

Мультиплексирование URLLC-трафика и eMBB-трафика в нисходящем канале с помощью MU-MIMO¹

И.В. Лебедева^{**}, Р.Р. Юсупов^{*,**}, 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 05.04.2022

Аннотация—В статье рассматривается проблема мультиплексирования трафика сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC-трафика) и трафика улучшенной мобильной широкополосной связи (eMBB-трафика) в нисходящем канале в системах сотовой связи пятого поколения. Для мультиплексирования используется метод множественного доступа с использованием большого числа антенн (англ.: Multi-User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO), который позволяет базовой станции вести одновременную передачу данных нескольким пользователям с использованием одних и тех же частотно-временных ресурсов. Предложен новый алгоритм планирования радиоресурсов (планировщик), который осуществляет назначение частотно-временных ресурсов и параметров передачи eMBB-пользователям и URLLC-пользователям, а также динамическое распределение мощности базовой станции между ними. С помощью имитационного моделирования показано, что предложенный планировщик позволяет увеличить зону покрытия сети для URLLC-пользователей, а также увеличить пропускную способность eMBB-пользователей по сравнению с существующими планировщиками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 5G, eMBB, URLLC, MU-MIMO, мультиплексирование, качество обслуживания

10.53921/18195822_2022_22_2_52

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы сотовой связи пятого поколения (5G) обеспечивают поддержку широкого круга приложений, предъявляющих различные требования к качеству обслуживания (англ.: Quality of Service, QoS). Согласно [1] многочисленные приложения можно разделить на три группы: улучшенная мобильная широкополосная связь (англ.: enhanced Mobile BroadBand, eMBB), сверхнадежная связь с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) и массовое межмашинное взаимодействие (англ.: massive Machine-Type Communications, mMTC). В eMBB-группу входят приложения, генерирующие большой объем трафика и требующие высокой пропускной способности. В URLLC-группу входят новые приложения, такие как автоматизация производства, автономное вождение, телемедицина и т.д. В отличие от eMBB-приложений URLLC-приложения обычно генерируют меньший объем трафика, но предъявляют строгие требования к качеству обслуживания: (а) время доставки пакета должно быть меньше D^{QoS} , (б) доля потерянных пакетов должна быть меньше PLR^{QoS} . Хотя конкретные требования сильно зависят от рассматриваемого приложения, типичные значения, рассматриваемые в стандартах: D^{QoS} порядка 1 мс, PLR^{QoS} порядка 10^{-5} . В mMTC-группу

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

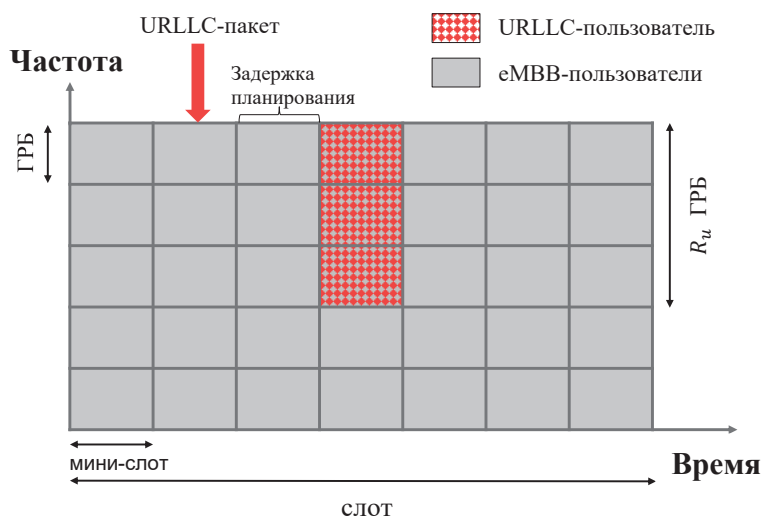


Рис. 1. Мультиплексирование eMBB- и URLLC-трафика с помощью MU-MIMO

входят приложения, для которых необходимо обеспечивать связь для множества автономных устройств, работающих от аккумуляторных батарей.

Чтобы удовлетворить различным требованиям к качеству обслуживания, комитетом 3rd Generation Partnership Project (3GPP) была разработана новая технология передачи данных New Radio (NR), позволяющая гибко изменять параметры передачи на физическом уровне. В частности, длительность слота для передачи данных может быть выбрана по-разному для eMBB-трафика и URLLC-трафика. Для достижения высокой пропускной способности, необходимой для eMBB-трафика, базовая станция должна использовать слоты длительностью порядка миллисекунды, что обеспечивает высокую спектральную эффективность [2]. Напротив, для обеспечения задержек передачи менее 1 мс, необходимых для URLLC-трафика, базовая станция должна использовать короткие слоты (в спецификациях они называются мини-слотами) длительностью в несколько сотен микросекунд.

