

Алгоритм выбора сигнально-кодовой конструкции для колонн транспортных средств в сетях 5G V2X¹

П. Д. Савлукович*, А. Д. Отмахов*, Д. В. Банков**, А. Н. Красилов*

* Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

** Московский независимый исследовательский институт искусственного интеллекта, Москва

Поступила в редакцию 01.11.2025 г. Принята 15.12.2025 г.

Аннотация—Внедрение автономных транспортных средств (ТС) является ключевым фактором развития интеллектуальных транспортных систем. Одним из востребованных сценариев использования автономного транспорта является формирование колонн ТС с целью повышения безопасности движения и эффективности использования дорожной инфраструктуры. Для координации членов колонны с помощью беспроводной связи консорциум 3GPP разрабатывает технологию 5G Vehicle-to-Everything (V2X). Ключевой задачей в сетях 5G V2X является выбор параметров передачи, в том числе сигнально-кодовой конструкции (СКК), при которых будут удовлетворены требования к задержке и надежности. В данной работе предложен адаптивный алгоритм выбора СКК, основанный на оценке вероятности потери пакета при использовании различных СКК. С помощью имитационного моделирования в среде ns-3 показано, что выбор СКК с помощью адаптивного алгоритма обеспечивает емкость сети, близкую к верхней границе, которая может быть достигнута выбором наилучшей СКК полным перебором. Кроме того, использование адаптивного алгоритма увеличивает емкость сети до 180% по сравнению с алгоритмами, представленными в литературе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 5G, V2X, Mode 2, сигнально-кодовая конструкция, колонна транспортных средств, апериодический трафик.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_692

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы автономного транспорта являются ключевым элементом развития современных интеллектуальных транспортных систем, направленных на повышение безопасности и эффективности транспорта. Функционирование существующих систем автономного транспорта обычно основано на получении информации с сенсоров транспортных средств (ТС) и использовании алгоритмов, исполняемых локально на ТС. Кроме того, существуют решения, в которых дополнительно используется передача информации между ТС по беспроводному каналу. Ключевым аспектом для реализации таких решений является организация сетей связи, удовлетворяющих строгим требованиям к качеству обслуживания. С целью обеспечения передачи данных с заданным качеством обслуживания консорциум 3GPP разрабатывает технологию 5G Vehicle-to-Everything (V2X). Требования к качеству обслуживания выражаются в терминах максимальной допустимой задержки доставки D^{QoS} и максимальной доли потерянных пакетов PLR^{QoS} [1]. Конкретные значения представлены в спецификациях и зависят от сценария. Например, в типичных сценариях с автономным транспортом требования к задержке и надежности составляют $D^{QoS} = 10$ мс и $PLR^{QoS} = 10^{-2}$ соответственно [2].

¹ Исследование осуществлено в рамках Госзадания № FFNU-2025-0030 ИППИ РАН.

В сетях 5G V2X ТС генерируют гетерогенный трафик, включающий два типа сообщений. Во-первых, ТС периодически рассылают сообщения CAM (Cooperative Awareness Messages), информируя окружающие ТС о своем состоянии (координаты, скорость, направление движения и т.д.). Во-вторых, при возникновении опасных ситуаций на дороге, ТС генерирует сообщения DENM (Decentralized Environmental Notification Messages). В отличие от периодических CAM-пакетов, DENM-пакеты отправляются в случайные моменты времени.

Спецификациями 5G V2X определено два метода доступа к каналу для передачи данных: Mode 1 и Mode 2. При использовании Mode 1 канальные ресурсы для передачи назначаются базовой станцией. В свою очередь, Mode 2 позволяет осуществлять передачу данных между ТС без обращения к базовой станции. Выбор канальных ресурсов при этом осуществляется автономно самими ТС. В данной работе предполагается, что Mode 1 используется для обслуживания периодического CAM-трафика, а Mode 2 — для апериодического DENM-трафика [3]. Использование Mode 2 для DENM-пакетов позволяет значительно сократить задержку по сравнению с Mode 1 за счет отсутствия обмена сообщениями с базовой станцией. Так как ресурсы для CAM-пакетов резервируются базовой станцией, далее будут рассмотрены только апериодические DENM-пакеты, для которых выделены непересекающиеся частотные ресурсы с ресурсами для CAM-пакетов.

В данной работе рассматривается сценарий управления движением в колоннах ТС, описанный в спецификациях 3GPP [4]. Рассматривается ситуация, в которой группа ТС формирует колонну и передает многоадресные DENM-пакеты, адресованные только членам колонны.

Для обеспечения надежной связи в сетях 5G V2X предусмотрены различные сигнально-кодовые конструкции (СКК). Каждая СКК представляет собой комбинацию схемы модуляции и значения кодовой скорости [5, 6]. При выборе СКК существует компромисс между помехоустойчивостью передачи и объемом потребляемых канальных ресурсов. Одной из важнейших задач в сетях 5G V2X является задача выбора такой СКК, при которой минимизируется потребление канальных ресурсов при выполнении строгих требований к качеству обслуживания.

В данной работе предлагается адаптивный алгоритм выбора СКК для членов колонны, нацеленный на удовлетворение заданных требований к надежности и задержке доставки при потреблении минимального объема канальных ресурсов. Алгоритм основан на оценке вероятности потери пакета для набора рассматриваемых СКК каждым ТС. Для этого ТС прослушивают канал и собирают статистику значений мощности принимаемого сигнала. С помощью имитационного моделирования в среде ns-3 анализируется эффективность разработанного алгоритма в различных сценариях. В качестве показателя эффективности рассматривается емкость сети, определяемая как максимальная интенсивность трафика внутри колонны, при которой выполнены требования к надежности и задержке как для трафика внутри колонны, так и для внешнего для колонны трафика, генерируемого ТС, не являющимися членами колонны. Показано, что использование адаптивного алгоритма повышает емкость сети до 180% по сравнению с алгоритмами, представленными в литературе.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описывается метод распределенного доступа Mode 2 и СКК, используемые в сетях 5G V2X. Раздел 3 содержит обзор релевантных работ. В разделе 4 приводится исследуемый сценарий и постановка задачи. В разделе 5 описывается предлагаемый алгоритм выбора СКК в колоннах ТС. В разделе 6 представлены численные результаты. Раздел 7 содержит выводы и планы дальнейших исследований.

