналитический обзор подходов к построению моделей V2X-систем // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 3. EDN: DKAQCO

Reference for citation:

Suravtsev R. Analytical Review of Approaches to Building Models of V2X Systems // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 3. EDN: DKAQCO

Актуальность

В настоящее время наблюдается стремительное развитие автономных транспортных систем и интеллектуальных дорожных инфраструктур, что создает предпосылки для будущих транспортных услуг, ориентированных на обеспечение безопасности, комфорта и интеллектуальных возможностей для пассажиров. Тем не менее внедрение новейших технологических решений, связанных с реализацией интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [1], вносит определенную сложность в управление дорожным движением. Прежде всего, важно оптимизировать управление дорожным движением и обеспечить эффективную интеграцию новых технологий в уже существующую инфраструктуру. Для успешного решения этих задач необходимо уделить особое внимание технологии V2X (аббр. от англ. Vehicle-to-Everything) [2–4], которая используется для организации взаимодействия между каждым транспортным средством (ТС) и другими типами узлов. В этом контексте значительно выделяются две ключевые технологии:

1) «транспортное средство — транспортное средство» (V2V, аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle), применяется для организации взаимодействия между автомобилями; подход V2V увеличивает радиус коммуникации за счет использования подвижности автомобилей и многопереходных ретрансляторов между ними;

2) «транспортное средство — инфраструктура» (V2I, аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure), используется для организации взаимодействия между автомобилями и инфраструктурой; подход V2I позволяет подключать ТС к инфраструктуре с доступом в интернет.

Для эффективной реализации V2X-системы, включая V2V и V2I, требуются надежные и действенные методы моделирования, которые будут соответствовать высоким стандартам качества связи. Базовыми узлами [5] коммуникации служат бортовые устройства (OBU, аббр. от англ. On-Board Unit), установленные на каждом ТС, и придорожные устройства (RSU, аббр. от англ. Road-Side Unit), расположенные вдоль трасс. Совместная работа этих устройств обеспечивает относительно непрерывное и качественное взаимодействие, что в частности позволяет своевременно предупреждать водителей о различных дорожных факторах [6–8].

В данной работе был проведен комплексный анализ технологий V2V и V2I, включая детальное рассмотрение и сравнительный анализ их характеристик. Также было исследовано совместное использование V2V и V2I как с технологией store-carry-and-forward (хранение-передача-пересылка), так и без нее. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение модели с технологией store-carry-and-forward обеспечивает высокую эффективность при оценке двух ключевых параметров: времени задержки и объема задействованных ресурсов.

Технология V2V

В этом разделе будет рассмотрено V2V-технологии [9, 10], принципа работы V2V, а также процесса построения моделей. Принцип работы V2V является ключевой основой для понимания взаимодействия между различными ТС. V2V-технология позволяет ТС обмениваться важной информацией, включая данные о направлении движения, скорости, положении на дороге и других релевантных параметрах, с окружающими ТС.

Основные принципы работы V2V представляют собой последовательность шагов.

Шаг 1. Каждое ТС оснащено специальным устройством (OBU), которое собирает информацию о его местоположении, скорости и других параметрах. После сбора данных OBU конвертирует их в уникальное сообщение, пригодное для передачи.

Шаг 2. ТС непрерывно сканирует окружающую обстановку и ищет другие ТС, которые могут быть оборудованы OBU. Как только одно ТС обнаруживает другое, оно осуществляет передачу сообщения, содержащего некоторую информацию, например, о резком замедлении ТС.

Шаг 3. Процесс коммуникации между ТС осуществляется посредством специальных технологий, таких как DSRC (аббр. от англ. Dedicated Short Range Communications, выделенная связь ближнего действия) или Wi-Fi, которые обеспечивают надежное соединение на коротких расстояниях. Этот обмен информацией помогает взаимодействию между ТС и обмену актуальной информацией о текущей обстановке на дороге, способствуя безопасному движению.

