

## Выбор начальных параметров обслуживания восходящего URLLC-трафика при высокой мобильности пользователей<sup>1</sup>

А.Э. Шашин<sup>\*,\*\*</sup>, А.Н. Красилов<sup>\*,\*\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup> *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

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

Поступила в редколлегию 27.03.2023 г.

**Аннотация**—Сотовые сети пятого поколения предоставляют новый сервис сверхнадежной связи с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC). Во многих сценариях использования сервиса URLLC (например, в интеллектуальных транспортных системах) пользователи движутся с высокой скоростью и передают данные в восходящем канале. Базовая станция должна назначать пользователям параметры передачи, которые позволят выполнить строгие требования URLLC-приложений к качеству обслуживания и при этом потребляют наименьший объем канальных ресурсов. При высокой скорости движения пользователи часто меняют обслуживающую базовую станцию. Задача выбора параметров в этом случае осложняется тем, что при подключении нового пользователя у базовой станции отсутствуют измерения качества канала для рассматриваемого пользователя. В данной работе предложены различные методы выбора начальных параметров передачи при подключении пользователя к базовой станции. С помощью имитационного моделирования проведено сравнение рассматриваемых методов при различных скоростях движения пользователей. Даны рекомендации по выбору начальных параметров, обеспечивающих низкий объем потребляемых канальных ресурсов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сотовые сети, 5G, URLLC, восходящий канал, сигнально-кодированная конструкция, высокая мобильность.

DOI: 10.53921/18195822\_2023\_23\_2\_220

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сотовые сети пятого поколения (5G) предоставляют новый сервис сверхнадежной связи с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC). Такой сервис необходим для множества современных приложений, требующих доставку данных с задержкой порядка 1 мс и надежностью не менее 99,999% [1–3]. Во многих сценариях использования сервиса URLLC пользователи передают данные в восходящем канале. Для обеспечения низкой задержки при передаче данных в восходящем канале спецификации сетей 5G [4, 5] вводят метод доступа к каналу без запроса полосы (англ.: grant-free). Согласно этому методу базовая станция заранее конфигурирует частотно-временные ресурсы и параметры передачи, такие как сигнально-кодированная конструкция (СКК) и количество попыток передачи. При появлении данных пользователь осуществляет их передачу с использованием выделенных частотно-временных ресурсов и сконфигурированных параметров. Для увеличения надежности пользователь может осуществить несколько попыток передачи одного пакета данных. Чтобы обеспечить низкую задержку пользователь может не дожидаться подтверждения доставки каждой попытки от базовой станции, а выполнить несколько безусловных попыток передачи [6, 7].

<sup>1</sup> Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

При назначении частотно-временных ресурсов необходимо учитывать тип обслуживаемого трафика. В работе [8] показано, что в случае когда пользователи генерируют строго периодический трафик, каждому пользователю следует выделять ортогональные частотно-временные ресурсы так, чтобы передачи разных пользователей не интерферировали. В случае аperiodического трафика эффективным является использование общих канальных ресурсов, так как резервирование ресурсов для каждого пользователя приводит к низкому коэффициенту их использования.

Большое количество сценариев использования сервиса URLLC (например, интеллектуальные транспортные системы и автономный транспорт) предполагает наличие в сети пользователей с высокой мобильностью [9]. В таких сценариях при назначении параметров передачи базовая станция должна учитывать следующие особенности. Во-первых, расстояние между пользователем и базовой станцией значительно меняется со временем, а, значит, средняя мощность сигнала на базовой станции от пользователя также будет значительно меняться со временем. Во-вторых, при подключении нового пользователя у базовой станции отсутствуют измерения качества канала для данного пользователя, что осложняет задачу выбора начальных параметров передачи. Отметим, что базовая станция должна назначать пользователям параметры передачи, которые, с одной стороны, позволят удовлетворить строгие требования URLLC-приложений к качеству обслуживания, а, с другой стороны, потребляют наименьший объем канальных ресурсов. Чем меньший объем канальных ресурсов выделяется на обслуживание каждого пользователя, тем больше емкость сети. В данной работе используется определение емкости сети согласно спецификации [10]. Емкость сети – максимальная нагрузка, при которой требования к качеству обслуживания удовлетворены для 99% пользователей/потоков.