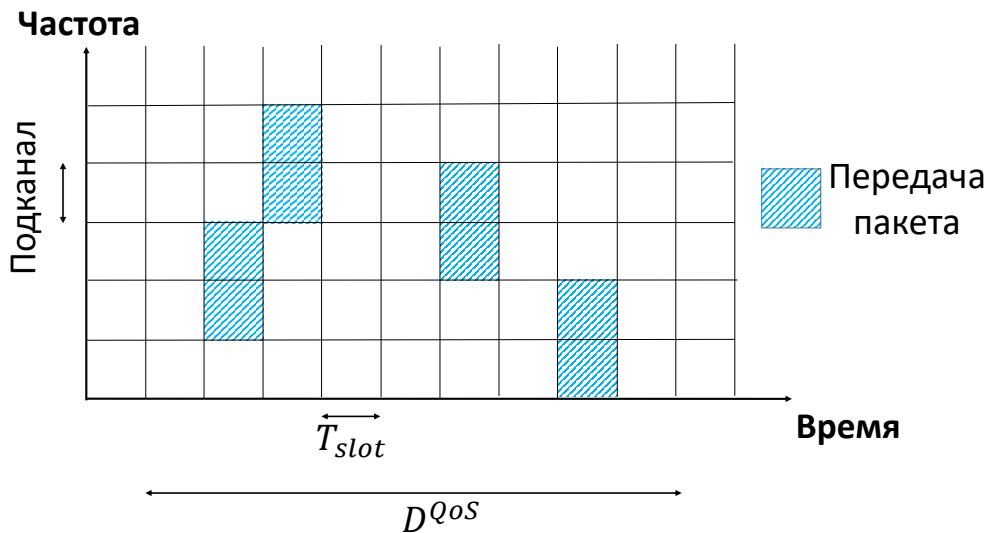


Рис. 1. Передача пакета при использовании метода Mode 2.

2. МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОСТУПА И СИГНАЛЬНО-КОДОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В СЕТЯХ 5G V2X

В качестве метода доступа к каналу для передачи DENM-пакетов в данной статье рассматривается Mode 2, позволяющий ТС автономно выбирать ресурсы для своих передач. Канальные ресурсы разделяются на подканалы равной ширины по частоте и на слоты равной длительности по времени. Каждый слот в 5G V2X Mode 2 имеет фиксированную длительность, которая определяется нумерологией μ и равняется $T_{slot} = 2^{-\mu}$ мс, где $\mu \in \{0, 1, 2, 3\}$ [7].

Для повышения надежности каждый пакет может передаваться несколько раз. При этом для соблюдения требования к задержке все попытки размещаются в пределах временного интервала длительностью D^{QoS} . Для каждой попытки передачи ТС выбирает слот и непрерывный набор подканалов. Количество подканалов, необходимое для передачи пакета, зависит от ширины одного подканала, размера пакета G и используемой СКК χ . Иллюстрация разделения канальных ресурсов и передачи пакета при использовании метода Mode 2 приведена на рис. 1.

Спецификации 3GPP определяют набор СКК, доступных для передачи в сетях 5G V2X [8]. Конкретная СКК задается как индекс, которому ставится в соответствие схема модуляции и значение кодовой скорости. Использование различных СКК позволяет находить баланс между помехоустойчивостью передачи и эффективностью использования канальных ресурсов. С одной стороны, использование более высоких СКК позволяет уменьшить число занимаемых подканалов, что снижает вероятность коллизии между различными пакетами. С другой стороны, высокие СКК менее устойчивы к помехам и, как следствие, для декодирования пакета требуется более высокое значение отношения сигнала к интерференции с шумом (англ.: Signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR). Способ выбора СКК в различных сценариях 5G V2X Mode 2, в том числе в сценариях с колонной ТС, является открытой задачей.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Задаче выбора СКК в сетях 5G V2X посвящено множество работ. Авторы исследуют влияние выбора СКК в сетях 5G V2X с целью повышения эффективности их работы, например, повышения емкости сети [9]. Проводится исследование как статического выбора СКК, то есть

выбора фиксированной СКК без динамического изменения с течением времени, так и алгоритмов адаптивного выбора.

В работах [9, 10] исследуется статический выбор СКК. Авторы работы [9] рассматривают статический выбор СКК в сценариях с колонной ТС и предлагают пороговый алгоритм выбора, основанный на сравнении максимального возможного расстояния успешной передачи с длиной колонны. Однако, данный алгоритм не адаптируется под изменение канальных условий и в некоторых сценариях обеспечивает емкость сети, которая существенно меньше чем наилучшая при статическом выборе. В работе [10] проводится анализ производительности сетей 5G V2X при совместной передаче широковещательных и одноадресных пакетов. Авторы показывают, что выбор СКК может оказывать существенное влияние на производительность сети. Однако авторы ограничиваются лишь исследованием влияния выбора СКК и не предлагаются алгоритм адаптивного выбора.

В работах [11–14] предлагаются адаптивные алгоритмы выбора СКК. Авторы работы [11] разработали адаптивный алгоритм выбора СКК и числа попыток передачи для передачи данных к базовой станции в восходящем канале, основанный на оценке состояния канала. Результаты исследования показывают, что адаптивный выбор параметров передачи позволяет снизить потребление канальных ресурсов, при этом выполняя строгие требования к качеству обслуживания. Однако авторы рассматривают сценарий с передачей данных в восходящем канале, поэтому алгоритм не может быть применен для сценариев 5G V2X Mode 2. Авторы работы [12] предлагают подход с использованием методов машинного обучения для выбора СКК в сценарии с двумя ТС. Данный подход позволяет максимизировать пропускную способность за счет прогнозирования во времени вероятности доставки пакетов. Однако предлагаемое решение требует предварительного обучения модели, что снижает скорость адаптации к меняющимся канальным условиям. Кроме того, алгоритмы машинного обучения предъявляют повышенные требования к вычислительным ресурсам оборудования на ТС, что может быть критично с точки зрения энергоэффективности [15] и стоимости. В работе [13] рассматривается сценарий с колоннами ТС с целью максимизации вероятности доставки пакетов, в том числе с помощью выбора СКК. Предлагается метод машинного обучения, позволяющий снизить вероятность коллизии в восходящем канале для лидеров нескольких колонн. Однако рассматривается только метод доступа к каналу Mode 1, что не подходит для сценариев, требующих низкой задержки. В работе [14] предложен адаптивный алгоритм выбора СКК, основанный на оценке занятости канала. Однако алгоритм позволяет переключаться лишь между двумя фиксированными значениями СКК, что не позволяет подстраиваться под меняющиеся канальные условия. Кроме того, в работе не рассматриваются сценарии с колонной ТС.

