

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОДОСТУПА ДЛЯ СВЯЗИ V2X: IEEE 802.11BD И 5G NR V2X

Шепелев С.В., Бабин А.И., Коротков М.В.

АО «МТУ Сатурн», Москва,

e-mail: SSHepelev@k-tech.ru, ABabin@k-tech.ru, MKorotkov@k-tech.ru

В связи с растущим интересом к автономным транспортным средствам первостепенное значение приобрела разработка технологий радиодоступа RAT, обеспечивающих беспроводное взаимодействие и надежную связь технологии V2X, связи транспортных средств между собой и с инфраструктурой дорожного движения, с высокой надежностью и низкой задержкой. Основной целью проводимого авторами исследования является анализ проблемных вопросов применения технологий радиодоступа DSRC, C-V2X и предварительные прогнозы производительности разрабатываемых современных эволюционных технологий RAT V2X IEEE 802.11bd и NR V2X. Результаты исследований могут быть использованы при планировании будущей инфраструктуры интеллектуальных транспортных систем России. Разработанные технологии радиосвязи DSRC и C-V2X еще не в полной мере удовлетворяют требованиям V2X и сегодня претерпевают значительные усовершенствования для обеспечения связи с более низкой задержкой и высокими требованиями к пропускной способности. На смену технологии DSRC (IEEE 802.11p) разрабатывается IEEE 802.11bd, на смену C-V2X (LTE) в перспективе приходит NR V2X (5G). В этой статье авторы рассмотрели последние разработки в области стандартизации IEEE 802.11bd и NR V2X, сделали предварительные прогнозы их производительности, провели сравнение с их предшественниками DSRC и C-V2X. Авторы обращают внимание разработчиков оборудования на обратную совместимость эволюционных устройств ближней радиосвязи ИТС и их встречное взаимодействие. Радиосвязь V2X поможет значительно снизить количество дорожно-транспортных происшествий, тем самым уменьшая количество связанных с ними смертельных исходов.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система (ИТС), V2X, DSRC, IEEE 802.11p, IEEE 802.11bd, C-V2X, NR V2X, LTE, 5G-NR/IMT-2020

EVOLUTION OF RADIO ACCESS TECHNOLOGIES FOR V2X COMMUNICATIONS: IEEE 802.11BD & 5G NR V2X

Shepelev S.V., Babin A.I., Korotkov M.V.

Joint-stock company "MTU Saturn", Moscow, e-mail: SSHepelev@k-tech.ru, ABabin@k-tech.ru, MKorotkov@k-tech.ru

Due to the growing interest in autonomous vehicles, the development of RAT radio access technologies has become of paramount importance, providing wireless interaction and reliable communication of V2X technology, communication of vehicles with each other and with traffic infrastructure, with high reliability and low latency. The main purpose of the research conducted by the authors is to analyze the problematic issues of using DSRC, C-V2X radio access technologies and preliminary performance forecasts of the developed modern evolutionary technologies RAT V2X IEEE 802.11bd and NR V2X. The research results can be used in planning the future infrastructure of intelligent transport systems in Russia. The developed DSRC and C-V2X radio communication technologies do not yet fully meet the requirements of V2X and are currently undergoing significant improvements to ensure communication with lower latency and high bandwidth requirements. IEEE 802.11bd is being developed to replace DSRC (IEEE 802.11p) technology, and NR V2X (5G) is coming to replace C-V2X (LTE) in the future. In this article, the authors reviewed the latest developments in the field of IEEE 802.11bd and NR V2X standardization, made preliminary forecasts of their performance, and compared them with their predecessors DSRC and C-V2X. The authors draw the attention of equipment developers to the backward compatibility of ITS evolutionary short-range radio communication devices and their counter interaction. V2X radio communication will help to significantly reduce the number of traffic accidents, thereby reducing the number of deaths associated with them.