Шаг 4. ТС, получив сообщение от другого ТС, производит анализ содержания сообщения. В случае если там содержится предупреждение о потенциальной опасности, ТС принимает соответствующие меры. Кроме того, возможна обратная связь для подтверждения получения сообщения и уведомления отправителя.

Моделирование V2V-технологии [10] представляет собой создание абстрактных математических или компьютерных моделей, описывающих сложные взаимодействия между ТС в процессе передачи данных. Этот подход позволяет детализировано изучать, как происходит обмен информацией между ТС, оценивать эффективность различных протоколов и алгоритмов, а также делать прогнозы относительно поведения системы в разнообразных сценариях дорожных условий.

Этапы моделирования V2V:

- 1) определение ключевых характеристик связи, таких как максимальная дальность передачи, рабочая частота, уровень сигнала, вероятность успешной передачи и др., что позволяет установить базовые параметры для точного моделирования реальных условий;
- 2) выбор подходящей модели распространения, которая должна учитывать множество дестабилизирующих факторов, включая влияние препятствий, ослабление сигнала, интерференцию и т. д.;
- 3) разработка алгоритмов, определяющих, когда и как ТС будут передавать и принимать данные; алгоритмы основываются на текущем состоянии ТС, параметрах связи и стратегии обработки данных;
- 4) имитационное моделирование и эксперименты; позволяют проверить эффективность протоколов и алгоритмов в различных условиях мобильности транспортного потока, уровня трафика и других факторов дорожной среды.

Технология V2I

В сравнении с V2V, где информация передается между ТС, технология V2I предполагает передачу данных от ТС к инфраструктуре [8–10], поэтому принципы ее функционирования несколько отличаются.

Принципы работы V2I состоят в последовательности шагов.

Шаг 1. Каждое ТС передает информацию о состоянии инфраструктуре дороги, используя OBU.

Шаг 2. Инфраструктура дороги, представленная придорожными устройствами (RSU), анализирует полученные данные и может отправить обратно инструкции или предупреждения на ТС.

Шаг 3. Информация от инфраструктуры может использоваться для управления светофорами, скоростными режимами и другими параметрами дорожного движения с целью обеспечения безопасности и оптимизации транспортного потока.

Этапы моделирования V2I [11]:

- 1) определение характеристик связи, радиуса действия, частоты и других параметров V2I;
- 2) выбор способа описания распространения сигнала, который учитывает такие дестабилизирующие факторы, как препятствия, затухание сигнала и т. п.;
- 3) выполнение имитационных моделирований или реальных экспериментов, чтобы провести анализ производительности системы V2I в различных сценариях, таких как высокая мобильность транспортного потока, плотная застройка вдоль дороги или экстремальные погодные условия.

Моделирование V2I играет важную роль в понимании и оптимизации взаимодействия между ТС и инфраструктурой дороги, повышая эффективность и безопасность дорожного движения.

На завершающем этапе рассмотрения моделирования V2I и V2V необходимо перейти к проведению их сравнительного анализа. Это позволит оценить эффективность обоих типов технологий в различных сценариях дорожного движения и определить, какая из них является подходящей для конкретных дорожных ситуаций.

Сравнительный анализ технологий V2V и V2I

На основе приведенного выше обзорного анализа технологий V2V и V2I более надежной и технически реализуемой оказалась V2V-технология. В таблице 1 представлен сравнительный анализ характеристик V2V- и V2I-систем.