В работе [8] авторами был предложен адаптивный алгоритм выбора параметров передачи, позволяющий существенно уменьшить потребление канальных ресурсов при выполнении требований к качеству обслуживания по сравнению с другими существующими решениями. Однако в работе [8] этот алгоритм исследовался только в сценариях с низкой мобильностью и задача выбора начальных параметров передачи не рассматривалась. В данной работе показано, что при высокой мобильности пользователей выбор начальных параметров оказывает существенное влияние на объем потребляемых канальных ресурсов. Предложены различные методы выбора начальных параметров и проведено их сравнение при различной скорости движения пользователей. На основе проведенного исследования даны рекомендации по выбору начальных параметров.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлено современное состояние исследований по теме выбора параметров передачи URLLC-данных в восходящем канале при использовании метода grant-free. В разделе 3 дано краткое описание рассматриваемого алгоритма выбора параметров передачи. В разделе 4 описаны предлагаемые методы выбора начальных параметров передачи. В разделе 5 представлены результаты исследования эффективности различных методов выбора начальных параметров в сценарии с высокой мобильностью пользователей. В разделе 6 резюмируются основные результаты работы.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В литературе представлено множество работ, посвященных разработке алгоритмов выбора параметров передачи (количества попыток передачи и СКК) для метода grant-free. Распространенным подходом является назначение фиксированных параметров всем пользователям независимо от их положения относительно базовой станции и скорости движения. Конкретные параметры передачи могут быть выбраны с использованием аналитических или имитационных моделей.

В работах [6, 11, 12] представлены аналитические модели, которые оценивают вероятность потери пакета при заданных параметрах передачи. Однако при построении данных моделей, как правило, используется упрощенная модель ошибок, согласно которой пакет считается потерянным если среднее отношение сигнал-шум (англ: Signal to Noise Ratio, SNR) на приемнике оказывается ниже некоторого порогового значения. Такие модели не соответствуют реальным зависимостям вероятности потери пакета от SNR на приемнике для разных СКК. Отметим, что при рассмотрении сценариев с URLLC-трафиком необходимо учитывать вероятности потери пакета порядка  $10^{-5}$ , что невозможно при использовании пороговых моделей. Кроме того, в работах [6, 11, 12] рассматривается плоский по частоте канал, тогда как реальные каналы подвержены частотно-селективным замираниям.

В работах [13, 14] выбор параметров передачи осуществляется с использованием имитационного моделирования. Имитационные модели позволяют точнее оценить вероятность потери пакетов, поскольку в них используются реалистичные модели канала и ошибок. Однако оценка вероятности потери пакета с заданной точностью для всех возможных конфигураций параметров передачи занимает значительное время, поэтому имитационные модели не могут быть использованы для выбора параметров в режиме реального времени.

В упомянутых выше работах вне зависимости от расположения пользователя предлагается выбирать одни и те же параметры передачи. Однако пользователи могут находиться на существенно разных расстояниях от базовой станции, поэтому единые параметры обычно соответствуют пользователю с наихудшими канальными условиями (т.е. пользователю находящемуся на границе соты). Заметим, что такой подход приводит к неэффективному использованию канальных ресурсов остальными пользователями, что ограничивает емкости сети. По этой причине в работах [8, 15, 16] предлагаются адаптивные алгоритмы, которые выбирают параметры передачи для каждого пользователя в зависимости от его текущих канальных условий.

Авторы работы [15] предлагают адаптивно выбирать СКК для каждого пользователя, используя набор пороговых значений для мощности принимаемого сигнала: чем меньше мощность, тем более робастная выбирается СКК. Однако авторы не предлагают способ выбора этих пороговых значений, а также алгоритм выбора количества попыток передачи. Кроме того, авторы проводили исследование только в сценарии с низкой мобильностью пользователей.

В работе [16] предлагается адаптивно выбирать количество попыток передачи в зависимости от измеренной на базовой станции временной корреляции приходящего от пользователя сигнала. Количество попыток передачи предлагается уменьшать в случае низкой корреляции (т.е. при высокой скорости движения пользователя). При этом всем пользователям предлагается использовать одну и ту же СКК, что является существенным недостатком предлагаемого алгоритма. Кроме того, в случае, когда все пользователи имеют одинаковую скорость, согласно данному алгоритму всем пользователям будет назначено одинаковое количество попыток передачи и СКК. Следовательно в этом случае данный алгоритм будет назначать всем пользователям одинаковые параметры передачи, что соответствует подходу с фиксированным выбором параметров.

Ранее авторами данной работы был предложен адаптивный алгоритм совместного выбора СКК и количества попыток передачи в зависимости от канальных условий пользователя [8]. Краткое описание этого алгоритма приведено в разделе 3. При этом, во-первых, эффективность алгоритма была исследована только в сценарии с низкой мобильностью пользователей, а, во-вторых, не рассматривалась задача выбора начальных параметров при присоединении пользователя к базовой станции. В данной работе предложены различные методы выбора начальных параметров и проведено исследование алгоритма из работы [8] с использованием данных методов в зависимости от скорости движения пользователей.