Keywords: Intelligent Transport System (ITS), V2X, DSRC, IEEE 802.11p, IEEE 802.11bd, C-V2X, NR V2X, LTE, 5G-NR/IMT-2020

Технологии радиодоступа RAT (Radio Access Technology) решают основные задачи V2X (Vehicle-to-Everything) – взаимодействие бортового оборудования транспорта с придорожной инфраструктурой интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Данная связь V2X потенциально может значительно снизить количество дорожно-транспортных происшествий, тем самым уменьшая количество связанных с ними смертельных исходов. Сегодня две ключевые технологии радиодоступа RAT

обеспечивают связь V2X, это выделенная связь ближнего радиуса действия DSRC (Dedicated Short Range Communications) и сотовая связь-V2X (C-V2X). Данные технологии не в полной мере удовлетворяют требованиям V2X связи многих передовых транспортных средств, включая полностью автономных транспортных средств и современной транспортной инфраструктуры ИТС. Рассмотрим их эволюционное развитие на основе разрабатываемых технологий IEEE 802.11bd и NR V2X [1].

Основная цель исследования – провести анализ проблемных вопросов применения технологий радиодоступа V2X DSRC, C-V2X, дать предварительные прогнозы производительности разрабатываемых современных эволюционных технологий RAT V2X IEEE 802.11bd и NR V2X на начальных стадиях развития и рекомендовать к использованию результаты исследований при планировании будущей инфраструктуры ИТС России.

Материалы и методы исследования

При проведении исследований применялись следующие методы: теоретические (анализ, синтез); методологические (методики и нормы); эмпирические (модели) и логические методы (факты и умозаключения).

Основой системы DSRC является технология радиосвязи Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE), которая базируется на стандарте IEEE 802.11p и семействе стандартов IEEE 1609, стандарте ETSI EN 302 665 в части ИТС. Массовое внедрение DSRC в транспортных средствах было отложено из-за ряда технических проблем, возникающих в условиях высокой мобильности ИТС [2].

Партнерский проект 3GPP разработал технологию радиодоступа C-V2X, это RAT на основе технологии LTE (Long Term Evolution). Транспортные средства с C-V2X могут работать распределенным образом в пределах зоны покрытия. Исследования показывают, что как DSRC, так и C-V2X могут надежно поддерживать приложения безопасности, требующие сквозной задерж-

ки около 100 миллисекунд (мс), при условии, что плотность движения транспортных средств не очень высока. На рис. 1 представлена инфраструктура C-V2X (LTE) / DSRC (IEEE802.11p).

Для создания дополнительных режимов работы и увеличения пропускной способности радиосети V2X, в 2018 г. IEEE была сформирована исследовательская группа 802.11 Next Generation V2X. Это привело к формированию в 2019 г. целевой группы IEEE 802.11bd (TGbd). Параллельно 3GPP работает над разработкой нового NR V2X, построенного поверх сети пятого поколения 5G-NR/IMT-2020, стандартизированной в 3GPP с Rel.15/16 [3].

Ожидается, что стандарт NR V2X будет поддерживать перспективные приложения V2X, которые требуют гораздо более высоких гарантий QoS по сравнению с приложениями, которые могут поддерживаться C-V2X. В некоторых из этих вариантов использования требуется, чтобы сквозная задержка составляла всего 3 мс при надежности 99,999%. В сочетании с существующими проблемами, возникающими в условиях высокой мобильности, эти дополнительные ограничения делают разработку IEEE 802.11bd и NR V2X чрезвычайно сложной.

Обе эти эволюционные радиотехнологии RAT разрабатываются для реализации:

- повышенной надежности предлагаемых услуг V2X;
- низких сквозных задержек в радиосетях;
- повышенной пропускной способности сети RAT.