Таблица 1. Сравнительный анализ технологий V2V и V2I по ключевым параметрам

Ключевые параметры	V2V	V2I
Характеристики сигнала	Короткие дистанции, высокая скорость передачи	Большие дистанции, устойчивость сигнала
Типы препятствий	Препятствия от других ТС	Препятствия от зданий и инфраструктуры
Интерференция	Возможна из-за близости множества ТС	Влияние окружающей среды на сигнал
Пропускная способность	Ограничена объемом данных между ТС	Большая пропускная способность для данных
Задержка передачи	Низкая задержка из-за близости ТС	Небольшая задержка, связанная с оборудованием инфраструктуры и процессами обработки данных внутри нее
Применение	Мгновенное реагирование на дороге	Управление трафиком и безопасностью
Алгоритмы и протоколы	Для быстрого обмена между ТС	Для обработки и анализа данных на стороне инфраструктуры (например, на серверах или оборудовании) для обработки информации от ТС
Безопасность	Защита от несанкционированного доступа	Обеспечение безопасности и управления

Проведенный анализ выявляет преимущества V2V в обеспечении быстрой и надежной передачи данных между ТС на близких расстояниях. При этом V2I отличается тем, что обеспечивает взаимодействие между ТС и дорожной инфраструктурой; это позволяет эффективно управлять движением и повышать безопасность.

По результатам сравнения V2V демонстрирует превосходство в снижении задержки передачи данных на коротких дистанциях, в то время как V2I преуспевает в обеспечении взаимодействия с инфраструктурой и управлении трафиком. Выбор между этими двумя типами технологий зависит от конкретных условий и требований.

С другой стороны, V2I обладает значительными преимуществами в снижении интерференции по сравнению с V2V. В сетях V2V мобильные ТС часто находятся близко друг к другу, что может привести к возникновению помех и искажений сигнала, особенно в случае, если у ТС имеется металлический кузов. V2I в большей степени использует высоко расположенные инфраструктурные узлы с более высокими антеннами и их благоприятным пространственным размещением. Это значительно снижает вероятность воздействия внешних факторов, которые могли бы мешать передаче данных. Более того, V2I может эффективно применять специализированные антенны и методы управления сигналом с целью минимизации воздействия интерференции и обеспечения стабильной связи. Следующий этап данного обзора – рассмотрение возможностей совместного использования V2V и V2I.

Совместное использование V2V и V2I

В ИТС [1] активно развиваются технологии взаимодействия ТС между собой (V2V) и с инфраструктурой (V2I), играющие ключевую роль в управлении движением транспорта. Эти совместные коммуникации способствуют рациональной организации движения и, таким образом, повышению эффективности движения ТС. Основная идея улучшенного кооперативного управления заключается в разработке алгоритмов консенсуса, которые позволяют ТС взаимодействовать согласованно. Алгоритмы обеспечивают координацию движения между ТС и помогают смягчать колебания, возникающие в результате неравномерности движения в транспортной системе.

Для оценки эффективности разработанных алгоритмов проводится моделирование в различных сценариях движения. Используется PLEXE [12] – платформа, предоставляющая возможность реалистичного моделирования системы управления ТС в разнообразных сценариях. Она объединяет OMNeT++, среду имитационного моделирования, обладающую развитым графическим интерфейсом как для построения моделей, в том числе в V2X, так и для анализа полученных результатов, и SUMO (аббр. от англ. Simulation of Urban Mobility, моделирование городской мобильности), программное обеспечение для моделирования движения ТС, пешеходов и транспортных систем в городской среде, для моделирования общего движения транспорта и его взаимодействия.

Процесс моделирования и интеграции V2V и V2I

Одной из основных сложностей в области V2V- и V2I-коммуникаций является высокая подвижность ТС. Нестабильные передачи данных, включая потери пакетов и задержки, могут серьезно подорвать эффективность системы совместного движения (CDS, *аббр. от англ. Cooperative Driving Systems*) [7]. Для решения этой проблемы предлагается разработка усовершенствованной микроскопической модели движения, учитывающей как V2V, так и V2I, обозначаемой как V2X. Основное внимание уделяется анализу влияния внутритранспортных коммуникаций на совместное движение ТС.

Поэтапное описание процесса моделирования.

