

УДК 621.391:004.728.3

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ СХЕМЫ НАЗНАЧЕНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ТРАФИКА УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ В СЕТЯХ 5G V2X<sup>1</sup>**

© 2025 г. **Н.А. Николаев<sup>a,b</sup>, А.Э. Шашин<sup>a</sup>, А.Н. Красилов<sup>a</sup>, Е.М. Хоров<sup>a,b</sup>**

*<sup>a</sup> Институт проблем передачи информации  
им. А.А. Харкевича РАН, Москва*

*<sup>b</sup> Московский независимый исследовательский институт  
искусственного интеллекта (МНИИ ИИ), Москва*

*E-mail: nikolaev@wnlab.ru, shashin@wnlab.ru, krasilov@wnlab.ru,  
khorov@wnlab.ru*

Рассматривается сценарий передачи данных в восходящем канале в сетях 5G Vehicle-to-Everything (V2X) при удаленном управлении транспортным средством. Ключевыми особенностями данного типа трафика являются переменный размер генерируемых пакетов и строгое ограничение на время доставки пакета. Для обслуживания трафика различных пользователей базовая станция использует гибридную схему назначения радиоресурсов: каждому пользователю назначается как выделенный подканал, так и общий подканал, который используется, когда ресурсов в выделенном канале оказывается недостаточно для передачи пакета. Построена аналитическая модель передачи данных в восходящем канале с использованием данной схемы, которая позволяет оценить вероятность потери пакета для каждого пользователя при заданных параметрах схемы. Показано, как с помощью аналитической модели выбирать оптимальные параметры гибридной схемы, максимизирующие емкость сети.

*Ключевые слова:* 5G V2X, метод доступа к каналу без запроса полосы (Grant-Free), удаленное управление, гибридная схема, аналитическая модель

**DOI:** 10.7868/S3034583925030039

Поступила в редакцию 06.11.2025

После доработки 18.11.2025

Принята к публикации 20.11.2025

## § 1. Введение

В настоящее время во всем мире ведется активная разработка технологий для построения интеллектуальных транспортных систем, включая системы беспилотного транспорта и беспилотных летательных аппаратов [1, 2]. Одной из важнейших задач в таких системах является обеспечение сверхнадежной связи с низкой задержкой [3], как напрямую между транспортными средствами, так и между транспортными средствами и инфраструктурой. На данный момент международными комитетами по стандартизации предложены две технологии беспроводной передачи данных для построения систем беспилотного транспорта:

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках Госзадания № FFNU-2025-0030 ИППИ РАН.

- а) комитетом IEEE 802 разработана технология Dedicated Short-Range Communications (DSRC), описываемая стандартами IEEE 802.11p/bd [4, 5];
- б) консорциумом 3GPP предложена технология 5G V2X (Vehicle-to-Everything) [6, 7]. Ключевыми преимуществами технологии 5G V2X является то, что она:
  - а) легко интегрируется с существующими технологиями сотовой связи LTE/5G;
  - б) не требует развертывания дополнительной инфраструктуры базовых станций для подключения мобильных устройств к глобальной сети Интернет.

Одним из важнейших сценариев использования технологии 5G V2X является удаленное управление автономным транспортным средством [8]. В данном сценарии транспортное средство через ближайшую базовую станцию отправляет оператору полученное с камер видеоизображение, а также другую телеметрическую информацию. Оператор на основе полученной информации генерирует команды управления транспортным средством и отправляет эти команды в нисходящем канале. Заметим, что основной объем трафика в данном сценарии генерируется в восходящем канале (а именно видеоизображение с камер транспортного средства). Согласно оценкам 3GPP интенсивность трафика составляет десятки Мбит/с. Отметим также, что современные алгоритмы сжатия и кодирования видеоизображений генерируют следующий поток данных: видеокадры поступают на передачу строго периодически, однако размер видеокадра является случайной величиной с достаточно широким диапазоном значений. Чтобы обеспечить управление высокоскоростным транспортным средством в режиме реального времени согласно [8] необходимо обеспечить передачу видеокадров за время, не превышающее 5 мс, с надежностью более 99%.

Для обеспечения низкой задержки при передаче данных в восходящем канале спецификации 3GPP [9, 10] вводят новый метод доступа к каналу без запроса полосы (англ.: Grant-Free). Согласно данному методу базовая станция заранее назначает пользователю каналные ресурсы (а именно периодическую последовательность слотов и частотных подканалов), а также параметры передачи, такие как сигнально-кодированная конструкция (СКК) и мощность передачи. При поступлении пакета пользователь использует для передачи ближайший выделенный ему каналный ресурс. Одной из ключевых особенностей метода Grant-Free является то, что базовая станция должна назначать каналные ресурсы и параметры передачи заблаговременно. В рассмотренном выше сценарии удаленного управления транспортным средством базовая станция заранее не знает размер видеокадра. Если базовая станция будет выделять пользователю слишком большой объем ресурсов (например, закладываясь на максимальный размер видеокадра), то это приведет к низкому коэффициенту использования ресурсов и, как следствие, низкому числу обслуживаемых потоков данных. С другой стороны, при назначении небольшого объема ресурсов (например, в расчете на средний размер видеокадра), большие видеокадры будут фрагментироваться и не будут доставлены за заданное время в случае строгого ограничения на задержку.

Чтобы повысить коэффициент использования радиоресурсов при использовании метода Grant-Free в случае обслуживания пакетов переменного размера, в работах [11, 12] коллективом авторов была предложена гибридная схема назначения ресурсов. В данной схеме каждому пользователю назначается некоторый выделенный ресурс, а также общий для всех пользователей ресурс, который используется, когда ресурсов в выделенном канале оказывается недостаточно для передачи пакета. Эффективность данной схемы в значительной степени зависит от выбранных параметров: ширины выделенного подканала, ширины общего подканала, а также используемых для передачи данных СКК. В работах [11, 12] показано, что гибридная схема позволяет существенно повысить емкость сети, т.е. максимальное число обслуживаемых потоков, для которых выполнены строгие ограничения на время и надежность доставки данных, по сравнению с назначением всем пользователям только

выделенных (непересекающихся) ресурсов. Однако предложенная в данных работах аналитическая модель обладает рядом существенных недостатков и не может использоваться для выбора оптимальных параметров схемы (см. подробнее в § 2). В настоящей статье построена аналитическая модель передачи данных в восходящем канале с использованием описанной выше гибридной схемы. Модель позволяет оценить вероятность потери пакета для каждого пользователя при заданных параметрах схемы. Показано, как с помощью модели выбирать параметры, позволяющие максимизировать емкость сети.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В § 2 проведен обзор литературы по схемам назначения ресурсов при использовании метода Grant-Free. В § 3 подробно описан объект исследования и постановка задачи. В § 4 представлена аналитическая модель передачи данных в восходящем канале с использованием гибридной схемы назначения ресурсов. В § 5 проведена валидация модели, а также показаны результаты применения модели для максимизации емкости сети. Выводы представлены в § 6.