## 3. АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ

Рассмотрим основные принципы работы алгоритма совместного выбора СКК и количества попыток передачи, предложенного ранее авторами в работе [8]. Алгоритм выбирает параметры передачи независимо для каждого пользователя. В основе алгоритма лежит периодическое измерение канальных условий с использованием двух типов пилотных сигналов: (а) Sounding Reference Signals (SRSs), которые используются для оценки мощности принимаемого сигнала, и (б) DeModulation Reference Signals (DMRS), которые используются для оценки интерференции. На основе этих пилотных сигналов базовая станция оценивает отношение сигнал к интерференции плюс шум для пользователя в каждом ресурсном блоке. Далее на базе этих измерений базовая станция оценивает вероятность потери пакета  $PLP_{M,K}(t)$  для каждой комбинации параметров  $\{M, K\}$ , где  $M$  – индекс СКК,  $K$  – количество попыток передачи,  $t$  – момент времени получения SRS.

При получении каждого пилотного сигнала SRS базовая станция осуществляет усреднение вероятности потери пакета методом экспоненциального скользящего среднего для каждой комбинации параметров:

$$\widehat{PLP}_{M,K}(t) = \frac{1}{w} PLP_{M,K}(t) + \left(1 - \frac{1}{w}\right) \widehat{PLP}_{M,K}(t - T_{SRS}),$$

где  $T_{SRS}$  – период отправки пилотных сигналов SRS пользователем,  $W$  – окно усреднения в секундах, а  $w = \frac{W}{T_{SRS}}$  – окно усреднения, измененное в периодах SRS.

На основе оценок вероятности потери пакета  $\widehat{PLP}_{M,K}(t)$  базовая станция осуществляет выбор параметров передачи. Чтобы избежать эффекта частого переключения, при выборе параметров используется гистерезисный подход с пороговыми значениями  $PLP_{low}$  и  $PLP_{high}$  ( $PLP_{low} \leq PLP_{high}$ ) следующим образом.

- Изначально все конфигурации параметров помечаются как неподходящие.
- Если в момент времени  $t$  оценка  $\widehat{PLP}_{M,K}(t)$  конфигурации  $\{M, K\}$  становится ниже порога  $PLP_{low}$ , она помечается *подходящей*.
- Если в момент времени  $t$  оценка  $\widehat{PLP}_{M,K}(t)$  подходящей конфигурации  $\{M, K\}$  становится выше порога  $PLP_{high}$ , она помечается *неподходящей*.
- Для всех подходящих конфигураций определяется количество используемых Групп Ресурсных Блоков (ГРБ)  $R_M \cdot K$ , где  $R_M$  – количество используемых ГРБ для передачи пакета с использованием СКК  $M$ .
- Среди подходящих выбирается конфигурация, обеспечивающая минимальное потребление канальных ресурсов. При этом если две конфигурации обеспечивают одинаковое потребление канальных ресурсов, то выбирается та, которая использует меньшее количество попыток передачи.

Эффективность разработанного алгоритма определяется его параметрами:  $W$ ,  $PLP_{low}$  и  $PLP_{high}$ . В работе [8] предложен способ выбора этих параметров для сценария с низкой мобильностью пользователей. При этом так как пользователи на протяжении всего эксперимента остаются подключенными к одной базовой станции, проблема выбора параметров на начальном этапе (т.е., в первые  $W$  секунд, когда у базовой станции нет достаточного количества измерений) не рассматривалась. В данной работе показано, что при высокой мобильности длительность окна усреднения  $W$  оказывается сравнимой со временем нахождения пользователя в зоне покрытия базовой станции. Далее предлагаются различные методы выбора начальных параметров при подключении пользователя к базовой станции.

## 4. ВЫБОР НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В данной работе предлагаются следующие методы выбора начальных параметров передачи (СКК и количества попыток передачи) при подключении пользователя к базовой станции.

## 4.1. Общие начальные параметры

Простым способом решения задачи выбора начальных параметров является назначение новым пользователям одинаковых фиксированных параметров. Поскольку новые пользователи могут иметь различные скорости движения и каналные условия, назначаемые им параметры должны быть выбраны достаточно надежно, чтобы обеспечивать выполнение строгих требований к качеству обслуживания. В качестве таких параметров могут быть использованы самые робастные параметры: СКК с минимальной кодовой скоростью и модуляций (СКК с индексом 0) и максимальное количество попыток передачи, определяемое требованием на задержку.