Этап 1. Каждое ТС оборудуется V2V- и V2I-устройствами. Они обеспечивают обмен данными как с другими ТС, так и с инфраструктурой. Ключевые элементы этой системы взаимодействия технологий, как отмечалось ранее, — это бортовое оборудование, установленное в ТС (OBU), и вычислительные устройства инфраструктуры дороги (RSU);

Этап 2. Технологии V2V и V2I обеспечивают обмен информацией о скорости, позиции и намерениях ТС. Системы V2V позволяют ТС взаимодействовать напрямую друг с другом. В тоже же время RSU, являющиеся базовым узлом V2I, обмениваются данными с ТС и другими RSU, обеспечивая широкий охват информацией о дорожной ситуации.

Этап 3. Полученная информация используется для адаптации движения каждого ТС к динамике окружающего трафика и дорожной обстановке. ТС могут реагировать на предупреждения о сложных ситуациях и других случаях, обеспечивая безопасность и снижение вероятности аварий.

Этап 4. Процесс моделирования позволяет оптимизировать управление потоками ТС. Учитывая информацию от V2X и алгоритмы управления, система способна регулировать скорости и интервалы между ТС, уменьшая задержки и обеспечивая непрерывное движение.

Этап 5. Моделирование V2X может включать математические модели, описывающие динамику транспортных потоков с учетом информации от устройств V2V и V2I. Например, можно использовать модель следования ТС с учетом данных о скоростях и различных параметрах движения.

Технологии V2V и V2I взаимодействуют для обеспечения безопасности и эффективности движения: V2V позволяет ТС обмениваться данными напрямую, сокращая задержки, а V2I связывает ТС с инфраструктурой дороги, предоставляя ценную информацию о дорожной ситуации и планировании маршрута.

Однако, несмотря на преимущества, совместное использование V2V и V2I также имеет некоторые ограничения. Первым недостатком является зависимость от доступности сети и оборудования. Кроме того, V2X подвержена риску несанкционированного доступа к данным, что может подорвать ее безопасность и надежность. Следующим этапом аналитического обзора будет рассмотрение совместного использования V2V и V2I.

Совместное использование V2V и V2I с применением технологии store-carry-and-forward

При рассмотрении перспектив совместного использования технологий V2V и V2I [7–9] в автомобильных сетях стоит выделить ключевые аспекты, которые могут повлиять на их эффективность. Ограниченная область покрытия сети, проблемы с оборудованием, повышенная мобильность транспортного потока и ограниченность ресурсов — все эти факторы могут сказаться на функциональности и устойчивости V2V и V2I.

Для создания надежной, масштабируемой и эффективной системы передачи данных невозможно ограничиваться исключительно V2V или V2I. Во взаимодействии V2V и V2I приоритетной задачей является достижение эффективности при оценке двух ключевых параметров: времени задержки и объема задействованных мощностей. Для решения этой задачи используется технология store-carry-and-forward [9], представляющая собой инновационный подход к решению проблем, связанных с передачей данных в условиях высокой мобильности ТС. Суть механизма передачи заключается в следующем: ТС, несущее сообщение, передает его следующему ТС в направлении распространения данных. Если это невозможно из-за временной потери связи, сообщение сохраняется и передается до тех пор, пока не будет восстановлена связь с ретранслятором. В частности, необходимо оптимизировать решение, в какой момент времени каким ТС следует передавать сообщение, содержащее несколько пакетов, и опреде-

лить, нужно ли передавать только часть сообщения, до тех пор, пока оно не достигнет зоны покрытия инфраструктуры.

В существующей литературе [13, 14] поднимается вопрос о сложности моделирования и анализа распространения данных в автомобильных сетях. Основные трудности связаны с влиянием случайной мобильности ТС на связь и, следовательно, на производительность. Также возникает сложность в оценке различных факторов, таких как расположение точек RSU, скорость передачи данных V2V / V2I и местоположение источников данных.

