

Алгоритм выбора параметров передачи для аperiodического URLLC-трафика в восходящем канале¹

А.Э. Шашин^{*,**}, А.А. Белогаев^{*,**}, А.Н. Красилов^{*,**}, Е.М. Хоров^{*,**}

^{*} *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

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

Поступила в редколлегию 28.03.2022 г.

Аннотация—Сервис сверхнадежной связи с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) является ключевым сервисом в системах сотовой связи пятого поколения (5G). Типичными требованиями к данному сервису являются обеспечение доставки данных с задержкой не более 1 мс и надежностью не менее 99,999%. В работе рассматривается сценарий передачи аperiodических URLLC-данных в восходящем канале. Для выполнения строгих ограничений на время доставки пользовательские устройства используют метод доступа к каналу без запроса полосы. Согласно данному методу базовая станция заблаговременно назначает частно-временные ресурсы и выбирает параметры передачи (т.е. сигнально-кодированную конструкцию, количество попыток передачи) для каждого пользователя. Для обеспечения высокого коэффициента использования ресурсов в условиях случайного аperiodически генерируемого трафика базовая станция назначает общие ресурсы нескольким пользователям, что может приводить к интерференции между передачами различных пользователей. В работе предложен алгоритм выбора параметров передачи для каждого пользователя, учитывающий каналные условия рассматриваемого пользователя и интерференцию, создаваемую передачами других пользователей. С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 показано, что предложенный алгоритм позволяет до шести раз увеличить емкость сети по сравнению с алгоритмами, представленными в литературе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сотовые сети, 5G, URLLC, аperiodический трафик, восходящий канал, сигнально-кодированная конструкция, имитационное моделирование, емкость сети

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_2_29

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы сотовой связи пятого поколения (5G) обеспечивают поддержку нового сервиса сверхнадежной передачи данных с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) [1]. Ключевыми для обеспечения сервиса URLLC являются два показателя эффективности: (а) время доставки пакетов и (б) доля успешно доставленных пакетов. Целевые значения этих показателей зависят от конкретных приложений. Например, для работы приложений по автоматизации фабрик, а также систем автоматического распределения электроэнергии обычно требуется успешная доставка не менее 99,999% пакетов с задержкой не более 1 мс [1]. Приложения URLLC могут генерировать трафик как в нисходящем, так и в восходящем канале. Следует отметить, что проблема обеспечения заданных требований к качеству обслуживания (англ.: Quality of Service, QoS) значительно отличается для случаев передачи в нисходящем и восходящем каналах в связи с тем, что в этих случаях используются различные методы доступа к каналу. В данной статье рассматривается случай передачи

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

URLLC-данных в восходящем канале, тогда как случай передачи в нисходящем канале широко изучен, например, в работах [2–5].

В спецификациях систем 5G [6, 7] описываются два метода доступа к восходящему каналу. Согласно методу доступа к каналу с запросом полосы (англ.: grant-based) пользовательское устройство (далее: пользователь) сначала отправляет запрос на базовую станцию. После процедуры планирования ресурсов базовая станция отправляет пользователю сообщение, которое содержит информацию о выделенных частотно-временных ресурсах и о выбранных параметрах передачи, в том числе о выбранной Сигнально-Кодовой Конструкции (СКК), количестве попыток передачи и др. Только после получения данного сообщения пользователь может начать передачу данных. Поскольку URLLC-приложения предъявляют строгие требования к задержке, дополнительная задержка, вызванная передачей запроса полосы и получением ответа, может привести к нарушению этих требований [8]. Поэтому в данной статье рассматривается метод доступа к каналу без запроса полосы (англ.: grant-free). Согласно этому методу базовая станция заблаговременно конфигурирует частотно-временные ресурсы и параметры передачи для пользователей.

Для обеспечения высокой надежности доставки данных пользователь может выполнять несколько попыток передачи для каждого пакета. Решение о повторной передаче может быть принято пользователем: (а) после получения негативного подтверждения (англ.: Negative ACKnowledgement, NACK) от базовой станции или (б) безусловно. В соответствии с безусловной схемой пользователь всегда совершает фиксированное число K попыток передачи для каждого пакета. Эта схема называется схемой с K повторениями (англ.: K-repetition). Во многих работах [8, 9] показано, что данная схема позволяет удовлетворить требованиям к качеству обслуживания URLLC-приложений при значительном снижении задержки по сравнению со схемами, основанными на использовании подтверждений. Поскольку в данной статье рассматриваются сценарии со строгими требованиями к задержке, то для передачи данных используется схема с безусловными повторами, где K — параметр, конфигурируемый базовой станцией и определяющий общее количество передач одного пакета.