## 4.2. Статистический анализ

Идея данного метода заключается в том, чтобы использовать результаты работы адаптивного алгоритма выбора параметров передачи, которые были получены на других пользователях в предыдущие моменты времени. Предварительные исследования показали, что выбираемые параметры передачи существенно зависят от среднего затухания сигнала (англ.: Path Loss, PL) до рассматриваемого пользователя и его скорости движения. Разобьем возможный диапазон значения затухания сигнала на интервалы:  $[0, \overline{PL}_1), [\overline{PL}_1, \overline{PL}_2), \dots, [\overline{PL}_n, +\infty)$ , где  $\overline{PL}_i$  набор пороговых значений затухания, определяющих гранулярность разбиения. Аналогично разобьем возможный диапазон скоростей движения пользователя на интервалы:  $[0, \overline{V}_1), [\overline{V}_1, \overline{V}_2), \dots, [\overline{V}_n, +\infty)$ .

В процессе работы алгоритма, описанного в разделе 3, при получении пилотного сигнала SRS от некоторого пользователя базовая станция оценивает затухание  $PL$  и скорость движения  $V$  и определяет соответствующие им интервалы  $\mathcal{PL}_i = [\overline{PL}_{i-1}, \overline{PL}_i)$  и  $\mathcal{V}_j = [\overline{V}_{j-1}, \overline{V}_j)$ . После обновления оценок вероятности потери пакета алгоритм выбирает текущие параметры  $(M, K)$  и добавляет их в статистику, соответствующую интервалам  $\mathcal{PL}_i$  и  $\mathcal{V}_j$ . Таким образом, в процессе работы алгоритма на базовой станции для каждой пары интервалов  $\mathcal{PL}_i$  и  $\mathcal{V}_j$  будет собрана выборка конфигураций параметров. Из полученной выборки определяются параметры  $(M_{ij}, K_{ij})$ , которые будут использоваться в качестве начальных для новых пользователей. В работе сравниваются два подхода. Первый подход заключается в выборе самых робастных параметров. Для этого все найденные конфигурации параметров сортируются в порядке объема потребляемых каналных ресурсов. В качестве  $(M_{ij}, K_{ij})$  выбирается конфигурация, обеспечивающая максимальное потребление каналных ресурсов. Второй подход заключается в том, чтобы выбрать квантиль выборки по объему потребляемых каналных ресурсов. В частности, следуя определению емкости сети, данному в разделе 1, предлагается выбирать ту конфигурацию, которая соответствует  $\alpha = 0,99$  квантилю выборочного распределения потребляемых каналных ресурсов. Отметим, что в обоих подходах возможно ситуация, при которой две конфигурации СКК и количества попыток передачи обеспечивают одинаковое потребление каналных ресурсов. В этом случае выбирается та конфигурация, которая имеет наибольшую вероятность.

При подключении нового пользователя базовая станция оценивает его текущую скорость и среднее затухание сигнала и определяет пару интервалов  $\mathcal{PL}_i$  и  $\mathcal{V}_j$ . Для найденной пары интервалов выбираются начальные параметры  $(M_{ij}, K_{ij})$  согласно собранной статистике. Отметим, что при подключении пользователя затухание сигнала можно достаточно точно оценить по первым пилотным сигналам, которые передаются как в нисходящем, так и в восходящем ка-

Таблица 1. Основные параметры моделирования

Параметр	Значение
Несущая частота	2 ГГц
Расстояние между поднесущими	15 кГц
Ширина канала	50 МГц, 16 ГРБ
Длительность мини-слота	142,8 мкс
Размер пакета	32 байта
Интенсивность генерации пакетов	100 пакетов/с
Период пилотных сигналов SRS	5 мс
Мощность пользовательского устройства	23 дБм
Высота пользовательского устройства	1,5 м
Высота базовой станции	30 м
Скорость движения пользователей	{3, 60} км/ч
$PLP_{high}$	$10^{-6}$
$PLP_{low}$	$10^{-10}$

налах. Оценка скорости движения пользователя является более сложной задачей. Для оценки скорости могут использоваться следующие подходы: (а) оценка Доплеровского смещения частоты по первым пилотным сигналам, (б) использование специальных пилотных сигналов для оценки координаты пользователя (англ: Positioning Reference Signals). В связи с этим в работе исследуется два крайних случая. В первом случае на базовой станции имеется достаточно точная оценка скорости движения пользователя, поэтому весь диапазон скоростей можно разделить на интервалы с большой гранулярностью, т.е.  $(1 - \bar{V}_{j-1}/\bar{V}_j) \ll 1$ . Во втором случае, наоборот, базовая станция не различает скорости движения пользователей, что соответствует отсутствию разбиения по скоростям.