В настоящее время опубликовано достаточно работ, посвященных распространению данных в сценарии шоссе с использованием технологии store-carry-and-forward. Например, в работах [15, 16] решения фокусировались на производительности однонаправленной передачи данных или широкополосной передачи. Группой авторов предложена аналитическая модель, основанная на кластеризации ТС и технологии store-carry-and-forward [9], на базе которой разрабатывается понятный аналитический фундамент для количественной оценки емкости загрузки и производительности задержки в гибридной системе V2V / V2I.

На основе проведенного анализа предлагается распределенная онлайн-стратегия и проводится соответствующее моделирование.

Модель системы и постановка задачи

Предлагается сценарий, в котором ТС движутся в обоих направлениях по шоссе. Как упомянуто ранее, между ними возможен обмен информацией через технологии V2V и V2I. Эффективная организация автомобильной сети и реализация распространения данных являются важнейшими аспектами сценария. В контексте данной модели предполагается, что маяки и загруженные пакеты данных используют различные беспроводные ресурсы для коммуникации, такие как временные интервалы в одноканальных системах или различные каналы в многоканальных системах. В процессе доставки данных ТС, имеющие данные для загрузки, должны оповестить другие ТС, включив запрос на загрузки в свои маяки. После этого другие ТС в обоих направлениях реагируют на наличие ресурсов связи.

Предполагается, что скорость передачи данных постоянна при условии, что приемник находится в пределах диапазона передачи. Благодаря более высокой мощности передачи и усилению антенны скорость передачи данных и дальность связи V2I значительно превосходят аналогичные параметры V2V. В целях упрощения модели предполагается, что все ТС движутся с постоянной скоростью на каждом участке дороги и интервалы между ними имеют экспоненциальное распределение.

В контексте автотранспортной сети происходит организация ТС в группы, которые называют кластерами [5]. В этих кластерах ТС находятся на расстоянии, не превышающем дальность связи V2V. Внутри такого кластера возможна передача сообщений с применением многих последовательных V2V-соединений. Важно отметить, что в этот кластер не включаются ТС, движущиеся в противоположном направлении, из-за потенциальной нестабильности в процессе установления связи в случае движения встречных направлений. В пределах кластера предлагается выбирать самое удаленное ТС в диапазоне связи предыдущего передатчика в качестве следующего ретранслятора. Это позволяет уменьшить количество пересылок данных и избежать перегрузки сети. Процесс выбора ретранслятора продолжается до тех пор, пока сообщение не достигнет своего пункта назначения или не пересечет границу группы ТС. Для эффективной передачи больших объемов информации ретрансляторы передают пакеты данных следующему ретранслятору после получения от предыдущего пакета, а не всего сообщения. Этот метод позволяет ретрансляторам передавать и принимать пакеты данных как внутри кластера, так и между кластерами. В этом случае используется ТС, оборудованное устройством OBU для получения данных. Исследование направлено на изучение сложности загрузки данных из нескольких источников на участке дороги, где расположены два RSU — по одному на каждом из концов.

Стратегия определяет, какие источники данных будут выполнять загрузку данных в следующем временном интервале, а также какое RSU выбрано в качестве приемника (пункта назначения) для каждого активного источника. Путем оптимизации стратегии, включая выбор источника данных и ТС для ретрансляции в каждом временном интервале, можно достичь максимальной пропускной способности сети при передаче данных. Однако на текущий момент существует несколько актуальных вопросов, требующих более глубокого исследования:

1) когда для доставки данных используются ТС, движущиеся в обоих направлениях, целью исследования является количественная оценка переданного объема данных и задержки доставки в сложных сценариях;

2) учитывая большой размер файлов, несколько разных ТС могут нести разные фрагменты файла, что создает более сложные условия по сравнению с доставкой целого сообщения;

3) рассматривается случай множественных передатчиков, в котором транспортные средства выполняют не только функцию ретрансляции данных друг для друга, но также сотрудничают как источники данных для совместного уменьшения коллизий в беспроводных связях.

Ключевые этапы для решения представленных выше задач — анализ пропускной способности передачи данных ТС и задержек в доставке данных.