## § 2. Обзор литературы

В существующих работах предлагается несколько схем назначения канальных ресурсов при использовании метода Grant-Free для обслуживания восходящего трафика.

В работах [13–16] предлагается назначать пользователям непересекающиеся (выделенные) ресурсы, объема которых хватит для передачи пакета с заданной вероятностью. Однако при обслуживании видеотрафика квантиль размера пакета высокого порядка (например, 99%) может превосходить средний размер пакета в 2–4 раза [17], поэтому такое назначение приводит к неэффективному использованию канальных ресурсов, что, в свою очередь, ограничивает емкость сети.

В работах [18–21] предлагается назначать всем пользователям общие канальные ресурсы. В этом случае при одновременной передаче данных большим числом пользователей их сигналы будут интерферировать между собой, что может привести к высокой вероятности потери пакетов и невыполнению ограничений на надежность.

В работах [11, 12] авторами была предложена гибридная схема назначения ресурсов. Данная схема предполагает назначение как выделенных, так и общих канальных ресурсов (подробное описание схемы приведено в § 3). Для исследования эффективности данной схемы в работах [11, 12] разработана аналитическая модель, которая позволяет оценить вероятность потери пакета при заданных параметрах схемы. Однако эта модель обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, скорость передачи данных для пользователей оценивается по формуле Шеннона, которая не учитывает особенностей реальных СКК, используемых в сетях 5G. А именно, при использовании формулы Шеннона пакет всегда будет доставлен успешно, если оценка емкости канала превышает размер пакета, и потерян в противном случае. Для реальных СКК вероятность потери пакета является не пороговой, а непрерывной функцией, зависящей от размера пакета, выбранной СКК и отношения сигнал/шум на приемнике. В связи с этим, существующая аналитическая модель не может быть использована для решения задачи выбора СКК. Во-вторых, в аналитической модели из работ [11, 12] предполагается, что все пользователи имеют одинаковые канальные условия, тогда как в реальных сетях качество канала разных пользователей может сильно различаться. Таким образом, существующая модель не может быть использована для оценки эффективности гибридной схемы назначения ресурсов и выбора параметров этой схемы в реалистичных сценариях. В настоящей статье построена аналитическая модель, которая лишена указанных выше недостатков, и позволяет оценить вероятность потери пакета в зависимости от параметров гибридной схемы, таких как ширина выделенного и общего подканалов и используемые в них СКК.

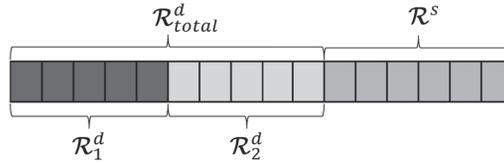


Рис. 1. Разделение частотных ресурсов согласно гибридной схеме ( $N = 2$ ,  $R_{total} = 16$ ,  $R^s = 6$ ,  $R^d = 5$ )

### § 3. Объект исследования и постановка задачи

Рассматривается сеть 5G V2X, в которой базовая станция обслуживает  $N$  транспортных средств (далее: пользователей). Пользователь  $i$  находится на расстоянии  $r_i$  от базовой станции и периодически генерирует пакет данных (видеокадр) случайного размера  $d$ , задаваемого функцией распределения  $\Phi(d)$ . С учетом строгого ограничения на задержку для каждого пакета может быть осуществлена только одна попытка передачи.

Весь доступный частотный канал делится на  $R_{total}$  подканалов, называемых в спецификациях группами ресурсных блоков (ГРБ). Все ГРБ имеют одинаковую ширину  $W$ . Во времени передачи разных пользователей осуществляются в слотах длительностью  $T_{slot}$ . Мощность передачи пользовательского устройства равномерно распределяется между используемыми ГРБ, поэтому спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала от пользователя на базовой станции выражается следующим образом:

$$P(R, r_i) = \frac{P_{TX}}{L(r_i) \cdot R \cdot W}, \tag{1}$$

где  $P_{TX}$  – полная мощность передатчика на пользователе,  $R$  – количество используемых для передачи ГРБ,  $L(r_i)$  – функция потери мощности при распространении сигнала на расстояние  $r_i$ , конкретный вид которой зависит от сценария (см. § 5).

Объем данных  $TB(M, R)$ , который может быть передан в слоте пользователем, зависит от числа выделенных пользователю ГРБ  $R$  и назначенной ему СКК  $M$ . В спецификациях [9] определен набор СКК  $M \in \{0, 1, \dots, M_{max}\}$ , где  $M = 0$  – самая робастная СКК, обеспечивающая минимальную скорость передачи данных, а  $M_{max}$  – СКК, обеспечивающая самую высокую скорость передачи данных.

Рассмотрим более подробно, как базовая станция осуществляет назначение пользователю ресурсов при использовании метода доступа к каналу Grant-Free. При появлении у пользователя потока данных базовая станция определяет набор частотно-временных ресурсов, который описывается следующим образом: (а) по времени – периодический набор слотов, в котором будет осуществляться передача, (б) по частоте – набор ГРБ, причем пользователю может быть назначен произвольный набор ГРБ. Помимо этого, для каждого набора ресурсов базовая станция определяет индекс СКК, которую пользователь использует для передачи данных. Эта информация отправляется пользователю в нисходящем канале. С момента получения данного сообщения пользователь может использовать назначенные ресурсы для фактической передачи данных. Согласно спецификациям [9, 10] пользователю может быть назначено одновременно несколько наборов (конфигураций) ресурсов, которые он может использовать для обслуживания как разных потоков данных, так и одного и того же потока данных.

В данной статье метод доступа к каналу Grant-Free используется для обслуживания видеотрафика следующим образом. Так как видеокadres генерируются пери-

одически, то слоты по времени необходимо назначать с периодом, равным периоду генерации видеокадров. При этом назначенные слоты следует выравнивать с моментами поступления пакетов в очередь. Для назначения ресурсов по частоте используется гибридная схема, предложенная в работах [11, 12]. Согласно данной схеме (см. рис. 1) множество доступных ГРБ  $\mathcal{R}_{\text{total}}$  разделяется на два подмножества: общие ресурсы  $\mathcal{R}^s$  и выделенные ресурсы  $\mathcal{R}_{\text{total}}^d$ , т.е.

$$\mathcal{R}^s \cup \mathcal{R}_{\text{total}}^d = \mathcal{R}_{\text{total}}, \quad \mathcal{R}^s \cap \mathcal{R}_{\text{total}}^d = \emptyset.$$

Выделенные ресурсы, в свою очередь, делятся между пользователями на  $N$  частей: пользователю  $i$  выделяется набор ГРБ  $\mathcal{R}_i^d$ , так что

$$\bigcup_{i=1}^N \mathcal{R}_i^d = \mathcal{R}_{\text{total}}^d, \quad \forall i \neq j : \mathcal{R}_i^d \cap \mathcal{R}_j^d = \emptyset.$$

Каждому пользователю базовой станцией назначаются два набора ресурсов для передачи данных:

1. **Выделенные ресурсы:** пользователь  $i$  использует только выделенные ресурсы  $\mathcal{R}_i^d$  с СКК  $M_i^d$ ;
2. **Комбинированные ресурсы:** пользователь  $i$  использует как выделенные ресурсы, так и общие ресурсы  $\mathcal{R}_i^c = \mathcal{R}_i^d \cup \mathcal{R}^s$  с СКК  $M_i^c$ .