#### 4.3. Использование двойного подключения

Спецификации 3GPP предусматривают возможность одновременного подключения пользователя к двум базовым станциям (англ.: Dual Connectivity, DC). Если пользователь находится близко к границе обслуживания рассматриваемой базовой станции, то он может быть заранее подключен к новой базовой станции. Для этого соседние базовые станции должны работать в разных частотных каналах, а пользователь должен иметь не менее двух радиointерфейсов. Предполагается, что за время  $W$  до предполагаемой процедуры переключения между базовыми станциями, пользователь подключается вторым радиointерфейсом к новой базовой станции и начинает отправлять пилотные сигналы. Таким образом, к моменту переключения новая базовая станция будет иметь достаточное количество измерений для выбора параметров передачи, а выбранное начальное значение будет соответствовать текущим канальным условиям.

## 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 5.1. Описание сценария

Для исследования предложенных методов назначения начальных параметров используется среда имитационного моделирования NS-3 [17]. Значения параметров, используемых при моделировании, представлены в Таблице 1.

В работе рассматривается сценарий Urban Macro, описанный в спецификации [18]. Пользователь случайным образом перемещается в шестиугольной соте, а базовая станция располагается в одном из углов этого шестиугольника. Размер соты соответствует расстоянию между соседними базовыми станциями в 500 м. Используется следующая модель мобильности.

Пользователь движется по прямой с постоянной скоростью  $v$ . При достижении границы соты, вектор скорости меняется случайным образом так, чтобы пользователь двигался внутрь соты. Рассматриваются две скорости движения, характерные для городских сценариев: (а)  $v = 3$  км/ч, соответствующая движению автомобиля в пробке, и (б)  $v = 60$  км/ч – типичное ограничение скорости движения в городе.

В рассматриваемом сценарии пользователи строго периодически генерируют пакеты размером 32 байта каждые 10 мс. Как отмечено в разделе 1, в этом случае каждому пользователю можно выделить каналные ресурсы так, чтобы они не пересекались с ресурсами других пользователей. В связи с этим при моделировании пользователей можно рассматривать независимо.

Для назначения параметров передачи базовая станция использует адаптивный алгоритм, описанный в разделе 3. Параметры  $PLP_{high}$  и  $PLP_{low}$  являются фиксированными и равными  $PLP_{high} = 10^{-6}$ ,  $PLP_{low} = 10^{-10}$  [8], а значение параметра  $W$  варьируется в экспериментах. При достижении границы соты пользователь продолжает движение в случайном направлении внутри соты. При этом накопленная статистика вероятностей потери пакета сбрасывается, и алгоритм начинает работу с фазы обучения. Базовая станция назначает пользователю начальные параметры в соответствии с рассматриваемым методом назначения начальных параметров.

Рассматриваются следующие требования к доставке URLLC-пакетов: пакеты должны быть доставлены в течение интервала времени 1 мс с вероятностью не менее 99,999%. Длительность эксперимента составляет  $10^4$  секунд. За это время каждый пользователь передает  $10^6$  пакетов. Количество независимых прогонов модели равно 500. Если по результатам прогона доля потерянных пакетов для пользователя превышает  $10^{-5}$ , такой пользователь считается неудовлетворенным. По результатам всех прогонов оценивается доля неудовлетворенных пользователей.

### 5.2. Анализ численных результатов

На рис. 1 показана доля неудовлетворенных пользователей в зависимости от окна усреднения  $W$  при использовании рассматриваемых методов выбора начальных параметров в случае, когда пользователь движется со скоростью 3 км/ч. Результаты показывают, что доля неудовлетворенных пользователей растет с уменьшением  $W$ . При  $W = 1,5$  с доля неудовлетворенных пользователей для всех решений, кроме использования механизма двойного подключения, превышает 1%. В соответствии с определением емкости сети, представленном в разделе 1, можно заключить, что минимальное значение  $W$ , при котором выполнены строгие требования к качеству обслуживания, составляет 2 с. Отметим, что в случае движения со скоростью 60 км/ч доля неудовлетворенных пользователей не превышает 1% для всех рассматриваемых методов выбора начальных параметров и значениях  $W \in [1, 10]$  с. Это объясняется тем, что при движении с более высокой скоростью канал в частотной и временной областях становится менее скоррелированным. За счет этого увеличивается вероятность успешной доставки пакета, что согласуется с результатами работы [16]. Таким образом, минимальное значение  $W$ , при котором все рассматриваемые методы выбора начальных параметров удовлетворяют требованию к доле неудовлетворенных пользователей при всех рассматриваемых значениях скоростей, составляет 2 с.