На первом этапе процесс доставки данных ограничен различными факторами, такими как доступность и качество беспроводной сети, движение ТС и количество запросов на передачу данных, которые могут поступать одновременно. Количественное измерение пропускной способности при различных условиях играет критическую роль в оптимизации работы сети.

Второй этап связан с анализом задержек в доставке данных. Выбор направления с наименьшими задержками выгоден как для источника данных, так и для экономии ресурсов сети для других пользователей.

Следовательно, оценка соответствующих задержек при определенных условиях доставки является неотъемлемой частью процесса принятия решений. При доставке данных стратегия определяет не только, какую базовую станцию следует использовать для передачи данных, но также точное время и местоположение начала доставки данных.

Для проверки численных результатов было произведено моделирование с одним и несколькими источниками. В ходе моделирования [9] использованные параметры в текущей модели NS-3 (аббр. от англ. Network Simulator, сетевой симулятор), были модифицированы для внедрения технологии store-carry-and-forward. Например, для долгосрочного хранения данных в ретранслирующих ТС максимальное количество пакетов и максимальная задержка должны быть увеличены в соответствии с настройками параметров симуляции, указанных в таблице 2.

Таблица 2. Параметры симуляции

Параметры	Значение
Плотность транспортных средств, ТС/км	от 2,5 до 20
Расстояние между RSU, км	2
Скорость движения транспортных средств, м/с	20
Скорость передачи V2V, Мбит/с	1
Скорость передачи V2I, Мбит/с	4,5
Размер данных сообщения, Мб	20
Длительность режима передачи данных, мс	50
Период выбора ретранслятора, сек	2

В эксперименте с одним источником этот источник начинает двигаться после выхода из зоны покрытия предыдущей базовой станции RSU и заканчивает движение после преодоления расстояния между RSU. Для сбора статистических данных было проведено 200 итераций эксперимента. Для проверки точности аналитической модели результаты моделирования были сопоставлены с теоретическими данными.

Сравнительный анализ показал, что увеличение плотности транспортных средств приводит к увеличению пропускной способности доставки сообщений. Это объясняется тем, что более высокая плотность способствует более надежной связи, что является критически важным для доставки сообщений с несколькими переходами. Более высокая плотность позволяет объединять или группировать ТС в более крупные кластеры. Задержка данных также уменьшается при более высокой плотности ТС.

Следует отметить, что результаты моделирования могут отличаться от теоретических результатов по ряду причин.

1) При моделировании, даже если мощность принятого сигнала превышает порог обнаружения мощности, всегда существует вероятность ошибки при приеме пакета. В теоретических результатах, в отличие от результатов моделирования, ошибка передачи не учитывается;

2) Выбор ретранслятора в режиме реального времени осуществляется дискретным, а не непрерывным образом. Решение о выборе ретранслятора принимается не непрерывно в каждый момент времени, а в дискретные моменты времени с определенным интервалом. Это означает, что система принимает решение о переключении или выборе ретранслятора через определенные промежутки времени, а не непрерывно в течение каждого момента времени.

Помимо этого, исследуется сценарий, в котором четыре источника данных одновременно запрашивают передачу информации на базовую станцию RSU. Проводится сравнительный анализ между предложенной стратегией и стандартными методами. В стандартных методах источники выбирают ближайшее к ним RSU для передачи данных. Однако предложенная стратегия всегда выбирает источники данных с наибольшей скоростью передачи информации. Это приводит к существенному снижению задержек в доставке данных по сравнению со стандартными методами.

Результаты указывают на то, что предложенная стратегия обеспечивает не только улучшенную производительность, но и более справедливое распределение ресурсов. Это происходит потому, что каждый источник данных приходит к оптимальному местоположению среди других источников в определенный момент времени. Этот результат подтверждает, что предложенная стратегия может значительно увеличить эффективность использования коммуникационных ресурсов и снизить задержки в доставке данных по сравнению со стандартными методами маршрутизации в автомобильных беспроводных самоорганизующихся сетях (VANETs, аббр. от англ. Vehicular Ad-hoc Networks), которые опираются на физическое расстояние между ТС, чтобы принимать решение о передаче данных.