Для передачи пакета данных размера  $d_i$  пользователь  $i$  осуществляет выбор одного из наборов ресурсов для передачи пакета по следующему правилу. При заданных наборах ресурсов и СКК пользователь определяет размер транспортного блока  $D_i^d = TB(M_i^d, |\mathcal{R}_i^d|)$ , который может быть передан при использовании только выделенных ресурсов, а также размер транспортного блока  $D_i^c = TB(M_i^c, |\mathcal{R}_i^c|)$ , который может быть передан при использовании комбинированных ресурсов. Если размер пакета  $d_i \leq D_i^d$ , то для передачи данных используются выделенные ресурсы. Если  $D_i^d < d_i \leq D_i^c$ , то для передачи используются комбинированные ресурсы. Если же ни выделенные, ни комбинированные ресурсы не позволяют передать пакет данного размера (т.е.  $d_i > D_i^c$ ) – пакет не передается и считается потерянным.

Целью данной статьи является разработка аналитической модели, которая позволяет оценить вероятность потери пакета  $p_i^c$  для каждого пользователя  $i$  при заданных параметрах гибридной схемы. Так как в статье рассматривается сценарий с высокой мобильностью, то качество канала каждого пользователя может существенно меняться с течением времени, что потребует частого изменения параметров передачи (в частности, СКК  $M_i^d$  для выделенных ресурсов) и количества назначенных ГРБ. Изменение параметров передачи и количества назначенных ГРБ при использовании метода Grant-Free требует обмена служебной информацией пользователя с базовой станцией и не может быть выполнено мгновенно. В связи с этим в данной статье рассматривается случай, когда всем пользователям назначаются одинаковые параметры передачи, которые не меняются с течением времени. Иными словами,

$$\forall i : \quad R_i^d = |\mathcal{R}_i^d| = R^d, \quad M_i^d = M^d, \quad M_i^c = M^c, \quad D_i^d = D^d, \quad D_i^c = D^c.$$

Однако модель может быть расширена на случай, когда различным пользователям назначается различное количество ГРБ в выделенных ресурсах, а параметры передачи могут меняться с течением времени. В рассматриваемом случае гибридная схема определяется тремя независимыми параметрами:  $R^d, M^d, M^c$ . В свою очередь,

$$R^s = |\mathcal{R}^s| = R_{\text{total}} - NR^d$$

зависит только от общей ширины канала и числа пользователей.

С помощью разработанной модели проводится анализ емкости сети в зависимости от параметров гибридной схемы, параметров рассматриваемого сценария и требований к задержке и надежности передачи видеокадров. Под емкостью сети понимается максимальное количество пользователей, при котором требования к качеству обслуживания (а именно к задержке и надежности) выполняются не менее чем для 99% пользователей [22]. Показано, как с помощью модели выбирать оптимальные параметры гибридной схемы  $R^d, M^d, M^c$ , максимизирующие емкость сети.

#### § 4. Аналитическая модель

Разработанная аналитическая модель позволяет оценить вероятность  $p_i^e$  неудачной доставки (потери) пакета случайного размера для каждого пользователя  $i$ . Отметим, что потеря пакета может быть вызвана как ошибкой декодирования данных на базовой станции, так и отбрасыванием пакета на пользователе из-за превышения максимального размера  $D^c$  согласно гибридной схеме. Основная идея модели состоит в разделении случаев использования выделенных и комбинированных ресурсов для каждого пользователя и определении вероятности потери пакета в каждом из рассматриваемых случаев.

Обозначим через  $U^d, U^c$  и  $U^o$  множества пользователей, использующих в данный момент времени выделенные ресурсы, комбинированные ресурсы и отбросивших пакет из-за превышения максимального размера соответственно. Пусть  $E_i$  — событие потери пакета пользователем  $i$ . Искомую вероятность потери пакета  $p_i^e$  можно разложить по формуле полной вероятности

$$p_i^e \triangleq \mathbf{P}(E_i) = \mathbf{P}(E_i | i \in U^d) \mathbf{P}(i \in U^d) + \mathbf{P}(E_i | i \in U^c) \mathbf{P}(i \in U^c) + \mathbf{P}(E_i | i \in U^o) \mathbf{P}(i \in U^o). \quad (2)$$

Вероятности использовать выделенные ресурсы, комбинированные ресурсы или отбросить пакет определяются следующим образом:

$$\mathbf{P}(i \in U^d) = \mathbf{P}(d_i \leq D^d) = \Phi(D^d) \triangleq p^d, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(i \in U^c) = \mathbf{P}(D^d < d_i \leq D^c) = \Phi(D^c) - \Phi(D^d) \triangleq p^c, \quad (4)$$

$$\mathbf{P}(i \in U^o) = \mathbf{P}(d_i > D^c) = 1 - \Phi(D^c) \triangleq p^o. \quad (5)$$

Вероятность потери пакета при его отбрасывании:

$$\mathbf{P}(E_i | i \in U^o) = 1. \quad (6)$$

Вероятности потери пакета при использовании выделенных ресурсов  $\mathbf{P}(E_i | i \in U^d)$  и комбинированных ресурсов  $\mathbf{P}(E_i | i \in U^c)$  далее подробно рассматриваются в пп. 4.1 и 4.2.

**4.1. Вероятность потери пакета при использовании выделенных ресурсов.** Сначала оценим вероятность потери пакета при заданных параметрах передачи. Пусть пользователь осуществляет передачу данных с использованием СКК  $M$  в наборе ГРБ  $\mathcal{R}$ . В этом случае размер передаваемого транспортного блока  $D = TB(M, R)$ , где  $R = |\mathcal{R}|$ . В каждой ГРБ  $j \in \mathcal{R}$  определяется отношение полезного сигнала к шуму и интерференции (ОСШИ)  $S^{(j)}$  на базовой станции. Для определения вероятности ошибки используется модель EESM (англ.: Exponential Effective Signal-to-interference-plus-noise ratio Mapping) [23]. Согласно этой модели для оценки вероятности потери пакета сначала необходимо определить эффективное ОСШИ следую-

щим образом:

$$S^{\text{eff}} = -\beta(M) \ln \left( \frac{1}{R} \sum_{j \in \mathcal{R}} e^{-\frac{S(j)}{\beta(M)}} \right), \quad (7)$$

где  $\beta(M)$  – коэффициент усреднения, зависящий от используемой СКК  $M$ . Вероятность ошибки при передаче пакета является функцией  $\pi(S^{\text{eff}}, M, D)$ . Для определения конкретных значений  $\pi(S^{\text{eff}}, M, D)$  могут использоваться аналитические модели (например, из работ [24, 25]). Кроме того, эти функции могут быть заглабулированы на основе реальных измерений или имитационного моделирования [23].