На рис. 2 представлено среднее число используемых для передачи URLLC-пакета ГРБ в зависимости от  $W$  при движении пользователя со скоростью 3 км/ч. Результаты показывают, что использование алгоритма статистического анализа со значениями  $\alpha = 0,99$  и 1 позволяет достичь такого же потребления каналных ресурсов, как и использование механизма двойного подключения, при значениях  $W \leq 5$  с. При этом использование самых надежных фиксиро-

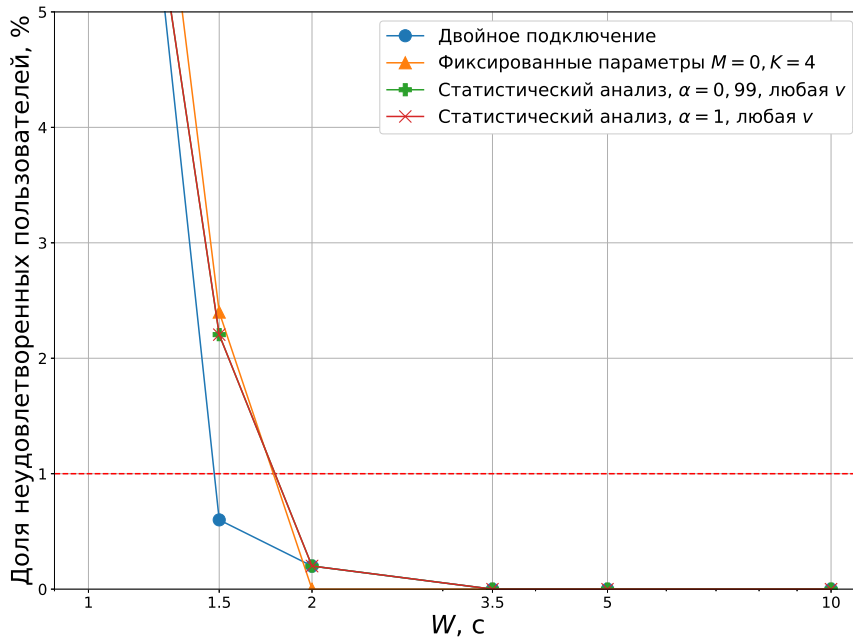


Рис. 1. Доля неудовлетворенных пользователей для различных методов выбора начальных параметров при скорости движения пользователя  $v = 3$  км/ч.

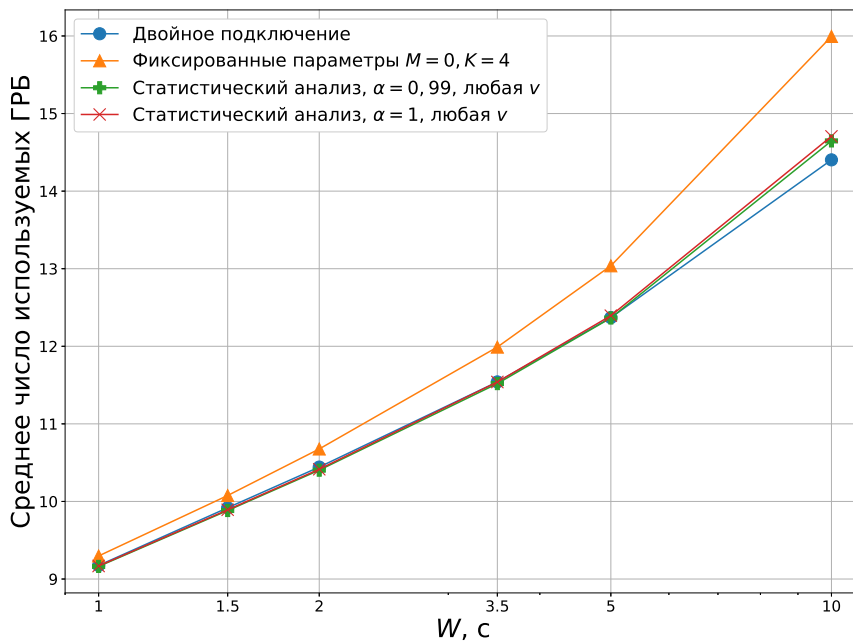
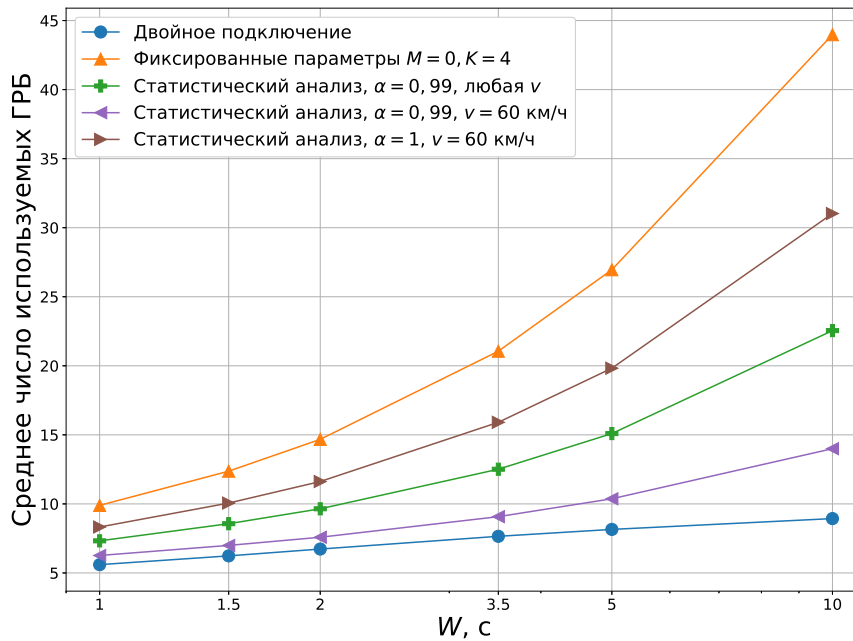