Проведенный выше анализ показывает, что в рассматриваемых работах не предложены адаптивные алгоритмы выбора СКК в сценариях с колонной ТС в сетях 5G V2X Mode 2, что является мотивацией для разработки такого алгоритма в данной работе.

4. ИССЛЕДУЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматривается сеть из N ТС, движущихся по двум полосам шоссе (см. рис. 2). На одной полосе находятся N_g ТС, образующих колонну длиной L с равным расстоянием между соседними ТС. Члены колонны генерируют пуассоновский поток многоадресных пакетов интенсивностью λ_g . Адресатами многоадресных пакетов являются только члены колонны. На другой полосе находятся остальные $N_b = N - N_g$ ТС, не являющиеся членами колонны. Расстояние между соседними ТС имеет экспоненциальное распределение с параметром ϕ [16]. Данные ТС генерируют пуассоновский поток широковещательных пакетов интенсивностью λ_b . Адресатами широковещательных пакетов являются ТС, находящиеся на расстоянии

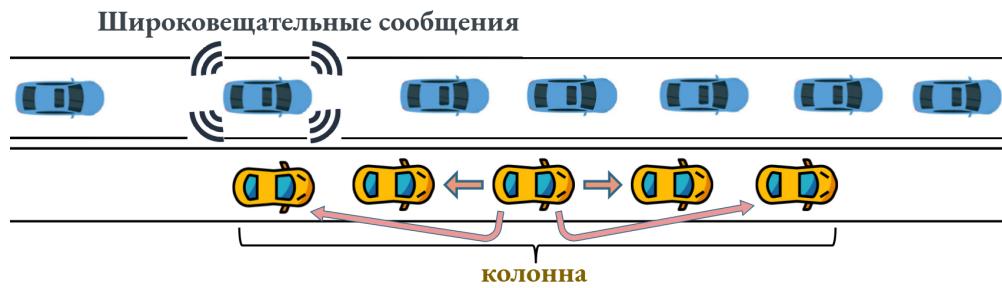


Рис. 2. Сценарий с двумя типами ТС.

не превосходящем радиус покрытия R от отправителя. Все ТС двигаются примерно с одинаковой скоростью, поэтому расстояние между ними не изменяется существенно с течением времени. Заметим, что в общем случае N_b ТС могут быть расположены на нескольких полосах, однако в данной работе рассматривается только одна полоса, поскольку расстояние между полосами мало по сравнению с длиной колонны L .

Все N ТС используют метод Mode 2 для передачи DENM-пакетов размера G . Для повышения надежности передача каждого пакета осуществляется K раз. Мощность передаваемого сигнала равна S для всех ТС. Модель распространения сигнала определяется формулой $\beta(d) = \beta_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0})$, где $\beta(d)$ — затухание в дБ для двух ТС, расположенных на расстоянии d , n — показатель затухания, d_0 — референсное расстояние, β_0 — затухание на референсном расстоянии. Вероятность успешного приема пакета зависит от SINR в соответствии с используемой моделью ошибок EESM (Exponential Effective SINR Mapping) [17]. Кроме того, все ТС работают в режиме полудуплекса. Это означает, что ТС не могут принимать пакеты от других ТС в слотах, в которых они осуществляют собственную передачу. В качестве базовых способов выбора СКК χ_g для членов колонны рассматриваются следующие алгоритмы:

1. фиксированная $\chi_g = 6$ [18];
2. χ_g , выбранная с помощью порогового алгоритма из работы [9].

Остальные ТС, генерирующие широковещательные пакеты, используют фиксированную СКК $\chi_b = 6$ [18].

В данной работе ставится задача динамического выбора СКК для членов колонны, с помощью которого достигается емкость, обеспечиваемая выбором наилучшей фиксированной СКК полным перебором. Для решения этой задачи разрабатывается адаптивный алгоритм выбора СКК, описанный далее.

5. АЛГОРИТМ ВЫБОРА СКК

5.1. Основные принципы работы алгоритма

Для определения СКК χ , на которой будут осуществляться передачи многоадресных пакетов членами колонны, предлагается алгоритм, основанный на оценке вероятности потери пакета для ТС в колонне. Для этого каждое ТС независимо выбирает СКК на основе локально собранной информации о значении плотности мощности принимаемого сигнала в различных подканалах за временное окно длительности D^{QoS} . Далее каждое ТС отправляет членам колонны специальное служебное сообщение, содержащее выбранное значение СКК. Каждое ТС на основе полученных от остальных ТС рекомендаций выбирает минимальное значение СКК среди всех $\chi_j, j = 1 \dots N_g$:

$$\chi = \min_j(\chi_j).$$

Обозначим множество всех существующих СКК как \mathcal{X} , а множество рассматриваемых для выбора СКК как $\mathcal{X}_{\min} \subseteq \mathcal{X}$. Разобьем множество \mathcal{X} на подмножества \mathcal{X}_i , каждое из которых включает набор СКК, требующих для передачи пакета размера G одинаковое число подканалов $M(G, \chi)$. В множество \mathcal{X}_{\min} будем включать только СКК с наименьшим индексом из каждого подмножества \mathcal{X}_i как наиболее рабочую:

$$\mathcal{X}_{\min} = \bigcup_i \underset{\chi \in \mathcal{X}_i}{\operatorname{argmin}}(\chi).$$

Это позволяет повысить надежность передачи без увеличения количества потребляемых канальных ресурсов. Пусть множество \mathcal{X}_{\min} отсортировано по возрастанию СКК, а χ^- и χ^+ — соответственно предыдущее и следующее СКК в данном множестве относительно СКК с индексом χ .