В данной работе рассматривается сценарий обслуживания аperiodического трафика. Трафик такого типа генерируется при возникновении определенных случайных событий, например, при определенных отклонениях температуры/давления/напряжения сети от референсных значений. Во многих работах [8, 10] для обслуживания аperiodического трафика предлагается использовать общие для всех пользователей частотно-временные ресурсы, поскольку выделение отдельных ресурсов для каждого пользователя приводит к их неэффективному использованию (у пользователя могут отсутствовать данные на передачу в моменты времени, в которых выделены ресурсы). Однако использование общих ресурсов приводит к возникновению интерференции между передачами разных пользователей, что необходимо учитывать при выборе параметров передачи.

Поскольку величина отношения сигнала к шуму и интерференции (англ.: Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) при приеме сигнала на базовой станции может значительно изменяться по времени и частоте из-за замираний сигнала и интерференции между передачами различных пользователей, параметры передачи должны выбираться достаточно надежно, чтобы удовлетворить строгим ограничениям на время и надежность доставки. Вместе с тем использование слишком робастных параметров передачи (например, робастной СКК или большого количества попыток передачи) увеличивает потребление канальных ресурсов, что, в свою очередь, снижает емкость сети [8, 10]. В данной статье используется следующее определение пропускной способности сети для URLLC-трафика, представленное в документах 3GPP [1]:

Определение 1. Емкость сети — это максимальная нагрузка, при которой требования к качеству обслуживания (время и надежность доставки пакетов) выполняются по крайней мере для 99% URLLC-пользователей/потоков.

В данной работе рассматривается задача выбора параметров передачи (т.е. СКК и количества попыток передачи) с целью обеспечения высокой емкости сети при обслуживании аperiodического трафика. Представленные в литературе алгоритмы выбора параметров можно разделить на две группы (см. подробный анализ в разделе 2). Согласно алгоритмам первой группы, базовая станция выбирает одинаковые фиксированные параметры передачи для всех пользователей. При использовании же алгоритмов второй группы базовая станция выбирает СКК или количество попыток передачи для каждого пользовательского устройства в зависимости от измеренного качества канала для этого устройства. Однако ни в одном из существующих исследований не предлагается алгоритм выбора параметров, осуществляющий совместный выбор СКК и количества попыток передачи для каждого пользователя и учитывающий возможную интерференцию, вызванную передачами разных пользователей в совместно используемых частотно-временных ресурсах канала. В данной работе предложен алгоритм адаптивного выбора СКК и количества попыток передачи для каждого пользователя, лишенный указанных выше недостатков. Результаты имитационного моделирования в среде NS-3 показывают, что предложенный алгоритм значительно увеличивает емкость сети для URLLC-трафика по сравнению с существующими алгоритмами.

Дальнейшее изложение работы построено следующим образом. В разделе 2 представлено современное состояние исследований по теме выбора параметров передачи URLLC-данных в восходящем канале. В разделе 3 детально описывается модель рассматриваемой системы, а также приводится постановка задачи. В разделе 4 приведено описание разработанного алгоритма. В разделе 5 представлены результаты исследования эффективности предложенного алгоритма и его сравнение с алгоритмами, известными из литературы. В разделе 6 резюмируются основные результаты работы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Популярным в литературе подходом к выбору параметров передачи аperiodически генерируемых URLLC-данных в общих частотно-временных ресурсах является выбор фиксированных параметров передачи (СКК и количество попыток), одинаковых для всех пользователей. Параметры выбираются с использованием аналитических и/или имитационных моделей.

В работах [9–11] представлены аналитические модели, которые оценивают вероятность потери пакета при заданных параметрах передачи. Однако при построении этих моделей используется ряд допущений, которые существенно снижают точность оценки вероятности доставки данных и, тем самым, могут приводить к нарушению строгих требований к качеству обслуживания. В частности, авторы [10, 11] предполагают, что коллизия (т.е. одновременная передача данных нескольких пользователей в одних и тех же частотных ресурсах) всегда приводит к потере пакетов. В реальных же системах коллизии не всегда приводят к потере пакетов, а вероятность потери зависит от СКК и SINR на приемнике. В работе [9] используется упрощенная модель ошибок, согласно которой пакет считается потерянным, если для этого пакета SINR на приемнике ниже некоторого заданного порога. Однако эта модель ошибок не соответствует реальной зависимости вероятности потери пакета от SINR. Более того, во всех трех работах рассматривается плоский по частоте канал. Однако в реальности канал подвержен частотно-селективным замираниям.

В работах [12, 13] выбор параметров передачи осуществляется с использованием имитационного моделирования. Имитационные модели позволяют точнее оценить вероятность поте-

ри пакетов, поскольку в них используются реалистичные модели канала и ошибок. Однако использование имитационных моделей требует значительного времени. Поскольку требуется выполнить расчет для всех возможных конфигураций параметров передачи, имитационные модели нельзя использовать для выбора параметров в режиме реального времени.