Одной из важнейших проблем, не рассмотренных в спецификациях 3GPP, является эффективное мультиплексирование различных типов трафика при наличии ограниченного объема частотных ресурсов. В данной статье рассматривается проблема мультиплексирования eMBB-трафика и URLLC-трафика в нисходящем канале. Для мультиплексирования используется метод множественного доступа с использованием большого числа антенн на базовой станции (англ.: Multi-User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO). За счет большого числа антенн (порядка сотни) базовая станция может фокусировать сигнал, создавая очень узкие лучи, и мультиплексировать в пространстве передачи, адресованные различным пользователям. В частности, базовая станция с K антеннами может создавать $K_{ss} \leq K$ пространственных потоков, которые могут быть адресованы различным пользователям. Базовая станция реализует алгоритм планирования радиоресурсов, называемый планировщиком (от англ.: scheduler), который выбирает: (а) пользователей для пространственного мультиплексирования и (б) параметры передачи для каждого выбранного пользователя, т.е. частотно-временные ресурсы, мощность передачи и сигнально-кодировую конструкцию (СКК).

На рис. 1 представлен пример использования метода MU-MIMO для гибкого перераспределения ресурсов между eMBB-пользователями и URLLC-пользователями. В начале слота базовая станция может мультиплексировать несколько eMBB-пользователей, т.е. создать K_{ss} пространственных потоков и выделить некоторую мощность каждому потоку. Когда прибывает срочный URLLC-пакет, базовая станция создает дополнительный пространственный поток для URLLC-пользователя. При этом базовая станция должна перераспределить часть мощно-

сти с пространственных потоков, адресованных eMBB-пользователям, на пространственный поток URLLC-пользователя.

Существующие исследования [3–5], рассматривающие описанный выше подход для мультиплексирования eMBB-трафика и URLLC-трафика, показывают, что с помощью данного подхода можно выполнить строгие требования URLLC-пользователей и при этом незначительно снизить пропускную способность eMBB-пользователей по сравнению с подходом, основанным на разделении ресурсов по частоте [6–8]. Однако в работах [3–5] рассматриваются простые алгоритмы назначения параметров передачи URLLC-пользователю (мощности, СКК) и переназначения мощности между пространственными потоками, адресованными eMBB-пользователям и URLLC-пользователю (см. подробнее раздел 2).

В данной работе предложен новый алгоритм планирования ресурсов (планировщик) для совместного обслуживания eMBB-пользователей и URLLC-пользователей. С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 показано, что предложенный планировщик позволяет: (а) увеличить зону покрытия сети для URLLC-пользователей и (б) увеличить пропускную способность eMBB-пользователей по сравнению с существующими планировщиками.

Дальнейшее изложение работы построено следующим образом. В разделе 2 описываются особенности рассматриваемой системы связи. В разделе 3 описывается базовый планировщик для совместного обслуживания eMBB-трафика и URLLC-трафика, известный из литературы. В разделе 4 представлен новый планировщик. В разделе 5 с помощью имитационного моделирования в среде NS-3 проводится сравнение различных планировщиков. Раздел 6 содержит выводы по результатам проведенного исследования.

2. МОДЕЛЬ РАССМАТРИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Рассмотрим базовую станцию 5G, обслуживающую два типа пользователей: (а) eMBB-пользователи загружают с сервера большой объем данных (например, большие файлы или видеопотоки), (б) URLLC-пользователи, для которых сервер генерирует одиночные пакеты в нисходящем канале. Базовая станция должна обеспечивать максимально возможную пропускную способность сети для eMBB-пользователей, удовлетворяя при этом строгим ограничениям на время доставки D^{QoS} URLLC-пакетов и долю потерянных пакетов PLR^{QoS} .

Для передачи данных в нисходящем канале базовая станция использует метод множественного доступа с ортогональным разделением каналов по частоте (англ.: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA). В частности, ось времени делится на OFDM-символы. Длительность одного OFDM-символа зависит от используемой нумерологии n и равна $1/(14 \cdot 2^n)$ мс. Для диапазона низких и средних частот, рассматриваемых в данной статье (например, 3,6 ГГц), в спецификациях 5G рекомендуется использовать $n = \{0, 1, 2\}$, где $n = 0$ соответствует нумерологии, используемой в сетях 4G. Частотный канал делится на ресурсные блоки (РБ), каждый из которых состоит из 12 последовательных поднесущих. Несколько последовательных РБ объединяются в так называемые группы ресурсных блоков (ГРБ), которые представляют собой минимальный объем частотного ресурса, назначаемый пользователю. Общее количество ГРБ, доступных в частотном канале, обозначим за R .