Алгоритм выбора СКК состоит из трех этапов. На первом этапе ТС собирает статистику измерений канала за время D^{QoS} . На втором этапе ТС использует собранную статистику для оценки вероятности потери пакета для различных СКК. На третьем этапе ТС выбирает СКК на основе вероятностей потери пакета.

5.2. Процедура оценки канала

Рассмотрим процедуру сбора статистики измерений канала, осуществляющую членами колонны. Во-первых, каждое ТС в колонне прослушивает канал и сохраняет значения плотности мощности сигнала, принимаемого в каждом подканале. В момент времени t статистика состоит из значений, накопленных за временное окно $[t - D^{QoS}, t)$. Выбор длительности временного окна D^{QoS} обусловлен тем, что все попытки передачи одного пакета должны располагаться в окне длительности D^{QoS} . Во-вторых, ТС хранит плотность мощности полезного сигнала, наблюданную при приеме пакета от самого удаленного ТС в колонне. В-третьих, ТС собирает статистику размеров переданных пакетов. Это необходимо для учета эффекта агрегации пакетов, описанного в работе [9].

5.3. Процедура оценки вероятности потери пакета

Рассмотрим процедуру оценки вероятности потери пакета P , которая проводится с помощью метода моделирования виртуальных передач. Данный метод заключается в том, что каждое ТС использует собранную статистику измерений канала для построения интерференционной картины. Далее на интерференционную картину накладываются передачи пакета и оценивается вероятность потери данного пакета.

Рассмотрим данный метод более подробно. Пусть ТС совершает виртуальную передачу пакета во временном окне $[t - D^{QoS}, t)$. При этом ТС выбирает размер пакета случайным образом в соответствии с распределением размеров пакета в собранной статистике, после чего в соответствии с выбранным размером пакета и рассматриваемой СКК определяет требуемое количество подканалов. Для K попыток передачи случайным образом выбирается K слотов во временном окне, а также непрерывный набор подканалов в каждом выбранном слоте. Для каждой виртуальной передачи и рассматриваемой СКК плотность мощности полезного сигнала оценивается как сохраненное значение плотности мощности, получаемой от самого удаленного ТС в колонне. Такой выбор по худшему случаю связан с необходимостью доставки пакетов всем членам колонны. Также предполагается, что мощность принимаемого сигнала друг от друга для пары ТС одинакова. В соответствии с выбранным значением плотности мощности полезного сигнала и значениями суммарных плотностей мощности в выбранных слотах и подканалах для каждой попытки передачи оценивается значение SINR. После этого с помощью

модели ошибок EESM оценивается вероятность ошибки декодирования пакета $p_k(\chi, t)$ для каждой попытки передачи k и СКК χ . Кроме того, учитывается то, что ТС работают в режиме полудуплекса: если для виртуальной передачи был выбран слот, в котором осуществлялась собственная передача, то значение $p_k(\chi, t)$ для данной попытки передачи приравнивается к единице. Вероятность потери пакета после совершения K попыток передачи $P(\chi, t)$ рассчитывается с использованием предположения о независимости попыток передачи:

$$P(\chi, t) = \prod_{k=1}^K p_k(\chi, t).$$

На основе полученного значения $P(\chi, t)$ вычисляется среднее значение вероятности потери пакета $\hat{P}(\chi, t)$ с использованием экспоненциально взвешенного скользящего среднего:

$$\hat{P}(\chi, t) = \gamma \cdot P(\chi, t) + (1 - \gamma) \cdot \hat{P}(\chi, t - D^{QoS}),$$

где γ — коэффициент сглаживания.

Обновление значений $\hat{P}(\chi, t)$ производится с периодом равным D^{QoS} и только для текущей СКК χ , а также для двух соседних СКК χ^- и χ^+ . Такое сужение множества СКК для оценки $\hat{P}(\chi, t)$ вызвано следующими факторами.

- Во-первых, пакеты при разных СКК занимают различное число подканалов, что изменяет распределение плотности мощности сигнала в наблюдаемом временном окне и ухудшает точность оценки $\hat{P}(\chi, t)$. При этом соседние СКК довольно близки по своим параметрам, что позволяет проводить оценку с небольшой погрешностью, при этом ускоряя сходимость алгоритма за счет приближенной оценки $\hat{P}(\chi, t)$ для соседних СКК.
- Во-вторых, ограничение числа оцениваемых СКК значительно снижает вычислительную сложность алгоритма, что крайне важно в условиях, когда решение о выборе СКК должно приниматься в режиме реального времени.

5.4. Процедура выбора СКК

Рассмотрим процедуру выбора СКК χ_j на ТС с номером j . Сначала выбирается значение СКК χ_{opt} как максимальное среди обеспечивающих выполнение требования к надежности PLR^{QoS} :

$$\chi_{opt} = \max\{\chi \in \mathcal{X}_{\min} \mid \hat{P}(\chi, t) < PLR^{QoS}\}.$$

В случае, когда ни одна из СКК не удовлетворяет требованию к надежности PLR^{QoS} , выбирается значение СКК с минимальным значением $\hat{P}(\chi_j, t)$:

$$\chi_{opt} = \underset{\chi \in \mathcal{X}_{\min}}{\operatorname{argmin}}(\hat{P}(\chi, t)).$$

Далее решение о выборе χ_j принимается с использованием плавной адаптации СКК, предотвращающей резкие изменения распределения суммарной плотности мощности при скачкообразном переключении между СКК. А именно, на каждом шаге алгоритма с периодом T_{upd} производится изменение СКК χ_j в направлении СКК χ_{opt} :

$$\chi_j(t) = \begin{cases} \chi_j^+(t - T_{upd}), & \chi_{opt} > \chi_j(t - T_{upd}), \\ \chi_j(t - T_{upd}), & \chi_{opt} = \chi_j(t - T_{upd}), \\ \chi_j^-(t - T_{upd}), & \chi_{opt} < \chi_j(t - T_{upd}). \end{cases}$$

Заметим, что у алгоритма есть следующие параметры:

Таблица 1. Параметры моделирования.