Во всех упомянутых выше работах для всех пользователей предлагается выбирать одни и те же параметры. Однако различные пользователи могут находиться в разных канальных условиях (на различных расстояниях от базовой станции), поэтому общие параметры зачастую соответствуют пользователю с наихудшими канальными условиями. Таким образом, такой подход приводит к неэффективному использованию канальных ресурсов, что снижает емкость сети. По этой причине в работах [14, 15] предлагаются алгоритмы, которые адаптивно выбирают параметры передачи для каждого пользователя.

Авторы работы [14] предлагают адаптивно выбирать СКК для каждого пользователя, используя набор пороговых значений для мощности принимаемого сигнала. В частности, для пользователя с меньшей мощностью базовая станция выбирает более робастную СКК. Однако авторы не предлагают способ выбора этих пороговых значений, а также алгоритм выбора количества попыток передачи.

В работе [15] предлагается адаптивно выбирать количество попыток передачи в зависимости от измеренной на базовой станции временной корреляции приходящего от пользователя сигнала. Количество попыток передачи предлагается увеличивать в случае высокой корреляции. При этом всем пользователям предлагается использовать одну и ту же СКК. Отсутствие адаптивного выбора СКК является существенным недостатком предлагаемого подхода. Кроме того, авторы не учитывают возможную интерференцию между передачами разных пользователей при выборе параметров передачи.

Таким образом, анализ существующих работ показывает, что в литературе отсутствуют адаптивные алгоритмы для совместного выбора СКК и количества попыток передачи, учитывающие различные канальные условия пользователей и интерференцию между передачами разных пользователей. В данной работе предлагается алгоритм, лишенный перечисленных недостатков. За счет адаптивного выбора параметров передачи для каждого пользователя предложенный алгоритм позволяет существенно повысить емкость сети для аperiodического URLLC-трафика.

3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

В данном разделе дано описание ключевых особенностей рассматриваемой системы, таких как метод доступа к каналу и механизмы измерения канала. В конце раздела приводится постановка задачи выбора параметров передачи для URLLC-трафика в восходящем канале.

3.1. Частотно-временные ресурсы

В системах 5G передача данных осуществляется с использованием метода множественного доступа с ортогональным разделением канала по частоте (англ.: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA). Согласно спецификации TS 38.214 [6] весь доступный частотный канал разделен на подканалы, называемые Ресурсными Блоками (РБ). Каждый РБ состоит из 12 последовательных поднесущих. Интервал между поднесущими равен $15 \cdot 2^n$ кГц, где n обозначает выбранную OFDM-нумерологию и может принимать значения $n \in \{0, 1, \dots, 5\}$. Чтобы уменьшить объем накладных расходов, базовая станция группирует РБ в Группы Ресурсных Блоков (ГРБ), состоящие из фиксированного числа РБ. Базовая станция сообщает индексы назначенных пользователю ГРБ в контрольном канале.

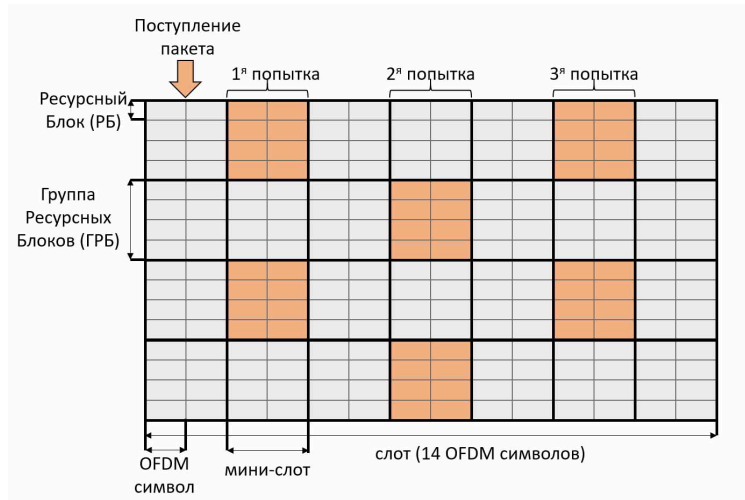


Рис. 1. Передача пакета в частотно-временных ресурсах: $B = 4$, мини-слот состоит из 2 OFDM символов, включена псевдослучайная перестройка частоты.

Ось времени разделена на слоты, каждый из которых состоит из 14 OFDM-символов. Слоты могут быть дополнительно разделены на мини-слоты для обеспечения меньшего времени передачи данных. Минимальное количество OFDM-символов в одном мини-слоте равно двум. Таким образом, минимальная единица частотно-временного ресурса, которая может быть использована для передачи данных, имеет длительность один мини-слот и ширину $B \cdot 180 \cdot 2^n$ кГц, где B — количество РБ в одной ГРБ.