Пусть пользователь  $i$  использует для передачи данных выделенные ресурсы. В выделенных ресурсах передавать данные может только этот пользователь, поэтому ОСШИ оценивается следующим образом:

$$S_i^d = \frac{P(R^d, r_i)}{P_{\text{noise}}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{noise}}$  – СПМ теплового шума на базовой станции,  $P(R^d, r_i)$  рассчитывается согласно (1). Поскольку в данном случае ОСШИ во всех ГРБ имеют одинаковое значение  $S_i^d$ , согласно (7) эффективное ОСШИ пользователя  $i$  равно  $S_i^{\text{eff}} = S_i^d$ . Тогда искомая вероятность потери пакета при использовании выделенных ресурсов:

$$\mathbf{P}(E_i | i \in \mathcal{U}^d) = \pi(S_i^d, M^d, D^d). \quad (9)$$

#### 4.2. Вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов.

В случае использования конфигурации с комбинированными ресурсами ОСШИ в выделенных и общих ресурсах будут различаться. ОСШИ в выделенных ресурсах имеет вид, аналогичный (8):

$$S_i^{c,d} = \frac{P(R^c, r_i)}{P_{\text{noise}}}, \quad (10)$$

где  $R^c = R^d + R^s$  – общее количество ГРБ в комбинированных ресурсах.

ОСШИ в общих ресурсах зависит от того, какие пользователи также используют общие ресурсы. Спектральную плотность интерференции для пользователя  $i$  от других пользователей можно оценить как

$$P_i^{\text{int}}(\mathcal{U}^c) = \sum_{\substack{j \in \mathcal{U}^c \\ j \neq i}} P(R^c, r_j). \quad (11)$$

Тогда ОСШИ в общих ресурсах рассчитывается следующим образом:

$$S_i^{c,s}(\mathcal{U}^c) = \frac{P(R^c, r_i)}{P_{\text{noise}} + P_i^{\text{int}}(\mathcal{U}^c)} = \frac{P(R^c, r_i)}{P_{\text{noise}} + \sum_{\substack{j \in \mathcal{U}^c \\ j \neq i}} P(R^c, r_j)}. \quad (12)$$

Используя (7), (10) и (12), можно найти эффективное ОСШИ при использовании комбинированных ресурсов:

$$S_i^c(\mathcal{U}^c) = -\beta(M^c) \ln \left( \frac{R^d}{R^c} \cdot e^{-\frac{S_i^{c,d}}{\beta(M^c)}} + \frac{R^s}{R^c} \cdot e^{-\frac{S_i^{c,s}(\mathcal{U}^c)}{\beta(M^c)}} \right). \quad (13)$$

Пусть  $\bar{\mathcal{U}}_i$  – множество всех пользователей за исключением пользователя  $i$ . Рассмотрим множество  $\mathfrak{B}(\bar{\mathcal{U}}_i)$ , которое является множеством всех подмножеств множества  $\bar{\mathcal{U}}_i$ . Его мощность  $|\mathfrak{B}(\bar{\mathcal{U}}_i)| = 2^{N-1}$ . Это множество содержит все возможные комбинации пользователей, которые могут интерферировать с пользователем  $i$  в общих ресурсах. Тогда вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов можно разложить по формуле полной вероятности

$$\mathbf{P}(E_i | i \in \mathcal{U}^c) = \sum_{\nu \in \mathfrak{B}(\bar{\mathcal{U}}_i)} \mathbf{P}(E_i | \mathcal{U}^c = \mathcal{U}_i(\nu)) \mathbf{P}(\mathcal{U}^c = \mathcal{U}_i(\nu) | i \in \mathcal{U}^c), \quad (14)$$

где  $\mathcal{U}_i(\nu) = \nu \cup \{i\}$ .

Первый множитель в каждом слагаемом – это вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов пользователем  $i$ , а также пользователями из множества  $\nu$ :

$$\mathbf{P}(E_i | \mathcal{U}^c = \mathcal{U}_i(\nu)) = \pi(S_i^c(\nu), M^c, D^c). \quad (15)$$

Второй множитель – это вероятность использования комбинированных ресурсов только пользователями из множества  $\nu$  (помимо пользователя  $i$ ). Поскольку каждый пользователь независимо принимает решение об использовании комбинированных ресурсов с вероятностью  $p^c$  (см. (4)), искомая вероятность выражается следующим образом:

$$\mathbf{P}(\mathcal{U}^c = \mathcal{U}_i(\nu) | i \in \mathcal{U}^c) = (p^c)^{|\nu|} (1 - p^c)^{N-1-|\nu|}, \quad (16)$$

где  $|\nu|$  – количество пользователей в множестве  $\nu$ .

Подставляя (15) и (16) в (14), получаем условную вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов

$$\mathbf{P}(E_i | i \in \mathcal{U}^c) = \sum_{\nu \in \mathfrak{B}(\bar{\mathcal{U}}_i)} \pi(S_i^c(\nu), M^c, D^c) (p^c)^{|\nu|} (1 - p^c)^{N-1-|\nu|}. \quad (17)$$

Наконец, подставляя (3)–(6), (9) и (17) в (2), получаем искомую формулу для определения вероятности потери пакета  $p_i^e$ . Заметим что формула (17) имеет  $2^{N-1}$  слагаемых. Это означает, что сложность вычисления разработанной модели экспоненциально растет с числом пользователей.

**4.3. Приближенная оценка интерференции.** В этом пункте предлагается приближенная формула для оценки вероятности потери пакета, которая обладает линейной вычислительной сложностью.

Без ограничения общности предположим, что пользователи пронумерованы в порядке убывания их значений СПМ  $P(R^c, r_i)$ . В формуле (11) СПМ интерференции для пользователя  $i$  оценивается как сумма СПМ всех пользователей из множества  $\mathcal{U}^c$  за исключением пользователя  $i$ . Вместо этого, оценим спектральную плотность интерференции как СПМ сигнала от пользователя, имеющего наибольшую СПМ среди пользователей, использующих комбинированные ресурсы, т.е. пользователя с индексом

$$j_i^{\min} = \min \{j | j \in \mathcal{U}^c, j \neq i\}.$$

Идея данного приближения заключается в следующем. Во-первых, предполагается, что для выполнения строгих ограничений на надежность доставки данных параметры схемы необходимо выбирать так, чтобы вероятность использования комбинированных ресурсов была мала  $p^c \ll 1$ . В этом случае общие ресурсы будут использоваться более чем двумя пользователями одновременно с вероятностью порядка  $(p^c)^3$ .