Параметр	Значение
Число ТС N	200
Коэффициент шума в цепи приемника	5 дБ
Мощность сигнала S	23 дБм
СКК для ТС вне колонны χ_b	6
Нумерология μ	1
Число подканалов B	10
Среднее расстояние между ТС вне колонны ϕ^{-1}	10 м
Радиус покрытия R	200 м
Длина колонны L	100 м
Требование к задержке D^{QoS}	10 мс
Требование к доле потерянных пакетов PLR^{QoS}	10^{-2}
Референсное расстояние d_0	1 м
Затухание на референсном расстоянии β_0	46,7 дБ
Показатель затухания n	3

- коэффициент сглаживания γ ;
- период обновления СКК T_{upd} ;
- начальное значение оценки $P_0 = \hat{P}(\chi, T_0)$, где T_0 — время начала работы алгоритма.

В разделе 6.1 показывается, как выбирать эти параметры.

6. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа эффективности предложенного адаптивного алгоритма выбора СКК использовалась среда имитационного моделирования ns-3 [19]. В модели, ранее разработанной в работе [20], был дополнительно реализован алгоритм, описанный в разделе 5. Параметры моделирования выбраны аналогично работе [18] и приведены в таблице 1.

6.1. Выбор параметров алгоритма

Настройку параметров адаптивного алгоритма γ , T_{upd} и P_0 проведем в сценарии с размером пакета $G = 1150$ байт, длиной колонны $L = 100$ м и без широковещательного трафика ($\lambda_b = 0$) при $N_g = 10$. Если не сказано иное, то параметры алгоритма выставляются в значения: $\gamma = 0,0001$ и $T_{upd} = 10$ с. В качестве показателей эффективности рассмотрим следующие метрики.

- Емкость сети C , определяемая как максимальная интенсивность λ_g , при которой выполнены требования к надежности и задержке как для многоадресных, так и для широковещательных пакетов;
- Время сходимости алгоритма T_{conv} , определяемое как первый момент времени, начиная с которого не происходит изменений СКК в течение интервала 100 с;
- Среднее время между переключениями СКК T_{switch} . Значение T_{switch} измеряется после момента времени T_{conv} .

Зависимости данных величин от параметров алгоритма γ , T_{upd} и P_0 приведены на рис. 3–5.

Рассмотрим сначала влияние значения P_0 . На рис. 3 показаны зависимости емкости сети от параметров γ и T_{upd} при двух значениях P_0 : $P_0 = 0$ и $P_0 = PLR^{QoS}$. Результаты показывают, что для большинства значений γ и T_{upd} выбор $P_0 = 0$ обеспечивает большую емкость по сравнению с $P_0 = PLR^{QoS}$. На рис. 4 и рис. 5 показаны зависимости среднего времени между

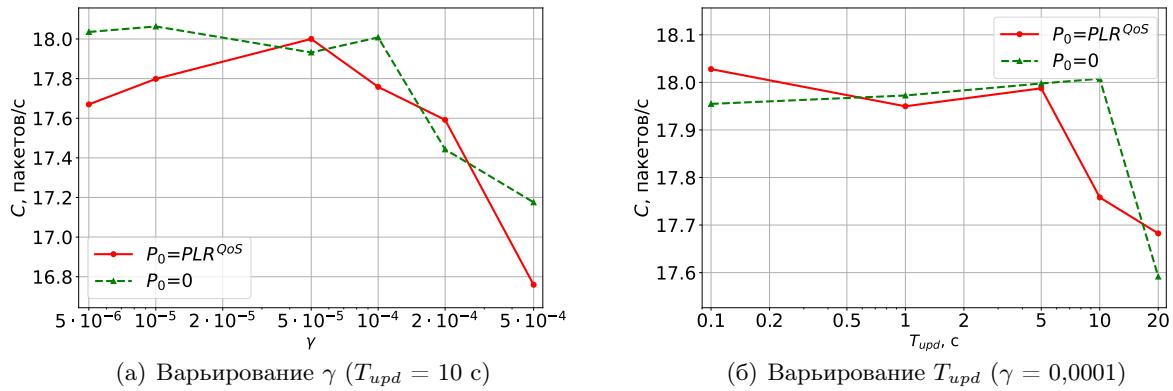


Рис. 3. Емкость сети при различных параметрах алгоритма.

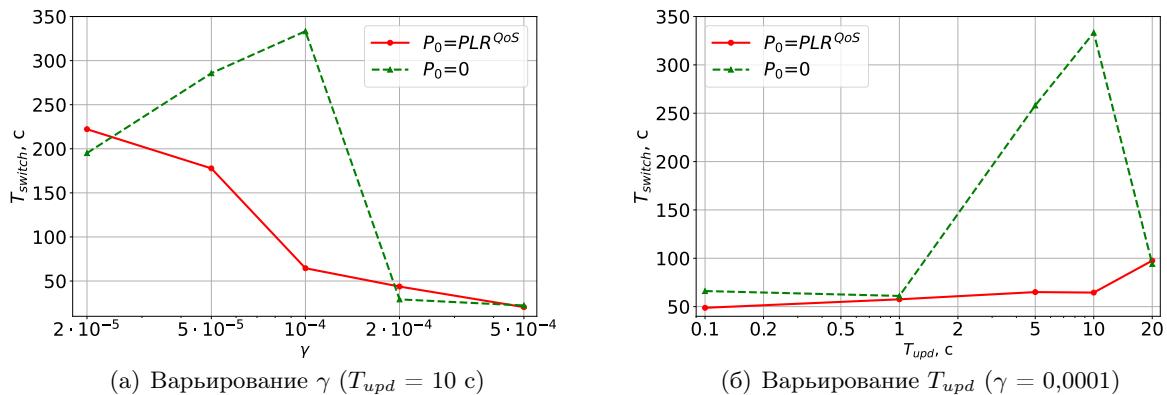


Рис. 4. Среднее время между переключениями СКК при различных параметрах алгоритма.

переключениями СКК и времени сходимости алгоритма от параметров алгоритма. Значения этих метрик показывают, что выбор $P_0 = 0$ позволяет обеспечить большее время между переключениями и меньшее время сходимости по сравнению с $P_0 = PLR^{QoS}$ при большинстве рассмотренных значений γ и T_{upd} . Учитывая этот факт и преимущество в емкости сети, далее будет рассматриваться значение $P_0 = 0$.