3.2. Метод доступа к каналу

Для снижения задержки при передаче данных в восходящем канале спецификации сетей 5G [6, 7] вводят метод доступа к каналу без запроса полосы. Согласно этому методу базовая станция заранее конфигурирует для каждого пользователя параметры передачи, такие как частотно-временные ресурсы (ГРБ и мини-слоты), сигнально-кодовая конструкция (СКК) и количество попыток передачи K . Базовая станция может изменять параметры передачи, отправляя пользователю специальное сообщение в контрольном канале.

Чтобы избежать потерь пакетов в случае скоррелированного ухудшения канальных условий, базовая станция может сконфигурировать для пользователя использование механизма псевдослучайной перестройки частоты (англ.: frequency hopping). Данный механизм позволяет пользователю изменять набор ГРБ, используемый для передачи каждого пакета в соответствии с заданной псевдослучайной последовательностью.

Для повышения надежности доставки данных пользователь может осуществить несколько попыток передачи одного пакета согласно схеме K -repetition, описанной в разделе 1. Мини-слоты для различных попыток передачи одного и того же пакета могут быть выбраны из интервала, ограниченного временем доставки. Чтобы избежать скоррелированного ухудшения качества канала по времени, мини-слоты для передачи выбираются равномерно из соответствующего временного интервала (см. рис. 1).

В случае обслуживания аperiодического трафика базовая станция выделяет всю или часть доступной полосы частот для URLLC-трафика. Чтобы обеспечить низкую задержку, базовая станция разрешает передавать данные в каждом мини-слоте для всех пользователей. В этом случае разные пользователи могут использовать одни и те же канальные ресурсы (ГРБ и

мини-слоты) для передачи своих пакетов, что может приводить к интерференции и потерям пакетов.

3.3. Механизмы измерения качества канала

Спецификация TS 38.214 [6] описывает два типа пилотных сигналов, которые могут использоваться для измерения качества восходящего канала: (а) пилотные сигналы для прослушивания канала (англ: Sounding Reference Signals, SRS) и (б) пилотные сигналы для демодуляции (англ: Demodulation Reference Signals, DM-RS).

Пилотные сигналы SRS периодически передаются каждым пользователем. SRS сигналы разных пользователей разделены в частотной, временной или кодовой областях таким образом, чтобы передачи SRS разных пользователей были ортогональны. Поскольку SRS сигналы имеют известную для базовой станции структуру, она может использовать принятые сигналы для оценки качества канала, т.е. коэффициентов передачи канала и отношения сигнал/шум. В данной работе предполагается, что SRS сигналы периодически передаются каждым пользователем во всех ГРБ, что позволяет базовой станции с той же периодичностью оценивать отношение сигнал/шум для каждого пользователя в каждой ГРБ.

В отличие от SRS сигналы DM-RS передаются в тех же ГРБ, что и пользовательские данные, и используются для демодуляции/декодирования сигнала. Аналогично сигналам SRS сигналы DM-RS разных пользователей также разделены в частотной и/или кодовой областях. При использовании метода доступа к каналу без запроса полосы различные пользователи используют разные DM-RS последовательности, свойства которых позволяют детектировать несколько одновременных передач в восходящем канале. В данной работе с помощью сигналов DM-RS предлагается детектировать передачи нескольких пользователей и оценивать мощность интерференции.

3.4. Постановка задачи

В данной работе рассматривается сценарий, в котором пользователи генерируют случайный апериодический трафик. Предполагается, что пользователь не генерирует новый пакет до тех пор, пока не истечет время жизни предыдущего пакета. Базовая станция выделяет всем пользователям общие каналные ресурсы. Ширины выделенного частотного канала достаточно для передачи всего пакета в одном мини-слоте даже при использовании самой робастной СКК (т.е. фрагментации пакетов между мини-слотами не происходит).

В работе ставится следующая задача: необходимо разработать алгоритм выбора параметров передачи (СКК и количества попыток передачи) для URLLC-пользователей, нацеленный на увеличение емкости сети.

4. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

В рассматриваемом алгоритме параметры передачи (СКК и количество попыток передачи) выбирается для каждого пользователя с учетом измеренных с помощью пилотных сигналов каналных условий данного пользователя, а также интерференции, вызванной передачами других пользователей. При подключении нового пользователя базовая станция не имеет актуальной информации о состоянии канала и поэтому назначает самые робастные параметры: СКК 0 и $K = K_{max}$, где СКК 0 — сигнально-кодовая конструкция с наименьшими порядком модуляции и кодовой скоростью, K_{max} — максимально допустимое количество попыток передачи, которое определяется ограничением на время доставки пакета. Далее по мере поступления измерений базовая станция выполняет ряд процедур (см. их подробное описание

ниже) для получения оценки вероятности потери пакета для различных конфигураций параметров (СКК и количества попыток). На основе полученных оценок осуществляется выбор оптимальной конфигурации.

4.1. Оценка интерференции

Важным компонентом предлагаемого алгоритма является оценка мощности интерференции для каждого пользователя в каждой ГРБ. Базовая станция обновляет оценку мощности интерференции при каждом получении пакетов данных от одного или нескольких пользователей следующим образом.