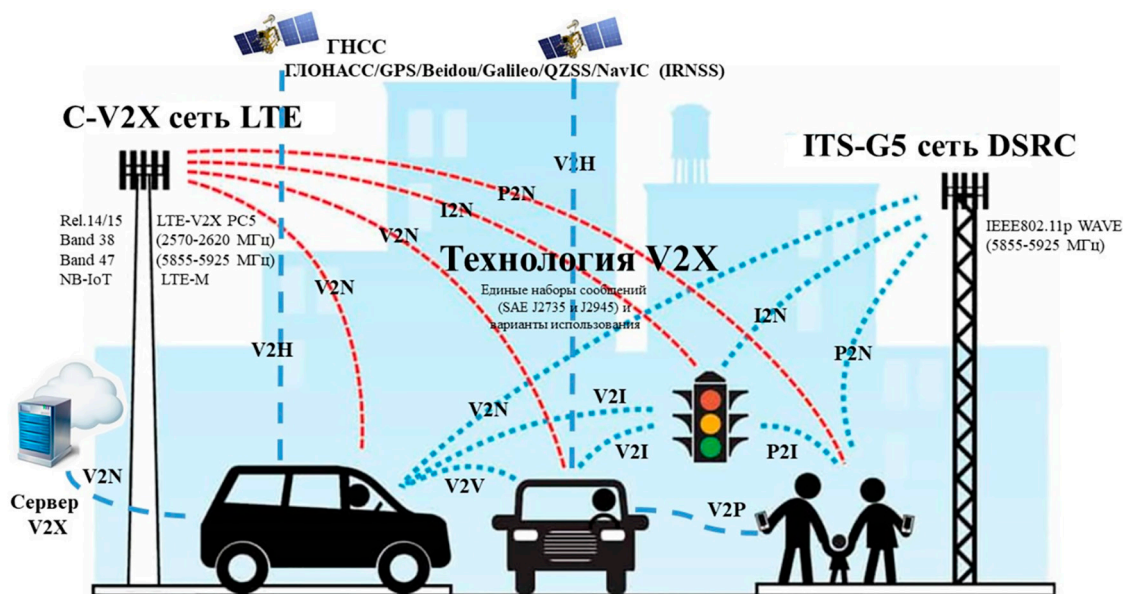


Рис. 1. Инфраструктура C-V2X (LTE) / DSRC (IEEE802.11p)

Однако методологии разработки IEEE 802.11bd и NR V2X существенно различаются.

Так, IEEE (группа TGbd) разрабатывают стандарт IEEE 802.11bd с жестким условием обратной совместимости со стандартом IEEE 802.11p, возможности встречной их работы, по одному из радиоканалов. Партнерский проект 3GPP ETSI таких условий и ограничений не накладывает. Поэтому будущие транспортные средства при работе в сетях C-V2X и NR V2X не будут обеспечены встречной работой. А при одновременной работе сетей LTE и 5G-NR транспортному средству придется иметь оба окончательных устройства, что будет приводить к дополнительным расходам. Требование обратной совместимости для стандарта IEEE 802.11bd будет влиять на его конструкцию и производительность [4].

Результаты исследования и их обсуждение

Выделенная связь на короткие расстояния (DSRC)

Стандарт DSRC IEEE 802.11p начал свое развитие от традиционного стандарта Wi-Fi IEEE 802.11a для приложений с низкой мобильностью. Основные параметры стандарта DSRC приведены в табл. 1.

По сравнению с Wi-Fi расстояние между поднесущими DSRC сокращено в два раза. При разработке стандарта IEEE 802.11p основное внимание уделялось разработке стандарта связи на транспорте, который помог повысить безопасность движения, улучшить управление дорожным движением и повысить эффективность других приложений, таких как парковка и диагностика транспортных средств. Требования, установленные для стандарта IEEE 802.11p, должны были поддерживать: относительные скорости до 250 км/час; время отклика

составляет около 100 мс, а дальность связи до 1000 м [4, с. 4].

Сотовая связь V2X (C-V2X)

3GPP для V2X разработал RAT, в основе которой стал Rel.14. Пользователи C-V2X работают через структуру сотовой связи LTE/LTE-Advanced, которая позволяет обеспечивать прямую связь V2X с использованием канала sidelink через интерфейс PC5. Базовая частотно-временная структура ресурсов C-V2X аналогична структуре LTE, то есть наименьшей единицей распределения во времени является один подкадр (1 мс, состоящий из 14 символов OFDM), а наименьшая частотная детализация составляет 12 поднесущих по 15 кГц каждая (то есть 180 кГц). Поскольку C-V2X может работать как в зоне действия, так и вне зоны действия, C-V2X может работать с использованием традиционного воздушного интерфейса LTE, а также воздушного интерфейса боковой линии связи.