Кроме того, данная стратегия предоставляет график передачи данных, в котором отсутствуют конфликты между ТС (одновременно не более одного источника данных использует одни и те же ретрансляторы или базовую станцию RSU для передачи информации). Это способствует более эффективной коммуникации. Анализ, учитывающий размер данных, местоположение и движение ТС, позволяет определить наилучшее местоположение RSU для передачи данных с учетом всех факторов.

Выводы

Представленный аналитический обзор раскрывает основные модели и принципы работы V2V и V2I, показывая их взаимодействие в сфере современных ИТС. Проведен сравнительный анализ V2V и V2I, выявлены достоинства и недостатки данных технологий. Показано, что V2V обеспечивает быструю передачу данных между ТС при условии, если расстояние между ними меньше или равно дальности связи V2V (может быть особенно полезным в ситуации аварийного торможения). В свою очередь, V2I позволяет интегрировать автомобили с инфраструктурой города, способствуя более эффективному управлению дорожным движением и безопасности.

Рассмотрено совместное использование V2V и V2I, как с применением, так и без применения технологии store-carry-and-forward. Анализ показал, что совместное использование этих технологий способно оптимизировать обмен данными и повысить надежность связи в дорожной среде. В частности при использовании технологии store-carry-and-forward можно достичь улучшения двух важных параметров — времени задержки и объема задействованных ресурсов, в отличие от метода без применения этой технологии, который характеризуется значительным количеством недостатков.

Аналитический обзор подчеркивает важность и актуальность построения моделей V2X-систем. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований в этой области. Новизна заключается в глубоком анализе различных аспектов V2X-систем и выявлении путей их оптимизации для улучшения транспортных систем и безопасности на дорогах. Подход, описанный в данной статье по построению моделей V2X-систем, может быть полезен и усовершенствован в следующих областях, связанных с развитием V2X: транспортная логистика, системы управления транспортом, городская инфраструктура.

Литература

1. Zhu L., Yu F. R., Wang Y., Ning B., Tang T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 8. PP. 383–398. DOI: 10.1109/TITS.2018.2815678
2. Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A. A., Koucheryavy A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // Future Internet. 2019. Vol. 11. Iss. 6. P. 128. DOI: 10.3390/fi11060128
3. Vladyko A., Elagin V., Spirkina A., Muthanna A., Ateya A. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 173. DOI: 10.3390/electronics11020173
4. Brehon-Grataloup L., Kacimi R., Beylot A. L. Mobile Edge Computing for V2X Architectures and Applications: A Survey // Computer Networks. 2022. Vol. 206. P. 108797. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108797
5. Плотников П. В., Владыко А. Г. Минимизация задержек при взаимодействии граничных устройств с использованием кластеризации в сетях VANETs // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 6–13. DOI: 10.31854/1813-324X-2022-8-2-6-13
6. Плотников П. В., Владыко А. Г. Численный анализ математической модели кластерной V2X-системы // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 14–23. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-1-14-23
7. Dongyao J., Dong N. Enhanced Cooperative Car-Following Traffic Model with the Combination of V2V and V2I Communication // Transportation Research. Part B. Methodological. 2016. Vol. 90. PP. 172–191. DOI: 10.1016/j.trb.2016.03.008
8. Feng M., Yao H., Ungurean I. A Roadside Unit Deployment Optimization Algorithm for Vehicles Serving as Obstacles // Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 3282. DOI: 10.3390/math10183282
9. Ni Y., He J., Cai L., Bo Y. Data Uploading in Hybrid V2V/V2I Vehicular Networks: Modeling and Cooperative Strategy // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67. Iss. 5. PP. 4602–4614. DOI: 10.1109/TVT.2018.2796563
10. Vinel A., Lyamin N., Isachenkov P. Modeling of V2V Communications for C-ITS Safety Applications: A CPS Perspective // IEEE Communications Letters. 2018. Vol. 22. Iss. 8. PP. 1600–1603. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2835484
11. Atallah R., Khabbaz M., Assi M. Multihop V2I Communications: A Feasibility Study, Modeling, and Performance Analysis // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 3. PP. 2801–2810. DOI: 10.1109/TVT.2016.2586758
12. Plexe. URL: <http://plexe.car2x.org> (дата обращения 10.09.2023)
13. Arteaga A., Cespedes S., Azurdia-Meza C. Vehicular Communications Over TV White Spaces in the Presence of Secondary Users // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 53496–53508. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912144
14. Lai C., Zhang K., Cheng N., Li H., Shen X. SIRC: A Secure Incentive Scheme for Reliable Cooperative Downloading in Highway VANETs // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 18. Iss. 6. PP. 1559–1574. DOI: 10.1109/TITS.2016.2620620
15. Wang M., Hanguan S., Lu R., Zhang R., Shen X. & Others. Real-Time Path Planning Based on Hybrid-VANET-Enhanced Transportation System // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2015. Vol. 64. Iss. 5. PP. 1664–1678. DOI: 10.1109/TVT.2014.2335201
16. Chen J., Guoqiang M., Li C., Zafar A., Zomaya A. Y. Throughput of Infrastructure-Based Cooperative Vehicular Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 18. Iss. 11. PP. 2964–2979. DOI: 10.1109/TITS.2017.2663434