Для обеспечения высокой спектральной эффективности для eMBB-пользователей, базовая станция назначает частотно-временные ресурсы каждый слот, который состоит из 14 последовательных OFDM-символов (т.е. длительность слота равна $1/2^n$ мс). Для обеспечения низкой задержки (менее 1 мс) для URLLC-пользователей, базовая станция назначает ресурсы каждый мини-слот, состоящий из 2 OFDM-символов. Таким образом, за время одного слота можно совершить семь коротких передач URLLC-данных с использованием различных мини-слотов (см. рис. 1).

3. БАЗОВЫЙ ПЛАНИРОВЩИК

Как отмечено в разделе 1, eMBB-пользователи генерируют большой объем данных, поэтому в начале каждого слота есть хотя бы один eMBB-пользователь с данными на передачу. Для URLLC-пользователей, напротив, генерируются одиночные пакеты, которые появляются на базовой станции в случайные моменты времени (как правило, не совпадающие с границами слотов) и требуют срочного обслуживания до наступления следующего слота. Мы рассматриваем следующую архитектуру планировщика на базовой станции.

В начале каждого слота планировщик распределяет ресурсы (ГРБ, долю мощности базовой станции) между eMBB-пользователями. Когда появляется пакет URLLC-пользователя, планировщик должен изменить построенное ранее расписание так, чтобы выделить ресурсы для передачи пакета URLLC-пользователя. В частности, планировщик должен выбрать такие параметры передачи для URLLC-пользователя (набор выделенных ГРБ, долю мощности и СКК), которые позволят удовлетворить строгим требованиям URLLC-пользователя. Кроме того, поскольку в начале слота базовая станция уже выделила всю мощность для eMBB-пользователей, часть мощности должна быть перераспределена от eMBB-пользователей к URLLC-пользователю. Рассмотрим более подробно описанные выше процедуры.

3.1. Планирование ресурсов для eMBB-пользователей

В начале каждого слота базовая станция запускает планировщик для обслуживания eMBB-пользователей. Данный алгоритм: (а) определяет набор eMBB-пользователей, которые будут обслуживаться в данном слоте, (б) для каждого пользователя назначает набор ГРБ для передачи, долю мощности и СКК. В данной статье в качестве базового рассматривается планировщик, предложенный в работе [9], который работает следующим образом.

1. На базе измерений канала до различных пользователей базовая станция делит всех eMBB-пользователей на N групп. Пользователи, относящиеся к одной группе, имеют высокую взаимную корреляцию каналов, поэтому им не должны назначаться одни и те же ГРБ. Напротив, пользователи из разных групп имеют низкую корреляцию и могут мультиплексироваться в одном ГРБ с помощью MU-MIMO.
2. Базовая станция распределяет ГРБ между пользователями внутри каждой группы согласно стратегии Proportional Fair [10]. Поскольку eMBB-пользователи генерируют большой объем данных, все ГРБ используются всеми группами. Следовательно, количество eMBB-пользователей, мультиплексируемых в каждом ГРБ, будет равно N .
3. Базовая станция выделяет одинаковую долю мощности каждому запланированному eMBB-пользователю с номером i : $P_i = 1/N$ в каждом ГРБ.
4. Базовая станция вычисляет прекодер (и соответствующий ему пространственный поток) на основе алгоритма Zero Forcing (ZF), широко используемого в литературе для построения прекодера при использовании MU-MIMO [11].
5. Для каждого eMBB-пользователя i базовая станция назначает наиболее скоростную СКК, обеспечивающую доставку данных с вероятностью ошибок (англ.: Block Error Rate, BLER) не больше заданной.

Рассмотрим более подробно процедуру выбора номера СКК M_i для пользователя i . На основе измерений канала базовая станция оценивает эффективное значение соотношения сигнал/интерференция+шум (англ.: Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR):

$$\overline{SINR}_{i,j}(P_i, A_i) = SINR_{i,j} P_i 10^{A_i/10},$$

где $SINR_{i,j}$ – это SINR в ГРБ с номером j , полученный при измерении канала, а A_i – это корректировка SINR (в дБ), заданная алгоритмом Outer Loop Link Adaptation (OLLA) для пользователя i .