Требования к приложениям для транспортных средств

Одна из очевидных потребностей в развитии обоих RAT (DSRC и C-V2X) заключается в повышении надежности, пропускной способности сети с малой задержкой, что особенно актуально по требованиям самоуправляемых автономных автомобилей. Расширенное вождение, расширенные датчики и дистанционное вождение транспортных средств выдвигают требования к RAT V2X [4, с. 6]:

- максимальная задержка от 100 мс уходит до 3 мс;
- размер полезной нагрузки возрастает от 50 до 12000 байт;
- скорость передачи от 10 до 65 Мбит/с, в перспективе до 160–250 Мбит/с;
- надежность сети от 90 до 99,999%.

Таблица 1

Основные параметры стандарта DSRC IEEE 802.11p

Характеристика	Значение (параметры)
Частотный диапазон	5855-5925 МГц
Поддерживаемые скорости передачи	3-27 Мбит/с
Поддержка стека протоколов V2X	согласно ETSI ITS-G5
Поддержка приложений V2X	RWW, EEBL, IMA, LTA, GLOSA
Мощность передатчика	от 0 до +20 дБм
Чувствительность приемника	-98 дБм
Поддерживаемые ГНСС	ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou
Дополнительный модуль беспроводной передачи данных	Bluetooth 4.0 или Wi-Fi 802.11a/b/g/n
Интерфейсы	CAN, RS-232, RS-485, USB
Встроенный акселерометр	3-осевой (измерения 8G)