Рис. 2. Среднее число потребляемых ГРБ при использовании различных методов выбора начальных параметров и скорости движения пользователя  $v = 3$  км/ч.

ванных параметров ( $M = 0, K = 4$ ) в качестве начальных обеспечивает не более чем на 5% большее потребление канальных ресурсов. Это объясняется тем, что при движении с низкой скоростью фаза обучения (интервал времени длительностью  $W$  после подключения пользователя к базовой станции) составляет малую часть общего времени движения пользователя в соте. Таким образом, при движении пользователя с низкой скоростью способ выбора начальных параметров оказывает незначительное влияние на объем потребляемых канальных ресурсов.





**Рис. 3.** Среднее число потребляемых ГРБ при использовании различных методов выбора начальных параметров и скорости движения пользователя  $v = 60$  км/ч.

На рис. 3 представлено среднее число используемых ГРБ при скорости движения пользователя 60 км/ч. Результаты показывают, что при  $W = 2$  с использование метода статистического анализа с  $\alpha = 1$  (что соответствует выбору самых робастные параметров из собранной статистики) позволяет до 20% сократить потребление канальных ресурсов по сравнению с использованием надежных фиксированных параметров ( $M = 0, K = 4$ ). Использование квантиля  $\alpha = 0,99$  и статистики, в которой объединены параметры вне зависимости от того, с какой скоростью двигаются пользователи, позволяет снизить потребление канальных ресурсов до 35% по сравнению с использованием надежных фиксированных параметров. Если же базовая станция может различать скорости движения пользователей и собирать отдельную статистику для каждой скорости движения (см. кривую  $\alpha = 0,99, v = 60$  км/ч), то метод статистического анализа обеспечивает до 2 раз меньшее потребление канальных ресурсов, чем метод с фиксированными надежными параметрами. Отметим, что данное решение отличается не более чем на 10% от метода выбора начальных параметров, основанного на использовании механизма двойного подключения. Таким образом, при наличии информации о скорости движения пользователей метод статистического анализа при выборе начальных параметров позволяет существенно снизить объем потребляемых канальных ресурсов по сравнению с методом выбора фиксированных надежных параметров и при этом обеспечить потребление канальных ресурсов близкое к методу, основанному на механизме двойного подключения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача выбора начальных параметров передачи (СКК и количества попыток передачи) для URLLC-данных в восходящем канале при высокой мобильности пользователей. Предложены три метода выбора параметров: (а) выбор фиксированных робастных параметров, (б) выбор параметров, основанный на статистическом анализе параметров передачи, выбираемых базовой станцией для других пользователей в зависимости от затухания сигнала и скорости их движения, (в) выбор параметров, основанный на использовании механизма двойного подключения. Результаты исследования показывают, что использование фиксированных робастных параметров обеспечивает выполнение строгих требований URLLC-