В данной работе рассматривается реализация алгоритма OLLA согласно [12]. Когда базовая станция получает отрицательное подтверждение (англ.: Negative ACKnowledgment, NACK) для пользователя i в ответ на предыдущую передачу, корректировка A_i уменьшается: $A_i = A_i - \Delta_{NACK}$. Когда базовая станция получает подтверждение (англ.: ACKnowledgment, ACK), A_i увеличивается: $A_i = A_i + \Delta_{ACK}$. Параметры Δ_{NACK} и Δ_{ACK} положительны и выбираются следующим образом: $\Delta_{ACK} = \Delta_{NACK}BLER/(1 - BLER)$, где $BLER$ – целевое значение BLER, которое должен обеспечить алгоритм OLLA. Значение целевого BLER зависит от рассматриваемого типа трафика и, как правило, устанавливается равным $BLER^{eMBB} = 0,1$ для eMBB-пользователей и $BLER^{URLLC} = PLR^{QoS}$ для URLLC-пользователей [13]. В последнем случае предполагается, что из-за строгих ограничений на время доставки URLLC-пакета совершается только одна попытка передачи.

Базовая станция выбирает СКК для пользователя i следующим образом:

$$M_i(P_i, A_i, B_i) = F(BLER_i, \{\overline{SINR}_{i,j}(P_i, A_i), j \in B_i\}), \quad (1)$$

где B_i – набор ГРБ, назначенный пользователю i , функция $F(\cdot)$ возвращает максимальный индекс СКК, который удовлетворяет требованию на долю потерянных пакетов $BLER_i$ при заданном множестве оценок SINR в назначенных ГРБ.

3.2. Перераспределение ресурсов при поступлении URLLC-пакета

Пусть на базовую станцию после начала передачи eMBB-данных поступает пакет размера S_u , адресованный URLLC-пользователю u . Базовая станция должна: (а) выбрать набор B_u ГРБ для передачи данного пакета, (б) выделить долю мощности P_u и (в) назначить СКК M_u .

В работах [3, 4] предлагается следующий простой подход для выбора параметров передачи URLLC-пользователя. Пусть в начале слота в каждом ГРБ было мультиплексировано N eMBB-пользователей, причем каждому из них была назначена равная доля мощности $P_i = 1/N$. При добавлении URLLC-пользователя мощность также распределяется равномерно между пользователями: $P'_i = 1/(N + 1)$, $i = 1, \dots, N$, а $P_u = 1/(N + 1)$. Таким образом, доля мощности eMBB-пользователей уменьшается в $(1 + 1/N)$ раз.

После назначения мощности осуществляется выбор ГРБ и СКК для URLLC-пользователя. ГРБ добавляются в множество B_u по одному, начиная с ГРБ с максимальным $SINR_{u,j}$. СКК оценивается согласно (1): $M_u = M_u(P_u, A_u, B_u)$, где A_u – это текущее значение корректировки OLLA-алгоритма для URLLC-пользователя. Процедура набора ГРБ завершается, когда $TB(|B_u|, M_u) \geq S_u$ или число назначенных ГРБ становится равным R . Функция $TB(\cdot, \cdot)$ задает объем передаваемых данных для заданного числа ГРБ и СКК в одном мини-слоте. Заметим, что из-за строгих ограничений на время доставки данных базовая станция использует один мини-слот для передачи URLLC-пакета.

После определения параметров передачи базовая станция пересчитывает прекодер. В ГРБ из множества B_u строится ZF-прекодер для N eMBB-пользователей и одного нового URLLC-пользователя.

4. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПЛАНИРОВЩИК

В данной работе предлагается изменить процедуру перераспределения ресурсов между eMBB-пользователями и URLLC-пользователями, описанную в разделе 3.2. В частности, в разделе 4.1 предложен новый способ выбора параметров передачи для URLLC-пользователя,

нацеленный на максимизацию пропускной способности eMBB-пользователей при выполнении ограничений на вероятность доставки URLLC-пакета. В разделе 4.2 предложены различные подходы перераспределения мощности между eMBB-пользователями и URLLC-пользователем.

4.1. Выбор параметров передачи URLLC-пользователя

Одним из недостатков подхода выбора параметров передачи, описанного в разделе 3.2, является назначение равной мощности eMBB-пользователям и URLLC-пользователю вне зависимости от его положения и требований к качеству обслуживания. Предварительные исследования [14] показали, что наилучшей стратегией, обеспечивающей минимальное ухудшение пропускной способности eMBB-пользователей, является назначение минимально возможной доли мощности P_u URLLC-пользователю, при которой выполнены требования к надежности доставки URLLC-пакета. Формально данная задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned} & \min P_u, \\ & \text{при условии } \begin{cases} M_u \leq M_u(P_u, A_u, B_u), \\ TB(|B_u|, M_u) \geq S_u, \\ |B_u| \leq R. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Первое ограничение соответствует тому, что выбрана СКК, которая позволяет выполнить ограничение на вероятность доставки URLLC-пакета $BLE R_u$ согласно (1). Второе ограничение соответствует тому, что выбранные СКК и набор ГРБ обеспечивают передачу пакета размера S_u . Третье ограничение означает, что для передачи URLLC-пакета не может быть выделено более R ГРБ.