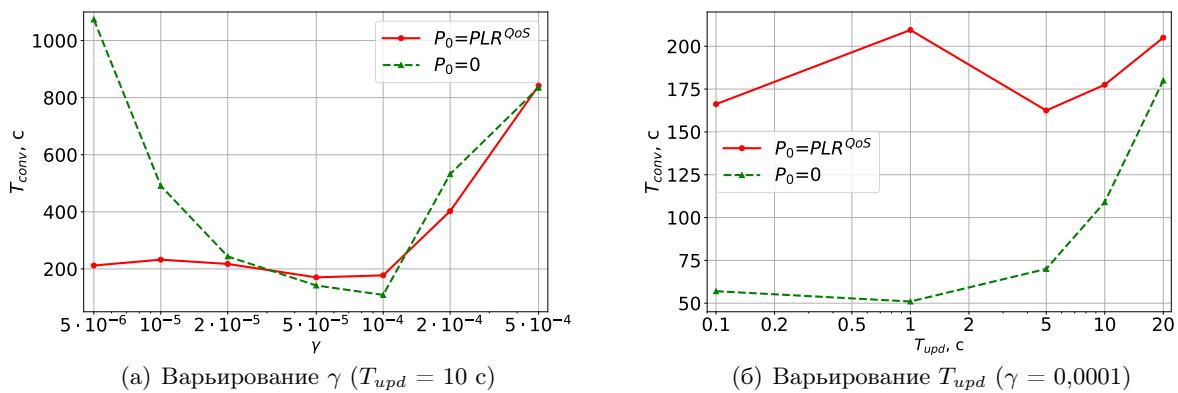
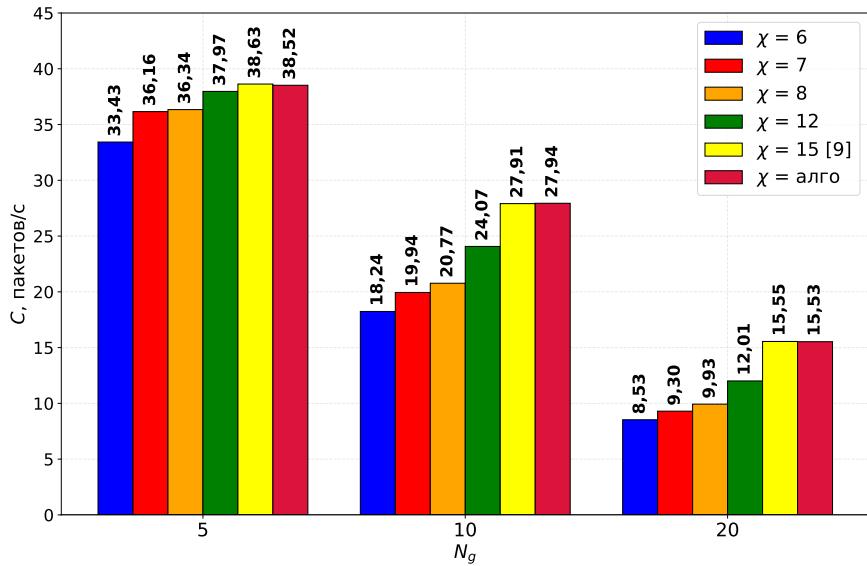
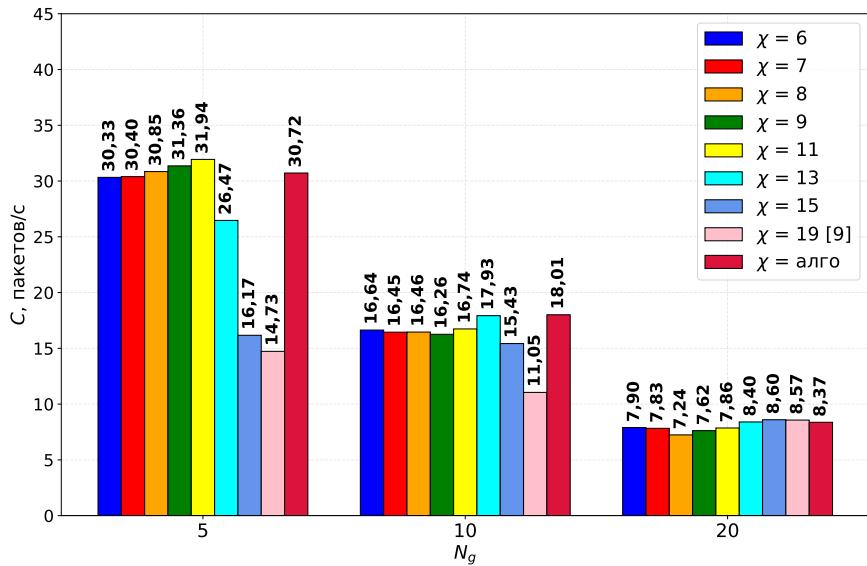
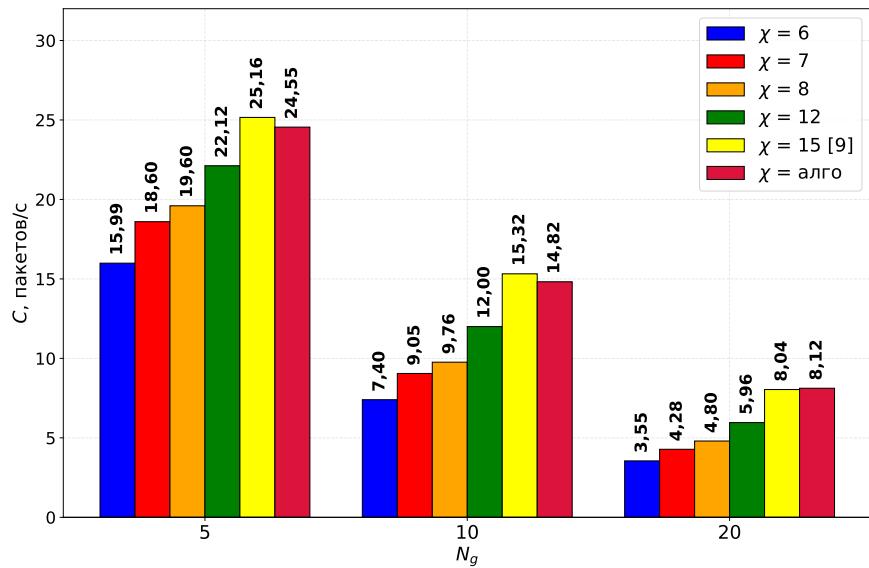
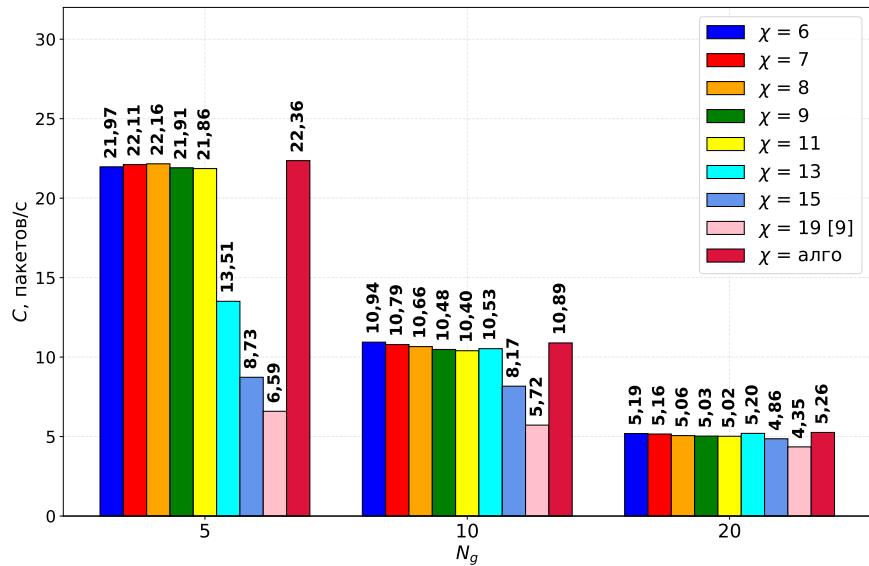