Во-вторых, предполагается, что в случае, когда общие ресурсы все же используются более чем двумя пользователями, основной вклад в интерференцию вносит пользователь с наибольшей СПМ. С учетом данных предположений приближенная оценка СПМ интерференции находится следующим образом:

$$\widehat{P}_i^{\text{int}}(\mathcal{U}^c) = \widehat{P}_i^{\text{int}}(j_i^{\min}) = P(R^c, r_{j_i^{\min}}). \quad (18)$$

Подставляя  $\widehat{P}_i^{\text{int}}(j_i^{\min})$  вместо  $P_i^{\text{int}}(\mathcal{U}^c)$  в (12), получаем приближенную оценку величины ОСШИ в комбинированных ресурсах  $\widehat{S}_i^c(j_i^{\min})$ .

В таком приближении вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов можно разложить следующим образом:

$$\mathbf{P}(E_i | i \in \mathcal{U}^c) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{P}(E_i | j_i^{\min} = j, i \in \mathcal{U}^c) \mathbf{P}(j_i^{\min} = j | i \in \mathcal{U}^c). \quad (19)$$

Первый множитель – это вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов пользователем  $i$ , а также пользователями, среди которых наименьший индекс имеет пользователь  $j$ :

$$\mathbf{P}(E_i | j_i^{\min} = j, i \in \mathcal{U}^c) = \pi(\widehat{S}_i^c(j), M^c, D^c). \quad (20)$$

Второй множитель – это вероятность использования комбинированных ресурсов пользователями (помимо пользователя  $i$ ), среди которых наименьший индекс имеет пользователь  $j$ . Эта вероятность соответствует вероятности того, что пользователи с индексами от 1 до  $j - 1$  (кроме  $i$ ) не используют комбинированные ресурсы, а пользователь  $j$  использует комбинированные ресурсы. Такая вероятность подчиняется геометрическому распределению:

$$\mathbf{P}(j_i^{\min} = j | i \in \mathcal{U}^c) = p^c(1 - p^c)^{j-1 - \mathbf{I}(i < j)}, \quad j = 1, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N, \quad (21)$$

где  $\mathbf{I}(i < j)$  – индикатор, равный 1, если  $i < j$ , и равный 0 в противном случае.

Подставляя (20) и (21) в (19), получаем условную вероятность потери пакета при использовании комбинированных ресурсов:

$$\mathbf{P}(E_i | i \in \mathcal{U}^c) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \pi(\widehat{S}_i^c(j), M^c, D^c) p^c(1 - p^c)^{j-1 - \mathbf{I}(i < j)}. \quad (22)$$

Используя (22) вместо (17) в (2), получаем формулу для определения приближенной оценки вероятности потери пакета  $\widehat{p}_i^c$ . Заметим, что сумма в (22) состоит из  $N - 1$  слагаемых, т.е. вычислительная сложность модели с приближенной оценкой интерференции линейно растет с числом пользователей.

## § 5. Численные результаты

**5.1. Описание сценария.** Для валидации аналитической модели была разработана имитационная модель передачи данных в восходящем канале методом Grant-Free в среде ns-3 [26]. В данной модели была реализована гибридная схема назначения канальных ресурсов, описанная в § 3. Основные параметры рассматриваемого сценария приведены в табл. 1.

Пользователи равномерно распределены в шестиугольной соте с размером главной диагонали  $\Lambda$ , в одном из углов которой находится базовая станция. Для моде-

Таблица 1

Основные параметры моделирования

Параметр	Значение
Несущая частота	2 ГГц
Расстояние между поднесущими	15 кГц
Ширина ГРБ $W$	1,44 МГц, 8 РБ
Ширина канала $R_{total}$	50 МГц, 32 ГРБ
Длительность слота $T_{slot}$	1 мс
Конфигурация TDD	4:1
$T^{QoS}$	5 мс
Период генерации пакетов	5 мс
Мощность передатчика $P_{TX}$	23 дБм
$\mu$	500 байт
$\sigma$	500 байт
$x_{min}$	10 байт
$x_{max}$	5000 байт
Длительность эксперимента	1000 с

лирования затухания сигнала  $L(r)$  использовалась модель COST Hata [27]. Функция вероятности потери пакета в зависимости от ОСПИ  $\pi(S, M, D)$  была получена с помощью имитационного моделирования в среде MATLAB 5G Toolbox [28] для таблицы СКК №1 из спецификации [9].

Пользователи генерируют видеотрафик со следующими параметрами. В соответствии со спецификацией [29] размер генерируемых пакетов – случайная величина, заданная усеченным нормальным распределением

$$\Phi(d) = \mathcal{TN}(\mu, \sigma, x_{min}, x_{max}),$$

где  $\mu$  – среднее значение размера пакета,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение,  $x_{min}$  – минимальный размер пакета,  $x_{max}$  – максимальный размер пакета. Каждый пакет должен быть доставлен за время  $T^{QoS}$  с вероятностью  $P^{QoS}$ . Согласно спецификации [8] в статье рассматриваются  $T^{QoS} = 5$  мс и  $P^{QoS} = \{0,99; 0,9999\}$ .

Нисходящий и восходящий каналы мультиплексируются с помощью временного разделения (англ.: Time-Division Duplex, TDD) в конфигурации 4 : 1, т.е. 4 слота используются для нисходящего канала, затем 1 слот – для восходящего канала [11]. Таким образом, при ограничении на задержку  $T^{QoS}=5$  мс пользователь может осуществить только одну попытку передачи в восходящем канале.

**5.2. Валидация модели.** На рис. 2 представлены результаты валидации для сценария с параметрами  $N = 9, M^d = 20, M^c = 18, R^d = 3, R^c = 8, \Lambda = 300$  м, который рассматривается в качестве иллюстративного примера. Значения расстояний от пользователей до базовой станции сгенерированы случайно и использованы как для аналитического, так и для имитационного моделирования. По оси абсцисс точками показано расстояние  $r$  от конкретного пользователя до базовой станции, по оси ординат – вероятность потери пакета для данного пользователя. Результаты показывают, что оценки вероятности потери пакета, полученные с помощью аналитического и имитационного моделирования, совпадают с высокой точностью для каждого пользователя.

Заметим, что в диапазоне значений  $r$  от 100 до 150 м величина  $p^e$  растет, поскольку на пользователей из данного диапазона значений  $r$  существенное влияние оказывает интерференция со стороны других пользователей из этого диапазона. В диапазоне  $r$  от 150 до 250 м значения  $p^e$  возрастают незначительно, поскольку эти пользователи подвержены в первую очередь влиянию интерференции со стороны пользователей с  $r < 150$  м, а не со стороны пользователей с близкими значениями  $r$ .