Так как задача (2) является задачей смешанного целочисленного программирования с нелинейными ограничениями, то для ее решения предлагается следующий эвристический алгоритм. Создается пустое множество B_u . ГРБ добавляются в множество B_u по одному, начиная с ГРБ с максимальным $SINR_{u,j}$, $j = 1, \dots, R$. Для заданного множества B_u определяется минимальная СКК M_u такая, что $TB(|B_u|, M_u) \geq S_u$. Далее ищется минимальная доля мощности P_u , при которой $M_u = M_u(P_u, A_u, B_u)$ согласно (1). Поскольку функция $F(\cdot)$ в уравнении (1) является монотонной функцией SINR и P_u , минимальное значение P_u , удовлетворяющее ограничению, можно найти с помощью метода бинарного поиска.

Описанный выше алгоритм выполняется до тех пор, пока либо не будут назначены все ГРБ (т.е. $|B_u| = R$), либо добавление нового ГРБ не будет приводить к уменьшению P_u и M_u . Отметим, что чем меньше выбранная СКК, тем меньшая доля мощности необходима для выполнения ограничения $BLE R_u$.

4.2. Перераспределение мощности

После того, как выбраны параметры передачи для URLLC-пользователя, базовая станция должна выделить URLLC-пользователю долю мощности P_u в назначенных ему ГРБ. Так как в начале слота вся мощность была назначена eMBB-пользователям, доля мощности P_u должна быть перераспределена от eMBB-пользователей к URLLC-пользователю. В статье предлагаются три подхода для перераспределения мощности.

Первый подход соответствует описанному в разделе 3.2, и заключается в сохранении того же набора eMBB-пользователей, что и в первоначальном расписании. Поскольку для URLLC-пользователя необходимо выделить долю мощности P_u , оставшаяся мощность равномерно распределяется между N eMBB-пользователями: $P_i = (1 - P_u)/N$ для eMBB-пользователя i . Та-

Таблица 1. Параметры моделирования.

Параметр	Значение
Несущая частота	3,6 ГГц
Пропускная способность	100 МГц ($R = 16$)
Модель канала	3GPP TR 38.901
Количество антенн на БС/пользователе	64/4
Мощность БС	30 дБм
Высота БС/пользователя	30/1,5 м
Целевой BLER для eMBB/URLLC	$10^{-1}/10^{-5}$
eMBB-трафик	насыщенный трафик
URLLC-трафик	100 байт с интервалом 1 мс

ким образом, базовая станция снижает доли мощности eMBB-пользователей, умножая их на коэффициент $\epsilon_1 = (1 - P_u) < 1$.

Второй подход заключается в удалении из расписания одного eMBB-пользователя (т.е. в выделении ему нулевой мощности). В работе предлагается удалять пользователя i^* , который имеет максимальную корреляцию канала с URLLC-пользователем. Таким образом, P_{i^*} устанавливается равным 0, тогда как для других eMBB-пользователей: $P_i = (1 - P_u)/(N - 1)$. При таком подходе мощность оставшихся eMBB-пользователей умножается на коэффициент $\epsilon_2 = \frac{1 - P_u}{1 - 1/N}$. Заметим, что $\epsilon_2 < 1$, когда $P_u > 1/N$. Иными словами, при удалении одного из eMBB-пользователей мощность, назначенная другим eMBB-пользователям, снижается только тогда, когда $P_u > 1/N$.

Третий подход представляет собой комбинацию первого и второго подхода с динамическим определением необходимости удаления eMBB-пользователя. А именно, если $P_u > 1/N$ то используется второй подход с удалением одного eMBB-пользователя с максимальной корреляцией. В противном случае используется первый подход без удаления пользователей.

После перераспределения мощности базовая станция пересчитывает прекодер. Если eMBB-пользователи не удаляются из расписания, то строится ZF-прекодер для N eMBB-пользователей и одного нового URLLC-пользователя. В случае удаления строится ZF-прекодер для $(N - 1)$ eMBB-пользователей и одного URLLC-пользователя.