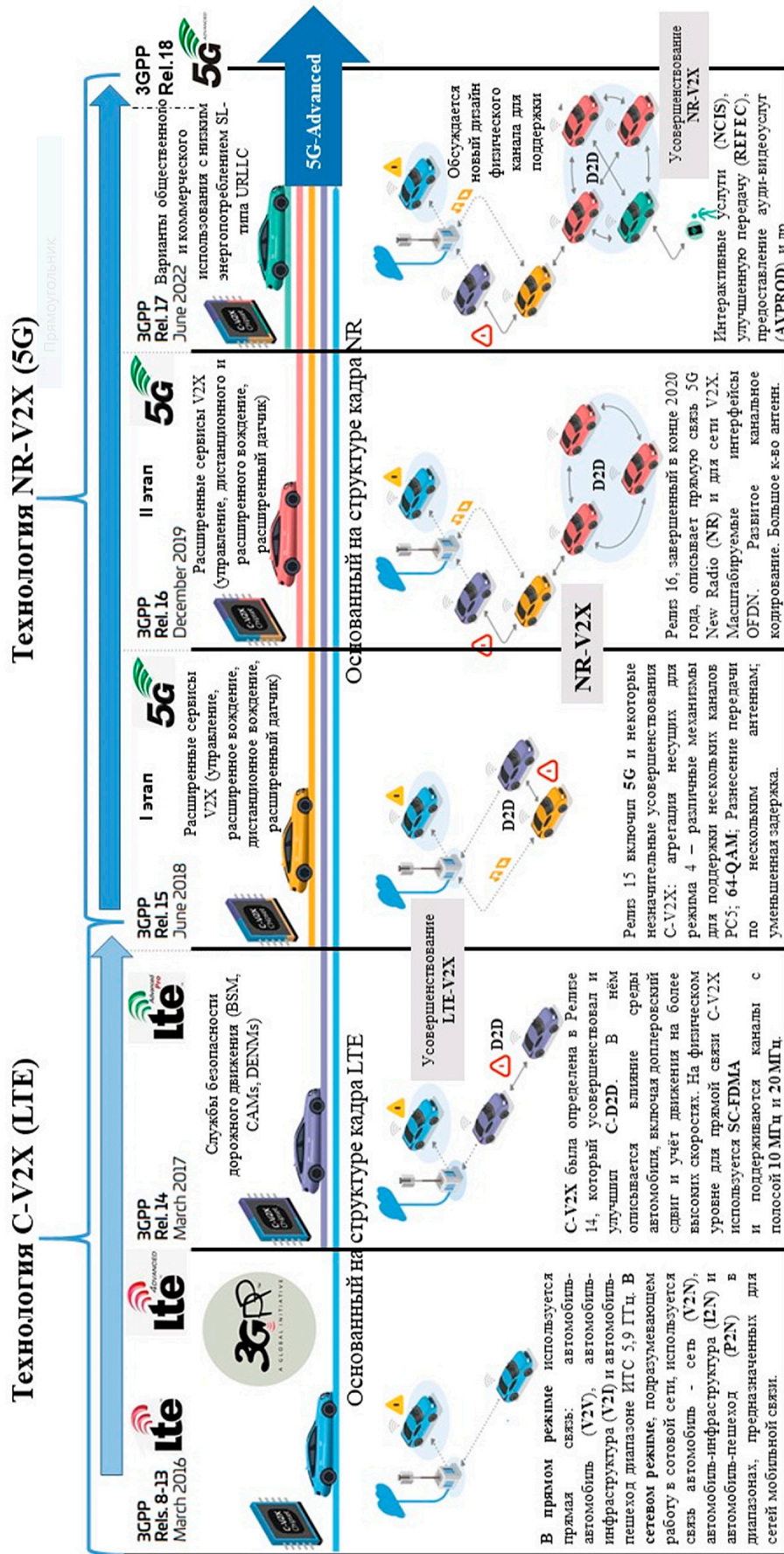


Рис. 2. Стандартизация и сравнение LTE V2X (C-V2X) с NR V2X 5G/IMT-2020

Таблица 2

Ключевые различия стандартов IEEE802.11p и IEEE802.11bd

Особенности	802.11p	802.11bd
Диапазон радиочастот	5.9 ГГц	5.9 ГГц & 60 ГГц
Канальное кодирование	BCC	LDPC
Повторные передачи	нет	зависящий от перегрузки
Расстояние между поднесущими	156.25 кГц	312.5 кГц, 156.25 кГц, 78.125 кГц
Поддерживаемые относительные скорости	250 км/ч	500 км/ч
Пространственные потоки	1	множественный

Для поддержки сложных приложений V2X модернизация существующих технологий DSRC и C-V2X очевидна.

*Выделенная связь
на короткие расстояния IEEE 802.11bd*

Основные цели разработки IEEE802.11bd включают такие, как режим, обеспечивающий вдвое большую пропускную способность MAC, чем IEEE 802.11p, при относительных скоростях до 500 км/час; режим, обеспечивающий вдвое большую дальность связи, чем IEEE 802.11p; форма позиционирования транспортного средства связана с коммуникациями V2X [3, с. 8]. Кроме того, IEEE 802.11bd должен поддерживать режимы: совместимости с устройствами стандарта IEEE 802.11p, должен быть способен обнаруживать передачи IEEE 802.11p и обеспечивать доступ к каналу, и наоборот; режим обратной совместимости, в сценариях совместного использования IEEE 802.11bd и IEEE 802.11p должны предоставляться равные возможности доступа к каналам. Механизм повышения надежности IEEE 802.11bd заключается в одной или нескольких повторных передачах пакета. Адаптивная схема повторной передачи взята с C-V2X для повышения его надежности. Модуляция с двумя несущими (DCM) – это технология, представленная в стандарте IEEE 802.11ax. DCM обеспечивает частотное разнесение и удвоение модуляции, например, с BPSK на QPSK или с QPSK на 16-QAM, для поддержания пропускной способности. DCM улучшает дальность действия, что подтверждено в IEEE 802.11ax.