приложений, но приводит к высокому потреблению канальных ресурсов. Метод, основанный на использовании механизма двойного подключения, обеспечивает наименьшее потребление канальных ресурсов. Однако для реализации данного метода требуется, чтобы устройство имело не менее двух радиointерфейсов, что существенно увеличивает его стоимость. Производительность метода, основанного на статистическом анализе, зависит от возможности базовой станции оценивать скорость движения пользователей. Если на базовой станции отсутствует возможность точно оценивать скорость движения пользователей, то метод статистического анализа до 35% снижает потребление канальных ресурсов по сравнению с использованием фиксированных робастных параметров. Если же базовая станция может различать пользователей по скорости движения, то метод статистического анализа до 2 раз снижает потребление канальных ресурсов по сравнению с методом выбора фиксированных параметров и отличается не более чем на 10% от метода, основанного на использовании механизма двойного подключения. Таким образом, из всех рассмотренных методов метод статистического анализа обеспечивает низкий объем потребляемых канальных ресурсов и при этом не требует значительных изменений архитектуры базовых станций и пользовательских устройств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, Recommendation M.2083, ITU-R, 2015.
2. Khorov E., Krasilov A., Selnitskiy I., Akyildiz I. F. A Framework to Maximize the Capacity of 5G Systems for Ultra-Reliable Low-Latency Communications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, no. 6, pp. 2111-2123, 1 June 2021.
3. Karamyshev A., Khorov E., Krasilov A., Akyildiz I.F. Fast and accurate analytical tools to estimate network capacity for URLLC in 5G systems, *Computer Networks*, Volume 178, 2020, 107331, ISSN 1389-1286.
4. 5G; NR; Physical layer procedures for data, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.214, 2021.
5. 5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.321, 2021.
6. Liu Y., Deng Y., El-kashlan M., Nallanathan A., Karagiannidis G. K. Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, vol. 39, no. 3, pp. 741-755.
7. Mahmood N., Abreu R., Bohnke R., Schubert M., Berardinelli G., Jacobsen T. Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC Services in 5G New Radio. *Proceedings of the 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. IEEE, 2019, pp. 607-612.
8. Shashin A., Belogaev A., Krasilov A., Khorov E. Adaptive Parameters Selection for Uplink Grant-Free URLLC Transmission in 5G Systems. *Computer Networks*, 2023, vol. 222, p. 109527.
9. Ullah H., Nair N. G., Moore A., Nugent C., Muschamp P., Cuevas M. 5G communication: an overview of vehicle-to-everything, drones, and healthcare use-cases. *IEEE Access* 2019, vol. 7, pp. 37251-37268.
10. URLLC System Level Simulation Assumptions, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) R1-166398, 2016.
11. Singh B., Tirkkonen O., Li Z., Uusitalo M. A. Contention-Based Access for Ultra-Reliable Low Latency Uplink Transmissions. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 182-185.
12. Lucas-Estan M. C., Gozalvez J., Sepulcre M. On the Capacity of 5G NR Grant-Free Scheduling with Shared Radio Resources to Support Ultra-Reliable and Low-Latency Communications. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 16, p. 3575.
13. Jacobsen T., Abreu R., Berardinelli G., Pedersen K., Mogensen P., Kovacs I. Z., Madsen T., System Level Analysis of Uplink Grant-Free Transmission for URLLC. *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 2017, pp. 1-6.

14. Jacobsen T., Abreu R., Berardinelli G., Pedersen G., Kovacs I. Z., Mogensen P. E. System Level Analysis of K-repetition for Uplink Grant-Free URLLC in 5G NR. *Proceedings of the 25th European Wireless Conference*. VDE, 2019, pp. 96-100.
15. Jacobsen T., Abreu R., Berardinelli G., Pedersen K., Kovacs I. Z., Mogensen P. Joint Resource Configuration and MCS Selection Scheme for Uplink Grant-Free URLLC. *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. 2018, pp. 1-6.
16. Ozaku S., Shimbo Y., Suganuma H., and Maehara F. Adaptive Repetition Control Using Terminal Mobility for Uplink Grant-Free URLLC. *Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2020, pp. 1-5.
17. The NS-3 network simulator. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
18. 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.913, 2020.

## Initial Parameters Selection for Serving Uplink URLLC Traffic of High-Mobility Users

Shashin A.E., Krasilov A.N., Khorov E.M.

5G cellular systems provide a new service called Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC). In many URLLC scenarios, e.g., in intelligent transport systems, users move at high speed and transmit data in the uplink. The base station shall assign transmission parameters that satisfy the strict quality of service requirements of URLLC applications and consume the least amount of channel resources. At high speed, users often change the serving base station. In this case, the task of selecting transmission parameters is complicated by the fact that the base station does not have channel quality measurements for the new user. This paper proposes various methods for selecting the initial transmission parameters when user connects to the base station. With simulations, the paper compares various methods for different user speeds. Recommendations are given on the selection of initial parameters that provide a low amount of consumed channel resources.

**KEYWORDS:** cellular systems, 5G, URLLC, uplink, modulation and coding scheme, high mobility.