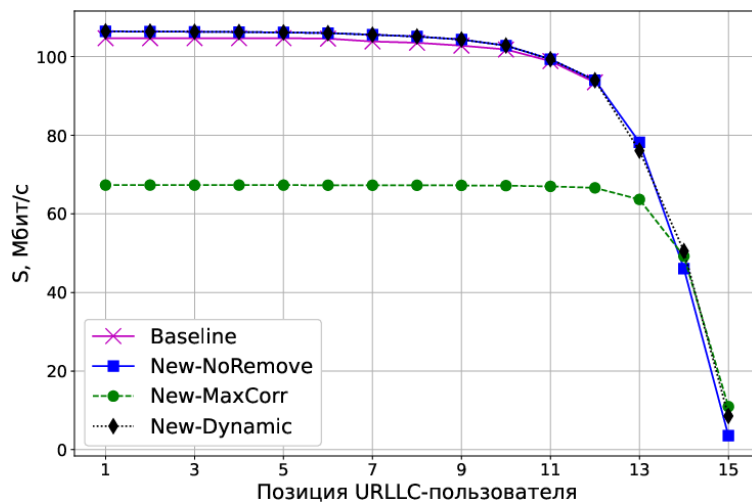
5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Постановка экспериментов

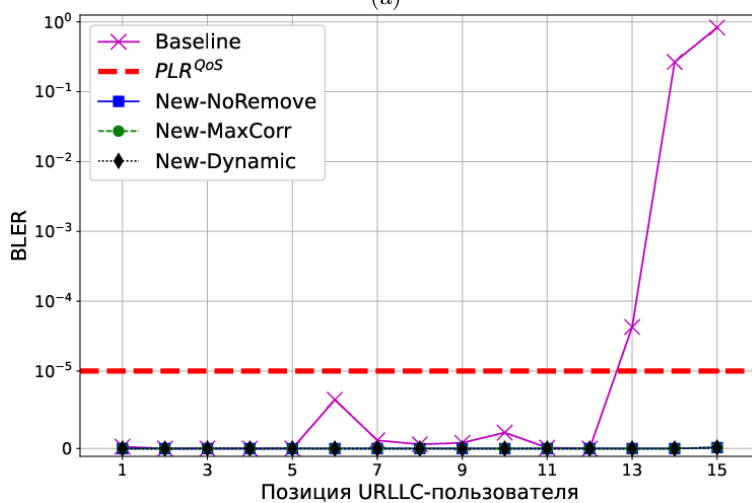
Для оценки производительности планировщиков, описанных в разделах 3 и 4, используется среда имитационного моделирования NS-3 [15]. Основные параметры моделирования представлены в Таблице 1.

Рассматривается сценарий с одной шестиугольной ячейкой (длина ребра шестиугольника равна 166,6 м), в одном из углов которой расположена базовая станция. N_{eMBB} eMBB-пользователей случайным образом размещаются внутри ячейки. Один URLLC-пользователь располагается на главной диагонали от базовой станции до противоположного угла ячейки. На диагонали выбраны 15 позиций, отстоящие друг от друга на равном расстоянии. URLLC-пользователь расположен в одной из 15 возможных позиций.

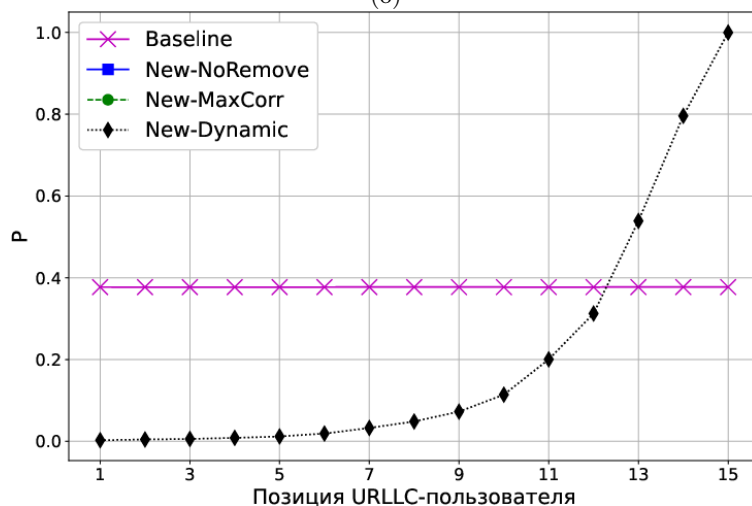
В экспериментах измеряются следующие показатели. Для каждого eMBB-пользователя i измеряется средняя пропускная способность S_i . Затем вычисляется средняя геометрическая пропускная способность: $S = (\prod_i S_i)^{1/N_{eMBB}}$. Данный показатель учитывает как спектральную эффективность, так и справедливость распределения ресурсов между пользователями. Заметим, что стратегия PF [10], используемая при назначении ГРБ, нацелена на максимизацию величины S . Для URLLC-пользователя измеряется средняя вероятность ошибочного декодирования пакета $BLER$.