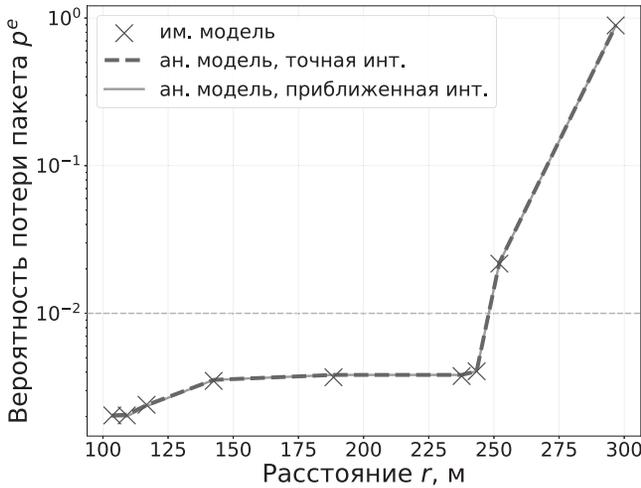


Рис. 2. Валидация аналитической модели

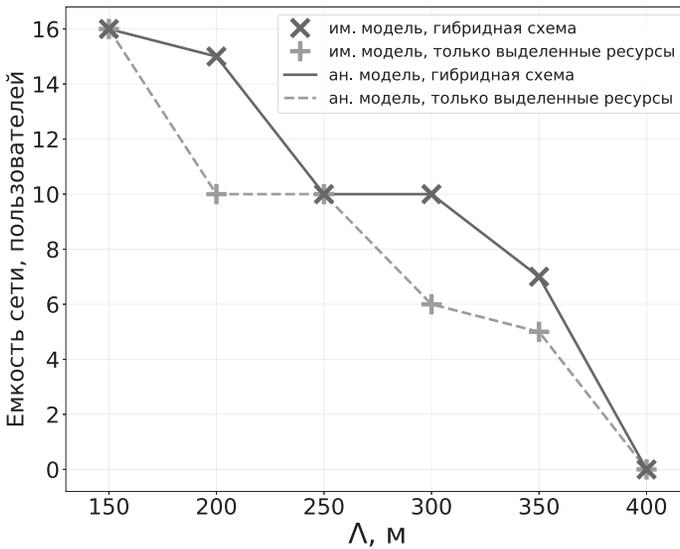
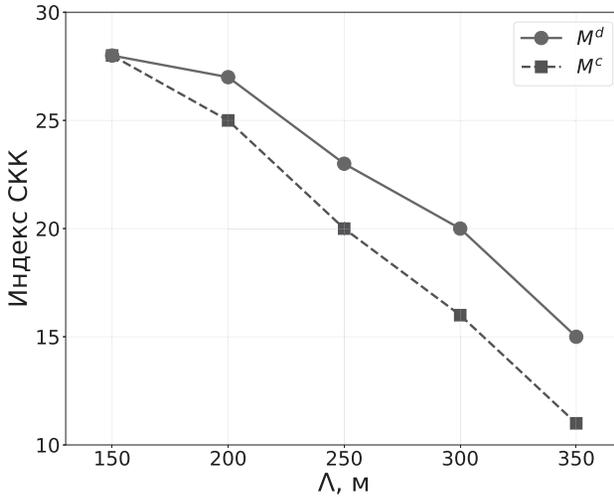


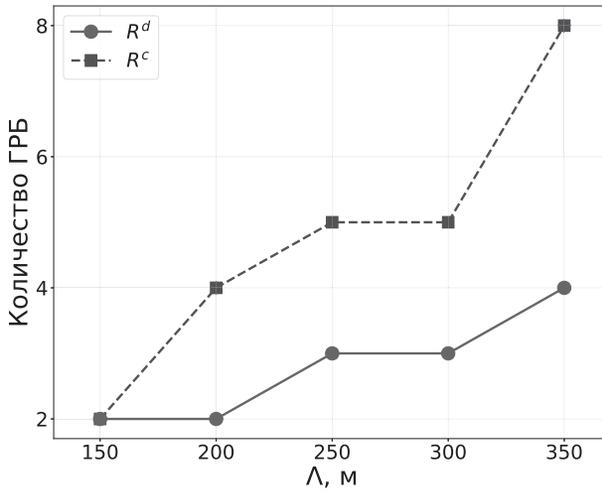
Рис. 3. Емкость сети,  $P^{QoS} = 0,99$

При  $r > 250$  м значения  $p^e$  резко возрастают, поскольку эти пользователи имеют такие значения ОСШИ, которые не позволяют обеспечить низкую вероятность потери пакета даже при использовании выделенных ресурсов при заданных СКК.

Также важно отметить, что значения вероятности потери пакета, полученные с помощью аналитической модели с точной оценкой интерференции и с приближенной оценкой интерференции, совпадают с высокой точностью. Поскольку модель с приближенной оценкой интерференции обладает существенно более низкой вычислительной сложностью, используем ее далее для определения емкости сети.



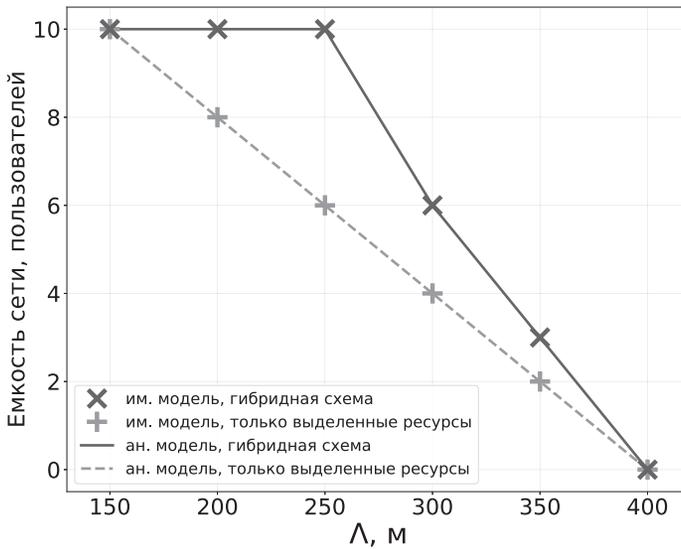
а) СКК



б) количество ГРБ

Рис. 4. Оптимальные параметры гибридной схемы,  $P^{QoS} = 0,99$

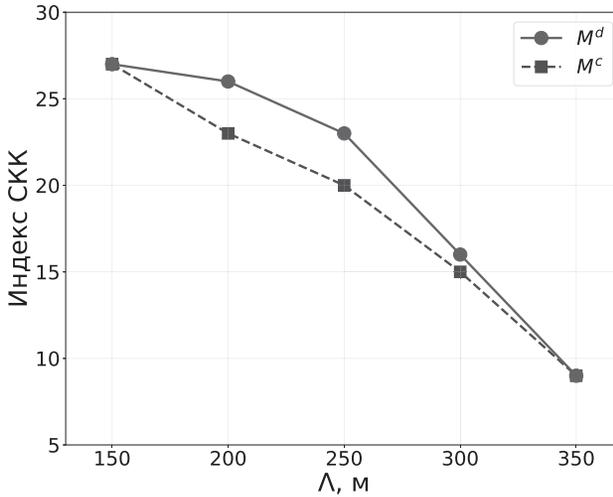
**5.3. Выбор оптимальных параметров.** В данном пункте аналитическая модель используется для определения оптимальных параметров гибридной схемы  $R^d$ ,  $M^d$  и  $M^c$ , обеспечивающих максимальную емкость сети. В экспериментах варьируется размер главной диагонали соты  $\Lambda$ . Для каждого  $\Lambda$  оптимальные параметры схемы находятся полным перебором. А именно, для каждой комбинации параметров гибридной схемы емкость сети определяется следующим образом. Количество пользователей  $N$  увеличивается, начиная с одного. Для каждого значения  $N$  проводится такое количество  $k$  независимых экспериментов с разным расположением пользователей в соте, что  $kN \geq 500$ , что позволяет оценить необходимую долю неудовлетворенных пользователей на уровне 1%. В каждом эксперименте для каждого пользователя определяется вероятность потери пакета. Если эта вероятность превышает  $1 - P^{QoS}$ , то пользователь считается неудовлетворенным. По итогам всех прогонов