Рис. 5. Время сходимости при различных параметрах алгоритма.

Рис. 6. Емкость сети при $G = 580$ байт и $\lambda_b = 0$.Рис. 7. Емкость сети при $G = 1150$ байт и $\lambda_b = 0$.

На рис. 3(а) показана зависимость емкости сети от параметра γ . Оптимальными с точки зрения емкости сети для $P_0 = 0$ являются значения $\gamma = 10^{-5}$ и $\gamma = 5 \cdot 10^{-6}$. Однако на рис. 4(а) и рис. 5(а) показано, что выбор столь малых γ приводит к снижению среднего времени между переключениями СКК и значительному увеличению времени сходимости алгоритма по сравнению с $\gamma = 10^{-4}$. Для анализа эффективности алгоритма в дальнейшем зафиксируем значение $\gamma = 10^{-4}$, поскольку оно повышает стабильность работы алгоритма и существенно снижает время сходимости (-80%), при этом приводя к незначительному снижению емкости (-0,3%) по сравнению со значением $\gamma = 10^{-5}$.

На рис. 3(б) показана зависимость емкости сети от периода обновления СКК T_{upd} . Для выбранных значений $P_0 = 0$ и $\gamma = 10^{-4}$ значение $T_{upd} = 10$ с является оптимальным с точки зрения емкости сети. Кроме того, как показано на рис. 4(б), данное значение T_{upd} максимизирует время между переключениями СКК. Поэтому далее выбирается значение $T_{upd} = 10$ с.

Рис. 8. Емкость сети при $G = 580$ байт и $\lambda_b = 10$ пакетов/сРис. 9. Емкость сети при $G = 1150$ байт и $\lambda_b = 10$ пакетов/с

Таким образом, в результате проведенных экспериментов выбраны следующие параметры алгоритма: $P_0 = 0$, $\gamma = 10^{-4}$ и $T_{upd} = 10$ с.

6.2. Анализ эффективности предложенного алгоритма

Для анализа эффективности адаптивного алгоритма проведем его сравнение с методом статического выбора СКК. Рассмотрим сценарии с размером пакета $G = \{580, 1150\}$ байт, числом ТС в колонне $N_g = \{5, 10, 20\}$ и СКК χ_g , выбираемой либо с помощью предложенного алгоритма, либо статически. Зависимости емкости сети от числа ТС в колонне N_g при различных способах выбора СКК приведены на рис. 6–9. На каждой диаграмме наибольшая приведенная СКК соответствует выбору с помощью порогового алгоритма из работы [9].

Результаты в сценарии с $G = 580$ байт и $\lambda_b = 0$ пакетов/с (см. рис. 6) показывают, что адаптивный алгоритм достигает емкости, которая обеспечивается статическим выбором $\chi_g = 15$ согласно алгоритму из работы [9]. При этом достигается прирост емкости до 90% по сравнению с $\chi_g = 6$. Кроме того, можно видеть, что в данном сценарии пороговый алгоритм обеспечивает максимальную емкость.

Для пакета с размером $G = 1150$ байт (см. рис. 7) использование алгоритма повышает емкость до 180% по сравнению с пороговым алгоритмом. При этом емкость сети при использовании адаптивного алгоритма соответствует максимальной емкости, которую способен обеспечить статический выбор, с разницей не более 4%. Следует отметить, что в данном сценарии наблюдается прирост емкости по сравнению с $\chi_g = 6$ до 8%.

Описанные выше результаты показывают, что в сценарии с $G = 580$ байт адаптивный алгоритм позволяет получить значительный прирост емкости по сравнению с $\chi_g = 6$, а в сценарии с $G = 1150$ байт — по сравнению с χ_g , выбираемым пороговым алгоритмом. При этом в обоих случаях при использовании адаптивного алгоритма с разницей до 4% достигается емкость, соответствующая максимально возможной при статическом выборе СКК.