Статья поступила 5 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 24 октября 2023 г.
Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Информация об авторе

Суравцев Руслан Витальевич — аспирант кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: canelorus7@gmail.com

Analytical Review of V2X System Modeling

R. Suravtsev

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

Purpose. In modern intelligent transport systems (ITS), V2V (Vehicle-to-Vehicle) technologies that facilitate the exchange of information between vehicles and V2I (Vehicle-to-Infrastructure) technologies that ensure interaction between vehicles and infrastructure are gaining significant influence. This process is aimed at optimizing the organization of data transmission in order to minimize emergencies on the road and more efficient traffic flow management. Nevertheless, the high mobility of the traffic flow and the unreliability of automobile communication, including delays and data loss, can disrupt the stability of the joint management system. **The aim of the work** is an analytical review of V2V and V2I technologies in the context of their important role in the development of autonomous movement and ITS. It is proposed to consider the joint use, construction of V2V and V2I models with store-carry-and-forward technology in order to optimize the resources involved and minimize the delay in data delivery. **Novelty** within the framework of this article, a comparative analysis of V2V and V2I technologies is proposed. The analysis allows you to deeply understand the features, advantages and limitations of each of these technologies. Additionally, the article discusses the prospect of integrating V2V and V2I technologies into ITS using the «store-carry-and-forward» method. The presented concept is relevant and contributes to the optimization of data transmission in ITS. **Results.** An analytical review of the models and principles of operation of V2X systems is formulated, their functionality and interaction in the context of modern information and transport systems are considered in detail. A comparative analysis of two important aspects of V2X technologies was carried out: V2V and V2I. The possibilities of sharing V2V and V2I, both using store-carry-and-forward technology, and without it, are given. The study showed that this approach is able to optimize data exchange and improve the reliability of communication in the road environment, especially in comparison with methods without the use of this technology. **Theoretical / Practical relevance.** The theoretical significance of the article is to expand knowledge about the integration of the V2V and V2I technology approach with the store-carry-and-forward method, which opens up new opportunities for optimizing transport systems and efficient data transfer to ITS. The presented approach is proposed to be implemented in the form of specific algorithms and software modules that can be integrated into existing transport systems and practically applied to optimize data transmission and traffic flow management.

Key words: V2X, V2V, V2I, store-carry-and-forward, model, analytical review.

Information about Author

Ruslan Suravtsev — Postgraduate at the Department of Higher Mathematics (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: canelorus7@gmail.com