Рис. 5. Емкость сети,  $P^{QoS} = 0,9999$ 

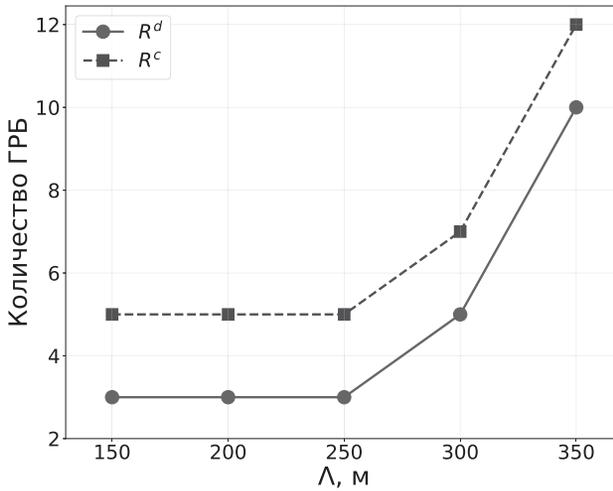
доля неудовлетворенных пользователей определяется как отношение суммарного числа неудовлетворенных пользователей во всех прогонах к суммарному числу всех пользователей во всех прогонах  $kN$ . Согласно определению из § 3 максимальное значение  $N$ , при котором доля неудовлетворенных пользователей не превышает 1%, соответствует емкости сети. Далее находится оптимальный набор параметров, обеспечивающий наибольшую емкость сети. Для сравнения также рассматривается схема с использованием только выделенных ресурсов ( $R^s = 0$ ) [13–16].

На рис. 3 представлены зависимости емкости сети при использовании оптимальных параметров для уровня надежности  $P^{QoS} = 0,99$ . Заметим, что значения емкости, полученные с помощью аналитического и имитационного моделирования, совпадают во всех точках. Результаты показывают, что гибридная схема позволяет повысить емкость сети до 65% по сравнению со схемой, использующей только выделенные ресурсы. На рис. 4 приведены значения оптимальных параметров схемы в зависимости от  $\Lambda$ , определенных с помощью аналитической модели. При всех значениях  $\Lambda$  индексы оптимальных СКК  $M^d$  и  $M^c$  различаются менее чем на 5. Абсолютные значения СКК уменьшаются с ростом  $\Lambda$ , поскольку для обеспечения необходимой вероятности успешной доставки  $P^{QoS}$  пользователям с более высокими значениями  $r$  требуются более робастные СКК. Однако при использовании более робастных СКК каждому пользователю приходится назначать больше канальных ресурсов, т.е. высокие значения  $R^d$  и  $R^c$ , что, в свою очередь, приводит к снижению емкости сети с ростом  $\Lambda$ . Емкость сети достигает 0 при  $\Lambda = 400$  м, поскольку в этом случае пользователи с высокими  $r$  имеют настолько низкие значения ОСШИ, что они не позволяют выполнить требование на надежность доставки данных.

На рис. 5 и 6 представлены аналогичные результаты для случая высокого уровня надежности  $P^{QoS} = 0,9999$ . Результаты показывают, что в этом случае гибридная схема обеспечивает прирост емкости до 65% по сравнению со схемой назначения всем пользователям только выделенных канальных ресурсов. Переход к более строгому ограничению на надежность приводит к увеличению количества используемых ГРБ и, как следствие, существенному снижению емкости сети по сравнению со случаем  $P^{QoS} = 0,99$  (например, при  $\Lambda = 150$  м емкость снижается на 40%).



а) СКК



б) количество ГРБ

Рис. 6. Оптимальные параметры гибридной схемы,  $P^{QoS} = 0,9999$

### § 6. Заключение

В статье рассмотрена задача назначения радиоресурсов при обслуживании восходящего трафика удаленного управления транспортными средствами в сетях 5G V2X с помощью метода Grant-Free. Ключевыми особенностями данного типа трафика являются переменный размер генерируемых пакетов и строгие требования к задержке и надежности доставки. Для обслуживания данного типа трафика в статье используется гибридная схема назначения канальных ресурсов, согласно которой каждому пользователю назначается как выделенный подканал, так и общий подканал, который используется, когда выделенных ресурсов оказывается недостаточно для передачи пакета. Для исследования эффективности гибридной схемы разработана аналитическая модель, которая позволяет оценить вероятность потери пакета