Рассмотрим набор пользователей, которые передают данные в определенном мини-слоте. Каждый пользователь передает вместе с данными сигналы DM-RS, используя которые базовая станция может оценить мощность сигнала каждого пользователя в каждой ГРБ. Пусть пользователь i передает пакет в наборе ГРБ Ω_i . Оценка интерференции в ГРБ j для пользователя i оценивается следующим образом:

$$I_i^{(j)} = P_{\Sigma}^{(j)} - P_i^{(j)}$$

где $P_{\Sigma}^{(j)}$ — суммарная мощность сигнала, измеренная в ГРБ j , $P_i^{(j)}$ — мощность сигнала пользователя i , если $j \in \Omega_i$. Если $j \notin \Omega_i$ (т.е. пользователь i не передавал в ГРБ j), то $P_i^{(j)}$ полагается равным 0.

4.2. Оценка вероятности потери пакета

Базовая станция периодически принимает пилотные сигналы SRS от каждого пользователя в каждой ГРБ. С помощью сигналов SRS базовая станция оценивает мощность сигнала i -го пользователя $P_i^{(j)}$ для каждой ГРБ, где j — номер ГРБ ($j = 1, \dots, M$, где M — общее число ГРБ). Затем для каждой комбинации параметров передачи СКК с индексом N и количества попыток передачи K (индекс СКК $N = 0, \dots, N_{max}$ варьируется в соответствии с таблицей СКК из стандарта [6], где N_{max} соответствует СКК с наибольшим порядком модуляции и наибольшей кодовой скоростью; количество попыток передачи варьируется в диапазоне $K = 1, \dots, K_{max}$) базовая станция моделирует виртуальную передачу пакета в восходящем канале с использованием выбранной комбинации параметров и оценивает вероятность потери пакета следующим образом.

1. Оценивается отношение сигнала к шуму и интерференции:

$$SINR_i^{(j)} = \frac{P_i^{(j)}}{P_N + I_i^{(j)}},$$

где P_N — мощность теплового шума, а $I_i^{(j)}$ — оценка интерференции, полученная в рамках процедуры, описанной в разделе 4.1.

2. Определяется количество ГРБ M_N , необходимое для передачи пакета при использовании СКК с индексом N . Далее выбирается M_N ГРБ, равномерно распределенных в частотной области (предполагается, что базовая станция использует механизм frequency hopping). Множество выбранных ГРБ для попытки передачи q обозначим Ω_q .
3. Так как пользователь использует всю мощность в выбранных ГРБ, отношение сигнала к шуму и интерференции в выбранных ГРБ нормируется следующим образом:

$$SINR_{i,N}^{(j)} = \frac{M}{M_N} SINR_i^{(j)}.$$

4. Вероятность ошибочной передачи пакета оценивается с помощью модели EESM (англ.: Exponential Effective Signal-to-interference-plus-noise ratio Mapping) [16], основанной на экспоненциальном усреднении отношений сигнала к шуму и интерференции:

$$BLER = F(\{SINR_{i,N}^{(j)}, j \in \Omega_q\}, N).$$

5. Для каждой попытки передачи q независимо выбираются ГРБ и оценивается вероятность ошибки $BLER_q$ (для этого K раз повторяются шаги 2-4). Вероятность потери пакета после K попыток передачи оценивается следующим образом:

$$PLR_{N,K} = \prod_{q=1}^K BLER_q.$$

Таким образом, после каждого принятого пилотного сигнала SRS базовая станция может оценить вероятность потери пакета для всех конфигураций параметров $\{N, K\}$.

4.3. Выбор оптимальной конфигурации параметров

Так как значения отношения сигнала к шуму и интерференции, а следовательно, и вероятности потери пакета могут значительно изменяться со временем, выбор параметров передачи на основе только одного (последнего) измерения может приводить к частой смене параметров. В дальнейшем смену параметров передачи алгоритмом будем называть переключением. Переключения приводят к дополнительным накладным расходам в нисходящем канале, так как базовая станция вынуждена отправлять сообщения с новыми параметрами. Кроме того, если ориентироваться на мгновенные значения измерений канала, то часто будет возникать ситуация, когда после получения пилотного сигнала SRS канальные условия ухудшатся и к моменту передачи данных измерения канала перестанут быть актуальными. Поэтому для обеспечения устойчивости алгоритма используется сглаживание. Полученные на основе пилотных сигналов SRS оценки вероятности потери пакета усредняются по времени с помощью метода экспоненциального скользящего среднего следующим образом:

$$\widehat{PLR}_{N,K}(t) = \frac{1}{W} \cdot PLR_{N,K}(t) + (1 - \frac{1}{W}) \cdot \widehat{PLR}_{N,K}(t-1),$$

где W — размер окна усреднения (параметр алгоритма), $PLR_{N,K}(t)$ — оценка вероятности потери пакета при получении пилотного сигнала SRS в момент времени t , $\widehat{PLR}_{N,K}(t-1)$ — сглаженная оценка в момент времени $(t-1)$.