Кроме того, для обеспечения высокой пропускной способности Tgbд рассматривает механизм доступа к каналу 20 МГц, очень похожий на тот, который используется в IEEE 802.11n/ac. Одной из задач стандарта IEEE 802.11bd является обеспечение позиционирования транспортного средства,

которое взято с IEEE 802.11ax, с точностью определения местоположения транспортного средства до 1 м [5, с. 5].

Диапазон частот миллиметровых волн (60 ГГц) взят в IEEE 802.11bd для повышения пропускной способности, с целью передач потокового видео, 3D-карт высокого разрешения и т.д. Основой для разработки mmWave IEEE 802.11bd станет стандарт IEEE 802.11ad, или его усовершенствование IEEE 802.11ay, которые уже работают в диапазонах mmWave. Однако одним из недостатков этого диапазона частот является то, что его полезность ограничена малыми расстояниями распространения. В табл. 2 приведены ключевые различия между функциями/механизмами стандартов IEEE 802.11p и IEEE 802.11bd [6].

NR V2X: эволюция C-V2X

Разработка NR V2X является не заменой C-V2X, а дополнением тех вариантов использования, которые не могут поддерживаться C-V2X. NR V2X разрабатывается для поддержки приложений V2X, которые предъявляют различные требования к задержке, надежности и пропускной способности. Кроме того, в то время как некоторые варианты использования требуют широковещательной передачи, другие, такие как управление транспортными средствами, эффективно поддерживаются передачей сообщений только определенному подмножеству транспортных средств (UE). На рис. 2 представлены стандартизация и сравнение технологий C-V2X и NR V2X на всех этапах разработки технических спецификаций от релиза 8 (технологии LTE) до релиза 18 (5G-Advanced) [7, с. 3].

Заключение

Разработанные технологии DSRC и C-V2X радиосвязей ИТС применяются региональными регулирующими органами и автопроизводителями по различным ва-

риантам обеспечения связи V2X в транспортных средствах, но обычно совместно обе технологии (транспортного средства и транспортной инфраструктуры) разрабатываются в одном устройстве. Усовершенствование RAT – IEEE 802.11bd для DSRC и NR V2X для C-V2X помогут дополнить беспилотные транспортные средства современными датчиками для обеспечения автономного их вождения. Необходимо учитывать обязательную совместимость технологий IEEE 802.11bd и IEEE 802.11p, требование обратной совместимости для стандарта IEEE 802.11bd повлияет на его конструкцию и производительность. Встречного взаимодействия устройств C-V2X и NR V2X не планируется, что потребует при одновременной их работе наличия в транспорте двух оконечных устройств.

Список литературы

1. Аль-Свейти М.А.М., Волков А.Н., Мутханна А.С.А. Проблемы и требования для реализации технологии V2X // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8, № 3. С. 20–26.
2. Губайдуллин А., Мананкова О., Комекбаев А. Применение технологии V2X для создания «умного дорожного движения» // Наука и инновации. 2023. С. 965–969. DOI: 10.5281/zenodo.7860853.
3. ETSI 3GPP TS 23.286: Vehicle-to-Everything (V2X) services; Functional architecture and information flows. 2023. Version 18.4.0. Release 16. [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/3562> (дата обращения: 10.03.2024).
4. Gaurang N., Biplav C., Jung-Min J. Park IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evolution-of-Radio-for-Naik/22dad76e393.pdf> (дата обращения: 14.03.2024).
5. ETSI 3GPP TS 23.287: Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services. 2023. Version 18.2.0. Release 17. [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/3578> (дата обращения: 21.03.2024).
6. Abdel Hakeem S.A., Hady A.A., Kim H.W. 5G-V2X: Standardization, architecture, use cases, network-slicing, and edge-computing // Wireless Networks. 2020. Т. 26, № 8. С. 6015–6041.
7. Shin C., Farag E., Ryu H., Zhou M. Vehicle-to-Everything (V2X) Evolution From 4G to 5G in 3GPP: Focusing on Resource Allocation Aspects. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/368909643.pdf> (дата обращения: 18.03.2024).