для каждого пользователя при заданных параметрах схемы. Сравнение результатов, полученных с помощью разработанной аналитической модели и имитационной модели в среде ns-3, показывает высокую точность аналитической модели. В статье показано, как с помощью аналитической модели выбирать оптимальные параметры схемы, обеспечивающие максимальную емкость сети. Результаты показывают, что гибридная схема с оптимальными параметрами позволяет увеличить емкость сети до 65% по сравнению со схемой назначения всем пользователям только выделенных ресурсов.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть задачу назначения разным пользователям разных параметров гибридной схемы в зависимости от их канальных условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Parekh D., Poddar N., Rajpurkar A., Chahal M., Kumar N., Joshi G.P., Cho W.* A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges // *Electronics*. 2022. V. 11. № 14. P. 2162 (188 pp.). <https://doi.org/10.3390/electronics11142162>
2. *Belogaev A., Elokhin A., Krasilov A., Khorov E., Akyildiz I.F.* Cost-Effective V2X Task Offloading in MEC-Assisted Intelligent Transportation Systems // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 169010–169023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023263>
3. *Yan J., Härri J.* On the Feasibility of URLLC for 5G-NR V2X Sidelink Communication at 5.9 GHz // *Proc. 2022 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM 2022)*. Rio de Janeiro, Brazil. Dec. 4–8, 2022. P. 3599–3604. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000606>
4. *Liopoulos C., Iossifides A., Foh C.H., Chatzimisios P.* IEEE 802.11BD for Next-Generation V2X Communications: From Protocol to Services // *IEEE Commun. Stand. Mag.* 2025. V. 9. № 2. P. 88–98. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2025.3569015>
5. *Torgunakov V., Loginov V., Khorov E.* A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks // *IEEE Access*. 2022. V. 10. P. 25514–25533. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3155814>
6. *Garcia M.H.C., Molina-Galan A., Boban M., Gozalvez J., Coll-Perales B., Şahin T.* A Tutorial on 5G NR V2X Communications // *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2021. V. 23. № 3. P. 1972–2026. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3057017>
7. *Bankov D., Khorov E., Krasilov A., Otmakhov A.* Analytical Model of 5G V2X Mode 2 for Sporadic Traffic // *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2023. V. 12. № 8. P. 1449–1453. <https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3278181>
8. Service Requirements for Enhanced V2X Scenarios: 5G (3GPP Tech. Specification TS-22.186; version 19.0.0, Release 19), Oct. 2025.
9. NR; Physical Layer Procedures for Data: 5G (3GPP Tech. Specification TS-38.214), 2021.
10. NR; Medium Access Control (MAC) Protocol Specification: 5G (3GPP Tech. Specification TS-38.321), 2021.
11. *Шагин А.Э., Красилов А.Н.* Анализ эффективности метода Grant-Free для обслуживания XR-трафика // Сб. трудов 48-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы» (ИТиС 2024). Воронеж, Москва, 16–20 сентября 2024. М: ИППИ РАН, 2024. С. 413–420. [https://doi.org/10.53921/itas2024\\_413](https://doi.org/10.53921/itas2024_413)
12. *Шагин А.Э., Красилов А.Н.* Гибридная схема назначения канальных ресурсов для обслуживания XR-трафика в восходящем канале в сетях 5G // Тр. 67-й Всеросс. научной конф. МФТИ «Радиотехника и компьютерные технологии» (Москва 2025). С. 265–267.
13. *Kim K.S., Kim D.K., Chae C.B., Choi S., Ko Y.-C., Kim J.* Ultrareliable and Low-Latency Communication Techniques for Tactile Internet Services // *Proc. IEEE*. 2019. V. 107. № 2. P. 376–393. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2868995>
14. *Stafidas E., Foukalas F.* A Survey on Enabling XR Services in Beyond 5G Mobile Networks // *IEEE Access*. 2024. V. 12. P. 59170–59197. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3392509>

15. *Gunturu A., Tijoriwala V.S., Reddy Chavva A.K.* Optimal Configured Grant Selection Method for NR Rel-16 Uplink URLLC // Proc. 2020 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM 2020). Taipei, Taiwan. Dec. 7–11, 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322288>
16. *Zhang T., Hu X.S., Han S.* Contention-Free Configured Grant Scheduling for 5G URLLC Traffic // Proc. 60th ACM/IEEE Design Automation Conf. (DAC 2023). San Francisco, CA. July 9–13, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DAC56929.2023.10247842>
17. *Korneev E., Lyubogoshchev M., Bankov D., Khorov E.* How to Model Cloud VR: An Empirical Study of Features That Matter // IEEE Open J. Commun. Soc. 2024. V. 5. P. 4155–4170. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3409472>
18. *Zhang Y., Tang W., Liu Y.* Multicell Grant-Free Uplink IoT Networks With Hard Deadline Services in URLLC // IEEE Wirel. Commun. Lett. 2022. V. 11. № 7. P. 1448–1452. <https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3173471>
19. *Shashin A., Belogaev A., Krasilov A., Khorov E.* Adaptive Parameters Selection for Uplink Grant-Free URLLC Transmission in 5G Systems // Comput. Netw. 2023. V. 222. P. 109527. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109527>
20. *Liu Y., Deng Y., Elkaslan M., Nallanathan A., Karagiannidis G.K.* Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service // IEEE J. Select. Areas Commun. 2021. V. 39. № 3. P. 741–755. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3018822>
21. *Berardinelli G., Mahmood N.H., Abreu R., Jacobsen T., Pedersen K., Kovács I.Z.* Reliability Analysis of Uplink Grant-Free Transmission Over Shared Resources // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 23602–23611. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2827567>
22. URLLC System Level Simulation Assumptions. 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting № 86. Gothenburg, Sweden. Aug. 22–26, 2016. Rep. R1-166398.
23. *Lagen S., Wanuga K., Elkotby H., Goyal S., Particiello N., Giupponi L.* New Radio Physical Layer Abstraction for System-Level Simulations of 5G Networks // Proc. 2020 IEEE Int. Conf. on Communications (ICC 2020). Dublin, Ireland. June 7–11, 2020. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149444>
24. *Lu B., Yue G., Wang X.* Performance Analysis and Design Optimization of LDPC-Coded MIMO OFDM Systems // IEEE Trans. Signal Process. 2004. V. 52. № 2. P. 348–361. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.820991>
25. *Hareedy A., Amiri B., Galbraith R., Dolecek L.* Non-Binary LDPC Codes for Magnetic Recording Channels: Error Floor Analysis and Optimized Code Design // IEEE Trans. Commun. 2016. V. 64. № 8. P. 3194–3207. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2574869>
26. Network Simulator 3 (ns-3). <https://www.nsnam.org/>.
27. *Hata M.* Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services // IEEE Trans. Veh. Technol. 1980. V. 29. № 3. P. 317–325. <https://doi.org/10.1109/T-VT.1980.23859>
28. LTE System Toolbox 5G Library. MATLAB User Community. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/61585-lte-system-toolbox-5g-library>.
29. Study on XR (Extended Reality) Evaluations for NR: 5G (3GPP Tech. Rep. TR-38.838), 2021.

---

---

**ANALYTICAL MODEL OF A HYBRID RADIO RESOURCE ALLOCATION SCHEME FOR SERVING REMOTE CONTROL TRAFFIC IN 5G V2X NETWORKS**

© 2025 N.A. Nikolaev<sup>a,b</sup>, A.E. Shashin<sup>a</sup>, A.N. Krasilov<sup>a</sup>, E.M. Khorov<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> *Kharkevich Institute for Information Transmission Problems  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>b</sup> *Moscow Independent Research Institute of Artificial Intelligence  
E-mail: nikolaev@wnlab.ru, shashin@wnlab.ru, krasilov@wnlab.ru,  
khorov@wnlab.ru*

We consider a scenario of data transmission in the uplink channel in a 5G Vehicle-to-Everything (V2X) network with remote vehicle control. The key features of this type of traffic are the variable size of generated packets and strict restrictions on packet delivery time. To serve the traffic of different users, the base station uses a hybrid radio resource allocation scheme: each user is assigned both a dedicated subchannel and a shared subchannel, which is used when there are insufficient resources in the dedicated channel to transmit a packet. We construct an analytical model of data transmission in the uplink channel using this scheme, which allows us to estimate the probability of packet loss for each user at given scheme parameters. We show how to use the analytical model to select the optimal parameters of the hybrid scheme that maximize network capacity.

*Keywords:* 5G V2X, Grant-Free, remote control, hybrid scheme, analytical model

**DOI:** 10.7868/S3034583925030039

Received 06.11.2025

Revised 18.11.2025

Accepted 20.11.2025

---

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FFNU-2025-0030.