Для снижения числа переключений применяется гистерезисный подход: базовая станция использует два пороговых значения PLR_{low} и PLR_{high} (параметры алгоритма), где $PLR_{low} < PLR_{high}$. Оптимальная конфигурация параметров $\{N, K\}$ выбирается следующим образом:

1. Базовая станция помечает все конфигурации $\{N, K\}$ как подходящие, если $\widehat{PLR}_{N,K}(t) < PLR_{low}$, и как неподходящие, если $\widehat{PLR}_{N,K}(t) > PLR_{high}$.
2. Для всех подходящих конфигураций базовая станция определяет общее количество используемых ГРБ как $M_N \cdot K$.
3. Базовая станция из всех подходящих конфигураций выбирает ту конфигурацию, которая обеспечивает минимальное потребление канальных ресурсов согласно п.2.

Таблица 1. 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	25 пакетов/с
Период пилотных сигналов SRS	10 мс
Мощность пользовательского устройства	23 дБм
Высота пользовательского устройства	1,5 м
Высота базовой станции	30 м

5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Сценарий

Для исследования разработанного алгоритма 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 [1]. Пользователи случайным образом располагаются в шестиугольной ячейке (соте), а базовая станция располагается в одном из углов этого шестиугольника. Размер соты соответствует расстоянию между соседними базовыми станциями в 500 м.

Ось времени поделена на мини-слоты, которые состоят из двух OFDM-символов. Длительность одного OFDM-символа равна 71,4 мкс, что соответствует расстоянию между поднесущими в 15 кГц. Ширина канала равна 50 МГц и поделена на 16 ГРБ. Мощность пользовательского устройства — 23 дБм. Вся мощность равномерно распределяется пользователем между выбранными для передачи ГРБ. Для моделирования изменения качества канала во временной и частотной областях используется модель Рэлеевских замираний Extended Pedestrian A (EPA), соответствующая скорости движения пользователя 3 км/ч.

Каждый пользователь генерирует пуассоновский поток интенсивности $\lambda = 25$ пакетов/с. Размер пакета — 32 байта. При этом новый пакет не может быть сгенерирован раньше, чем завершатся все попытки передачи предыдущего пакета. Рассматриваются следующие требования к доставке URLLC-пакетов: пакеты должны быть доставлены в течение интервала времени 1 мс с вероятностью более 99,999%.

Время моделирования установлено в значение $4 \cdot 10^4$ секунд. Таким образом, за время эксперимента каждый пользователь генерирует порядка 10^6 пакетов. Количество независимых прогонов модели равно 100.

5.2. Анализ результатов

Исследуем эффективность разработанного алгоритма выбора параметров и сравним его с существующими. Обзор литературы, представленный в разделе 2, показывает, что существующие решения можно разделить на две группы. Первая группа включает алгоритмы, которые выбирают одни и те же фиксированные параметры передачи для всех пользователей. Вторая группа включает адаптивные алгоритмы, которые выбирают различные параметры передачи для разных пользователей. Однако существующие адаптивные алгоритмы независимо выбирают параметры передачи для разных UE и не предлагают методов оценки интерференции.

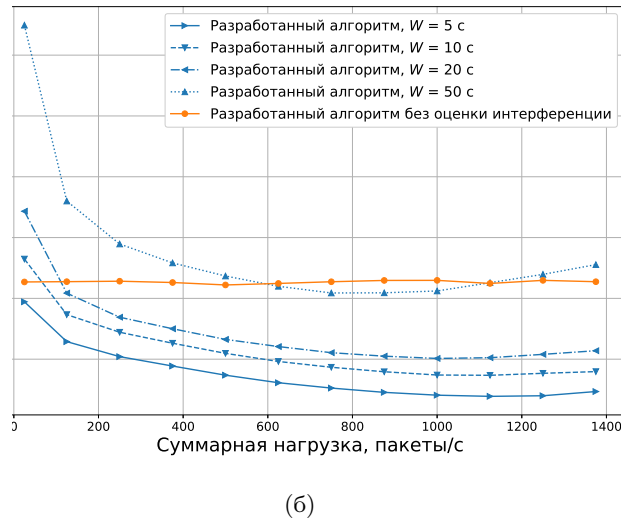
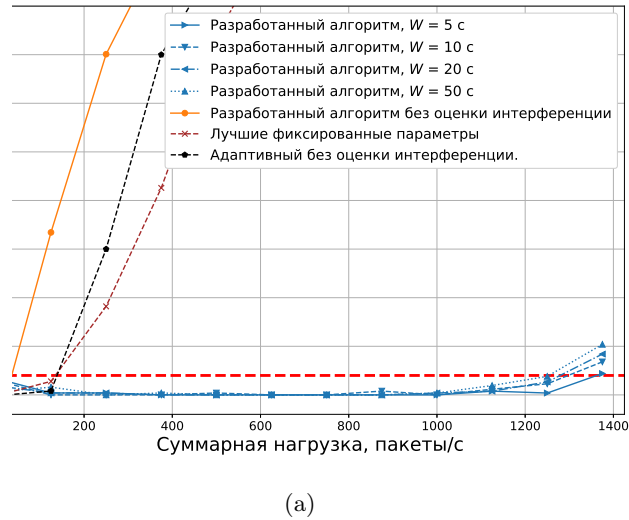