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Результаты моделирования для двух eMBB-пользователей.
5.2. Анализ результатов

На рис. 2 представлены результаты моделирования для случая мультиплексирования двух eMBB-пользователей и одного URLLC-пользователя. Сравниваются следующие планировщики.

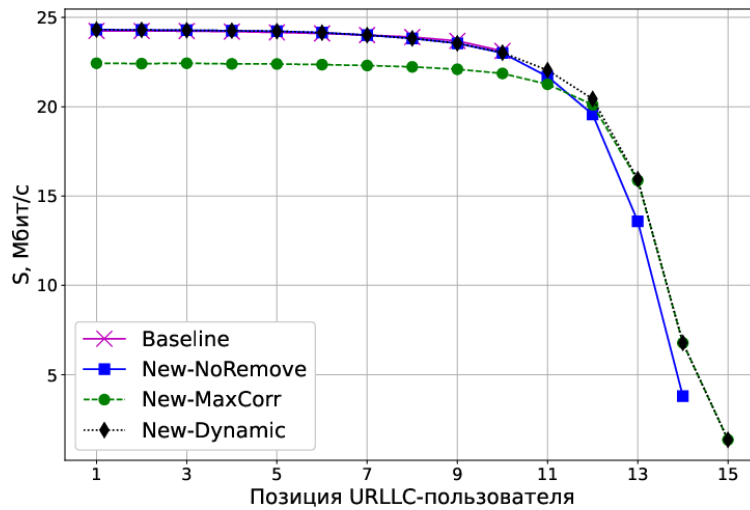


Рис. 3. Результаты моделирования для десяти eMBB-пользователей.

- *Baseline*: базовый планировщик, описанный в разделе 3.
- *New-NoRemove*: предлагаемый планировщик, у которого на этапе перераспределения мощности все eMBB-пользователи остаются в расписании.
- *New-MaxCorr*: предлагаемый планировщик, у которого на этапе перераспределения мощности удаляется один eMBB-пользователь с максимальной корреляцией с URLLC-пользователем.
- *New-Dynamic*: предлагаемый планировщик с динамическим определением необходимости удаления eMBB-пользователя.

Из рис. 2(б) можно видеть, что у планировщика *Baseline* ограничение на вероятность потери пакета PLR^{QoS} оказывается невыполненным, когда URLLC-пользователь находится на позициях с номером 13 и выше. Причиной этого является фиксированный выбор мощности P_u для URLLC-пользователя, не учитывающий его каналные условия (см.рис. 2(в)). Напротив, предлагаемый планировщик учитывает каналные условия URLLC-пользователя и выделяет минимальную долю мощности P_u , необходимую для удовлетворения ограничения PLR^{QoS} . Таким образом, за счет динамического управления мощностью предлагаемый планировщик позволяет увеличить зону покрытия сети для URLLC-пользователя.

Исследуем влияние различных подходов к перераспределению мощности, описанных в разделе 4.2, на пропускную способность eMBB-пользователей. На рис. 2(а) и 3 представлены графики зависимости пропускной способности eMBB-пользователей от позиции URLLC-пользователя. При этом рассматриваются только те позиции, в которых выполнено ограничение PLR^{QoS} для URLLC-пользователя. Можно видеть, что используемый в планировщиках *Baseline* и *New-NoRemove* подход без удаления пользователей обеспечивает большую пропускную способность в области малых расстояний до URLLC-пользователя, в то время как подход *New-MaxCorr* с удалением eMBB-пользователя оказывается эффективным в области больших расстояний до URLLC-пользователя. Данный эффект объясняется тем, что при больших расстояниях URLLC-пользователю выделяется большая доля мощности (см. рис. 2(в)). Удаление eMBB-пользователя позволяет увеличить долю мощности оставшимся eMBB-пользователям и, тем самым, уменьшить негативное влияние перераспределения мощности на пропускную способность этих пользователей. Заметим, что предложенный в разделе 4.2 подход *New-Dynamic* обеспечивает наибольшую пропускную способность при всех позициях URLLC-пользователя. Из рис. 3 можно видеть, что *New-Dynamic* обеспечивает от 15% до 60% прироста пропускной

способности по сравнению с подходом *New-NoRemove*, используемом в существующих планировщиках.