Отметим, что разработанный адаптивный алгоритм выбора СКК устойчив к трафику ТС, не являющимся членами колонны. На рис. 8 и рис. 9 приведены диаграммы зависимостей емкости сети от N_g при различных способах выбора СКК и $\lambda_b = 10$ пакетов/с. Результаты показывают, что абсолютные значения емкости сети снижаются по сравнению со сценарием без широковещательного трафика ($\lambda_b = 0$ пакетов/с) из-за повышения объема передаваемого трафика. Несмотря на это, адаптивный алгоритм обеспечивает максимальную возможную при статическом выборе СКК емкость сети.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен адаптивный алгоритм выбора СКК для колонн транспортных средств в сетях 5G V2X. Алгоритм основан на оценке вероятности потери пакета для различных СКК с помощью метода моделирования виртуальных передач. Было проведено исследование предложенного адаптивного алгоритма с помощью имитационного моделирования в среде ns-3 и сравнение с алгоритмами статического выбора СКК, рассмотренными в литературе. Показано, что использование адаптивного алгоритма обеспечивает повышение емкости сети до 180% по сравнению со статическим выбором, рассмотренным в литературе. Кроме того, в рассматриваемых сценариях емкость сети при использовании адаптивного алгоритма отличается от наилучшей возможной при статическом выборе СКК емкости не более чем на 4%.

В дальнейших работах планируется разработать расширение адаптивного алгоритма для одновременного выбора СКК и количества попыток передачи, а также методы повышения стабильности работы алгоритма и снижения времени его сходимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karamyshev A.Y., Porai E.D., Khorov E.M. Closed-Form Approximations for the URLLC Capacity Using $G/G/s$ Queues // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 3. — P. 255–272.
2. 5G; Service requirements for enhanced V2X scenarios : document 3GPP TR : 22.186 v17.0.0 : 2022. — Apr.
3. Yin Jicheng, Hwang Seung-Hoon. Design of C-V2X CAM/DENM separate resource pool // 2022 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) / IEEE. — 2022. — P. 94–98.
4. Study on Evaluation Methodology of New Vehicle-to-Everything (V2X) Use Cases for LTE and NR : document 3GPP TR : 37.885 v15.3.0 : 2019. — June.

5. Reducing the Complexity of the Layer Scheduled LDPC Decoder Based on the Information Bottleneck Method / Melnikov I.A., Uglovskii A.Y., Kreshchuk A.A., Kureev A.A., and Khorov E.M. // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 3. — P. 199–208.
6. Trifonov P.V., Trofimiuk G.A. Design of Polar Codes with Large Kernels // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 4. — P. 304–326.
7. Physical channels and modulation : document 3GPP TS : 38.211 v18.6.0 : 2025. — Apr.
8. NR; Physical layer procedures for data : document 3GPP TR : 38.214 v19.0.0 : 2025. — July.
9. О выборе сигнально-кодовой конструкции в сценариях 5G V2X Platooning / Савлукович П.Д., Отмахов А.Д., Банков Д.В. и Красилов А.Н. // Сборник трудов 49-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2025». — 2025.
10. Guerra João, Luís Miguel, Rito Pedro. Performance Evaluation of 5G New Radio V2X Sidelink for Coexisting Traffic // IEEE Access. — 2025. — Vol. 13. — P. 131400–131410.
11. Adaptive parameters selection for uplink grant-free URLLC transmission in 5G systems / Shashin Aleksei, Belogaev Andrey, Krasilov Artem, and Khorov Evgeny // Computer Networks. — 2023. — Vol. 222. — P. 109527.
12. From empirical measurements to augmented data rates: A machine learning approach for MCS adaptation in sidelink communication / Rokoni Asif Abdullah, Schäufele Daniel, Kasparick Martin, and Stańczak Sławomir // 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall) / IEEE. — 2023. — P. 1–5.
13. Deep reinforcement learning based resource allocation for 5G V2V groupcast communications / Wu Shang-Huan, Hwang Ren-Hung, Wang Chih-Yu, and Chou Ching-Hsuan // 2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) / IEEE. — 2023. — P. 1–6.
14. MCS adaptation within the cellular V2X sidelink / Burbano-Abril Andres, McCarthy Brian, Lopez-Guerrero Miguel, Rangel Victor, and O'Driscoll Aisling // 2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN) / IEEE. — 2021. — P. 111–117.
15. Reducing Energy Consumption in LoRaWAN Networks with Duty Cycle Limitation / Fedorishcheva A.A., Bankov D.V., Lyakhov A.I., and Khorov E.M. // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 61, no. 1. — P. 56–71.
16. Analytical Model of 5G V2X Mode 2 for Sporadic Traffic / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Krasilov Artem, and Otmakhov Artem // IEEE Wireless Communications Letters. — 2023. — Vol. 12, no. 8. — P. 1449–1453.
17. New radio physical layer abstraction for system-level simulations of 5G networks / Lagen Sandra, Wanuga Kevin, Elkotby Hussain, Goyal Sanjay, Patriciello Natale, and Giupponi Lorenza // ICC 2020–2020 IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. — 2020. — P. 1–7.
18. Анализ эффективности механизма подтверждений при обслуживании апериодического многоадресного трафика в сетях 5G V2X / Савлукович П.Д., Отмахов А.Д., Банков Д.В. и Красилов А.Н. // Сборник трудов 48-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2024». — 2024. — С. 439–453.
19. Network simulator 3 (NS-3). — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
20. Enhancing 5G V2X Mode 2 for Sporadic Traffic / Bankov Dmitry, Krasilov Artem, Otmakhov Artem, Shashin Aleksei, and Khorov Evgeny // 2024 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE. — 2024.

Modulation and Coding Scheme Selection Algorithm for 5G V2X Platoon Scenarios

P. D. Savlukovich, A. D. Otmakhov, D. V. Bankov, A. N. Krasilov

The deployment of autonomous vehicles (AVs) is a key driver for the development of intelligent transportation systems. One of the most relevant use cases for AVs is the vehicle platooning, aimed at enhancing road safety and improving the road infrastructure utilization. The 3GPP consortium develops 5G Vehicle-to-Everything (V2X) technology to coordinate platoon members using wireless communication. A key challenge in 5G V2X networks is the selection of transmission parameters, including the Modulation and Coding Scheme (MCS), to meet strict latency and reliability requirements. This paper proposes an adaptive MCS selection algorithm based on estimating the packet loss probability for different available MCSs. With simulations in ns-3, it is shown that the adaptive algorithm provides network capacity close to the upper bound achievable by an exhaustive search over available MCSs. Furthermore, the proposed adaptive algorithm increases network capacity by up to 180% compared to state-of-the-art algorithms.

KEYWORDS: 5G, V2X, Mode 2, modulation and coding scheme, vehicle platooning, aperiodic traffic.