Рис. 2. Результаты моделирования: (а) доля неудовлетворенных пользователей, (б) интервал между переключениями.

Таким образом, мы сравниваем эффективность разработанного алгоритма со следующими алгоритмами:

- «Лучшие фиксированные параметры» соответствуют использованию всеми пользователями фиксированных параметров передачи, которые найдены путем полного перебора как обеспечивающие максимальную емкость сети (в рассматриваемом сценарии: СКК 5, 4 попытки). Емкость сети, обеспечиваемую этим алгоритмом, можно рассматривать как верхнюю границу ёмкости, которую могут обеспечить алгоритмы, предложенные в работах [9–13].
- «Адаптивный без оценки интерференции» соответствует алгоритмам [14, 15], которые выбирают параметры передачи для каждого пользователя на основе его средних канальных условий и не учитывают интерференцию между передачами разных пользователей.

Для разработанного алгоритма рассматриваются следующие случаи:

- Разработанный алгоритм с различными значениями окна усреднения W . PLR_{high} во всех случаях равен 10^{-5} , что соответствует требованию к надежности. PLR_{low} для каждого значения W найден полным перебором как обеспечивающий минимальное потребление канальных ресурсов при выполнении ограничения на время и вероятность доставки (подробнее методика выбора параметров описана в нашей предыдущей работе [18]).
- Разработанный алгоритм с окном $W = 10$ с, но без процедуры оценки интерференции, описанной в разделе 4.1.

На рис. 2(а) представлена зависимость доли неудовлетворенных пользователей от суммарной нагрузки в сети. Напомним, что неудовлетворенным считается пользователь, для которого доля потерянных пакетов по результатам всего эксперимента превышает 10^{-5} . Красная пунктирная прямая на графике соответствует уровню доли неудовлетворенных пользователей 1%. Точка пересечения кривых с этой прямой соответствует емкости сети.

Результаты показывают, что как существующие адаптивные алгоритмы, так и предлагаемый алгоритм без оценки интерференции обеспечивают крайне низкую емкость сети. Это означает, что механизм оценки интерференции играет ключевую роль при выборе параметров передачи. Кривая «Лучшие фиксированные параметры» соответствует максимальной емкости сети, которая может быть достигнута при использовании фиксированных параметров передачи, одинаковых для всех пользователей. Следует отметить, что на практике невозможно заранее предсказать, какая конфигурация параметров является оптимальной для данного сценария, поскольку она зависит от многих факторов: распределения пользователей, параметров трафика, требований к качеству обслуживания и т.д. Использование разработанного алгоритма с оценкой интерференции позволяет увеличить емкость сети более чем в шесть раз по сравнению с лучшими фиксированными параметрами.

Проанализируем влияние параметра W . Результаты на рис. 2(а) показывают, что емкость сети незначительно зависит от W (отличие емкости при $W = 5$ с и $W = 50$ с не превышает 10%). Таким образом, для обеспечения эффективной работы алгоритма достаточно выбирать такое значение W , чтобы оно было много больше периода генерации трафика и много больше характерного периода изменения качества канала между пользователями и базовой станцией.

На рис. 2(б) представлена зависимость среднего для пользователей интервала между переключениями параметров передачи в зависимости от суммарной нагрузки сети. Результаты показывают, что средний интервал между переключениями для каждого пользователя составляет сотни секунд. Таким образом, разработанный алгоритм обладает высокой стабильностью и обеспечивает очень низкие накладные расходы с точки зрения потребления ресурсов нисходящего канала, необходимые для передачи информации о выбранных параметрах передачи.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовалась задача выбора параметров передачи в восходящем канале для апериодического URLLC-трафика, обслуживаемого с помощью метода доступа без запроса полосы. Был предложен адаптивный алгоритм, который совместно выбирает СКК и количество попыток передачи для каждого пользователя. В отличие от существующих алгоритмов предложенный алгоритм оценивает мощность интерференции между передачами различных пользователей и учитывает ее при выборе параметров.