Также из рис. 3 видно, что планировщик *Baseline* выполняет ограничение на вероятность потери пакета PLR^{QoS} только до 10-й позиции. Тем самым, увеличение числа eMBB-пользователей приводит к снижению зоны покрытия сети, так как в планировщике *Baseline* доля мощности, выделяемая URLLC-пользователю, обратно пропорциональна числу eMBB-пользователей. Напротив, предложенный планировщик *New-Dynamic* обеспечивает полное покрытие при любом числе eMBB-пользователей за счет перераспределения мощности в пользу URLLC-пользователя при его удалении от базовой станции.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована проблема мультиплексирования URLLC-трафика и eMBB-трафика в нисходящем канале в системах сотовой связи пятого поколения. Рассмотрен перспективный подход для мультиплексирования двух типов трафика, основанный на использовании метода множественного доступа с использованием большого числа антенн на базовой станции MU-MIMO. Данный метод позволяет создавать новый пространственный поток для передачи срочного пакета URLLC-пользователю при сохранении передачи ранее созданных пространственных потоков eMBB-пользователей. Для эффективного использования данного метода необходимо решить ряд открытых задач: (а) как выбирать параметры передачи для URLLC-пользователя, (б) как перераспределить мощность базовой станции между пространственными потоками URLLC-пользователя и eMBB-пользователей. Для решения указанных задач, в работе предложен новый алгоритм планирования радиоресурсов, осуществляющий динамический выбор параметров передачи URLLC-пользователя и перераспределение мощности. Результаты моделирования в среде NS-3 показали, что предложенный планировщик позволяет увеличить как зону покрытия сети для URLLC-пользователей, так и пропускную способность eMBB-пользователей по сравнению с существующими решениями, представленными в литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” ITU-R. Recommendation M.2083, 2015.
2. W. Yang, C.P. Li, A. Fakoorian, K. Hosseini, W. Chen, “Dynamic URLLC and eMBB Multiplexing Design in 5G New Radio,” in IEEE 17th Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC), 2020, pp.1–5.
3. A.A. Esswie, K.I. Pedersen, “Null space based preemptive scheduling for joint URLLC and eMBB traffic in 5G networks,” in IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018, pp. 1–6.
4. A.A. Esswie, K.I. Pedersen, “Opportunistic spatial preemptive scheduling for URLLC and eMBB coexistence in multi-user 5G networks,” IEEE Access, vol. 6, pp. 38451–38463, 2018.
5. A.A. Esswie, K.I. Pedersen, “Multi-user preemptive scheduling for critical low latency communications in 5G networks,” in IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2018, pp. 136–141.
6. A. Karamyshev, E. Khorov, A. Krasilov, I.F. Akyildiz, “Fast and accurate analytical tools to estimate network capacity for URLLC in 5G systems,” Computer Networks, vol. 178, 2020.
7. 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,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 20, no. 6, pp. 2111–2123.
8. E. Khorov, A. Krasilov and A. Malyshev, “Radio resource and traffic management for ultra-reliable low latency communications,” IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2018, pp. 1–6.

9. C. Lu, W. Wang, W. Zhong, X. Gao, "User scheduling and beam allocation for massive MIMO systems with two-stage precoding," in *IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2016, pp. 1–6.
10. R. Kwan, C. Leung, J. Zhang, "Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE," *IEEE Signal Processing Letters*, vol.16, no. 6, pp. 461–464.
11. T. Yoo, A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 24, no. 3, pp. 528–541, 2006.
12. A. Duran, M. Toril, F. Ruiz, A. Mendo, "Self-optimization algorithm for outer loop link adaptation in LTE," *IEEE Communications letters*, vol. 19, no. 11, pp. 2005–2008, 2015.
13. A. Belogaev, E. Khorov, A. Krasilov, D. Shmelkin and S. Tang, "Conservative Link Adaptation for Ultra Reliable Low Latency Communications," *IEEE BlackSeaCom*, 2019, pp. 1–5.
14. A. Krasilov, I. Lebedeva, R. Yusupov, E. Khorov, "Efficient Multiplexing of Downlink eMBB and URLLC Traffic with Massive MU-MIMO," *IEEE BlackSeaCom*, 2022, pp. 1–6.
15. "Network Simulator 3." [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>

Multiplexing of URLLC and eMBB traffic in downlink channel with MU-MIMO

Lebedeva I.V., Yusupov R.R., Krasilov A.N., Khorov E.M.

In the paper, we study the problem of multiplexing Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC) and enhanced Mobile BroadBand (eMBB) traffic in the downlink channel of 5G systems. We use the Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO) technology for multiplexing, which allows a base station to transmit data simultaneously to several users in the same time-frequency resources. We propose a new scheduler that allocates time-frequency resources and transmission parameters for eMBB and URLLC users and dynamically distributes the base station transmission power between users. With extensive simulations, we show that the proposed scheduler increases the coverage for URLLC users and the throughput for eMBB users compared with the existing schedulers.

KEYWORDS: 5G, eMBB, URLLC, MU-MIMO, multiplexing, quality of service.