Эффективность разработанного алгоритма была исследована с помощью имитационного моделирования в среде NS-3. Численные результаты показали, что разработанный алгоритм позволяет повысить емкость сети до шести раз по сравнению с существующими алгоритмами. Кроме того, алгоритм обладает высокой стабильностью: средний интервал времени между изменениями параметров на несколько порядков превышает время между приходами паке-

тов. Это означает, что при использовании разработанного алгоритма базовая станция будет генерировать очень низкий объем служебного трафика в нисходящем канале.

В дальнейшем планируется расширение данного исследования на случай использования метода последовательного подавления помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC) на базовой станции, а также на случай высокой мобильности пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. "5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.913, 2020.
2. G. Poci, T. Kolding, and K. I. Pedersen, "On the Cost of Achieving Downlink Ultra-Reliable Low-Latency Communications in 5G Networks," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 29506-29513, 2022.
3. A. Belogaev, E. Khorov, A. Krasilov, D. Shmelkin, and S. Tang, "Conservative Link Adaptation for Ultra Reliable Low Latency Communications," in 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2019, pp. 1-5.
4. A. Karimi, K. I. Pedersen, N. H. Mahmood, J. Steiner, and P. Mogensen, "5G Centralized Multi-Cell Scheduling for URLLC: Algorithms and System-Level Performance," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 72 253-72 262, 2018.
5. E. Khorov, A. Krasilov, I. Selnitskiy, and I. F. Akyildiz, "A Framework to Maximize the Capacity of 5G Systems for Ultra-Reliable Low-Latency Communications," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, no. 6, pp. 2111-2123, 2021.
6. "5G; NR; Physical layer procedures for data," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.214, 2021.
7. "5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.321, 2021.
8. G. Berardinelli, N. Mahmood, R. Abreu, T. Jacobsen, K. Pedersen, I. Z. Kovacs, and P. Mogensen, "Reliability Analysis of Uplink Grant-Free Transmission over Shared Resources," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23 602-23 611, 2018.
9. Y. Liu, Y. Deng, M. El-kashlan, A. Nallanathan, and G. K. Karagiannidis, "Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 3, pp. 741-755, 2021.
10. B. Singh, O. Tirkkonen, Z. Li, and M. A. Uusitalo, "Contention-Based Access for Ultra-Reliable Low Latency Uplink Transmissions," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 182-185, 2018.
11. M. C. Lucas-Estan, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, "On the Capacity of 5G NR Grant-Free Scheduling with Shared Radio Resources to Support Ultra-Reliable and Low-Latency Communications," in *Sensors*, vol. 19, no. 16, p. 3575, 2019.
12. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, P. Mogensen, I. Z. Kovacs, and T. Madsen, "System Level Analysis of Uplink Grant-Free Transmission for URLLC," in *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 2017, pp. 1-6.
13. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovacs, and P. E. Mogensen, "System Level Analysis of K-repetition for Uplink Grant-Free URLLC in 5G NR," in *Proceedings of the 25th European Wireless Conference. VDE*, 2019, pp. 96-100.
14. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovacs and P. Mogensen, "Joint Resource Configuration and MCS Selection Scheme for Uplink Grant-Free URLLC," in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2018, pp. 1-6.
15. S. Ozaku, Y. Shimbo, H. Suganuma, and F. Maehara, "Adaptive Repetition Control Using Terminal Mobility for Uplink Grant-Free URLLC," in *Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2020, pp. 1-5.

16. S. Lagen, K. Wanuga, H. Elkotby, S. Goyal, N. Patriciello, and L. Giupponi, "New Radio Physical Layer Abstraction for System-Level Simulations of 5G Networks," in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2020, pp. 1-7.
17. The NS-3 network simulator. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
18. A. Shashin, A. Belogaev, A. Krasilov, and E. Khorov, "Adaptive Transmission Parameters Selection Algorithm for URLLC Traffic in Uplink," in 2020 International Conference Engineering and Telecommunication(En&T), 2020, pp. 1-5.

Algorithm for Transmission Parameters Selection for Sporadic URLLC Traffic in Uplink

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

Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC) is a key service for the fifth generation (5G) cellular systems. Typical requirements for this service are the transmission reliability above 99.999% and the latency below 1 ms. The paper considers a scenario with sporadic URLLC traffic in the uplink. To satisfy the strict latency requirements, User Equipments (UEs) use the grant-free channel access method. According to this method, the base station allocates time-frequency resources and selects transmission parameters (i.e., the modulation and coding scheme, number of transmission attempts) in advance for each UE. To provide high resource utilization in the case of sporadic traffic, the base station allocates shared channel resources to several UEs, which can lead to interference between transmissions of different UEs. The paper proposes an algorithm for transmission parameters selection for each UE that takes into account the channel conditions of each considered UE and the interference caused by transmissions of other UEs. Numerical results obtained with NS-3 show that the proposed algorithm up to six times increases the network capacity with respect to the algorithms presented in the literature.

KEYWORDS: Cellular systems, 5G, URLLC, sporadic traffic, Uplink, Modulation and Coding Scheme, simulation, network capacity.