

# Совместный планировщик ресурсов в сетях 5G с двойным подключением для обслуживания широкополосного трафика<sup>1</sup>

М.В. Суслопаров\*, А.Н. Красилов\*, Е.М. Хоров\*

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

Поступила в редколлегию 19.02.2024 г. Принята 19.04.2024 г.

**Аннотация**—Сотовые сети пятого поколения (5G) предоставляют сервис улучшенной мобильной широкополосной связи (англ.: enhanced Mobile BroadBand, eMBB), обеспечивающий передачу данных со скоростями порядка нескольких гигабит в секунду. Одним из способов достижения таких высоких скоростей передачи данных является использование миллиметрового диапазона частот, в котором доступны широкие частотные каналы. Однако ключевым недостатком данного диапазона являются существенные флуктуации пропускной способности канала, которая может снижаться вплоть до нуля из-за появления препятствий между пользователем и базовой станцией. Для решения данной проблемы в спецификациях 3GPP вводится механизм двойного подключения, согласно которому пользовательское устройство может быть одновременно подключено к двум базовым станциям, работающим в низкочастотном и миллиметровом диапазонах. В данной работе предлагается новый планировщик ресурсов, осуществляющий совместное управление радиоресурсами базовых станций, работающих в низкочастотном и миллиметровом диапазонах и обслуживающих eMBB-трафик. С помощью имитационного моделирования показано, что предлагаемый планировщик обеспечивает увеличение суммарной пропускной способности до 20% по сравнению с решениями, предложенными в литературе, а также является устойчивым к задержке передачи служебных пакетов между базовыми станциями.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** 5G, планирование радиоресурсов, двойное подключение, широкополосный трафик.

DOI: 10.53921/18195822\_2024\_24\_1\_30

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым сервисом, предоставляемым сотовыми сетями пятого поколения (5G), является сервис улучшенной мобильной широкополосной связи (англ.: enhanced Mobile BroadBand, eMBB) [1]. В частности, сервис eMBB необходим для обслуживания трафика, генерируемого такими современными приложениями, как платформы облачного хранения данных, клиенты социальных сетей, стриминговые и музыкальные платформы, сервисы облачной виртуальной и дополненной реальности и др. Данные приложения генерируют трафик, интенсивность которого может достигать нескольких сотен Мбит/с на пользователя. В связи с этим важнейшей задачей для операторов и производителей оборудования для сетей 5G является обеспечение высокой суммарной пропускной способности сети.

Согласно спецификациям технологии 5G [2] базовые станции и пользовательские устройства могут работать в двух частотных диапазонах: (а) традиционном диапазоне частот до

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда №21-79-10431, <https://rscf.ru/project/21-79-10431/>

6 ГГц (далее низкочастотный диапазон) с доступной шириной канала до 100 МГц, (б) миллиметровом диапазоне частот 24–73 ГГц (англ.: mmWave), в котором доступны каналы шириной порядка 1 ГГц. За счет большой ширины канала пропускная способность в миллиметровом диапазоне в теории может достигать десятков Гбит/с [3]. Однако существенным недостатком миллиметрового диапазона является значительная флуктуация качества канала и, как следствие, его пропускной способности. При появлении даже малого препятствия между базовой станцией и пользователем отношение сигнал-шум (англ.: Signal-to-Noise Ratio, SNR) в канале миллиметрового диапазона сильно падает на время, существенно превышающее длительность передачи отдельной порции данных [4]. Поэтому от таких помех невозможно защититься с помощью используемых в современных сетях помехоустойчивых кодов [5, 6]. В результате скорость передачи данных может быстро снизиться с нескольких Гбит/с до десятков Мбит/с [7]. Особенно критично такое падение может быть для пульсирующего трафика реального времени, в т.ч. видеотрафика и трафика виртуальной реальности [8–10].

Для решения описанной выше проблемы спецификации 3GPP вводят функцию двойного подключения (англ.: Dual Connectivity, DC) [11]. При использовании данной функции пользовательское устройство может подключаться к двум базовым станциям, которые работают в низкочастотном и миллиметровом диапазоне соответственно. За счет использования низкочастотного диапазона в периоды ухудшения качества канала в миллиметровом диапазоне можно повысить как пропускную способность отдельных пользователей, так и общую пропускную способность сети [12, 13]. Вместе с тем, 3GPP не определяет конкретный алгоритм балансировки трафика между базовыми станциями (т.е. как разделять трафик каждого пользователя между базовыми станциями), а также алгоритм планирования радиоресурсов (планировщик) для каждой базовой станции.

В данной работе исследуются различные алгоритмы балансировки eMBB-трафика в случае двойного подключения пользователя к базовым станциям, работающим в низкочастотном и миллиметровом диапазонах. Предложен новый подход для построения совместного алгоритма планирования радиоресурсов нескольких базовых станций, основанный на обмене информацией о текущей пропускной способности подключенных к ним пользователей. Показано, что совместный алгоритм планирования радиоресурсов позволяет повысить суммарную пропускную способность сети до 20% по сравнению с использованием независимых планировщиков на каждой базовой станции без ухудшения производительности пользователей, находящихся на границе соты. Также исследовано влияние задержки между базовыми станциями на производительность предложенного планировщика.

Дальнейшее изложение работы построено следующим образом. В разделе 2 приводится подробное описание функции двойного подключения, существующих алгоритмов балансировки трафика и планирования ресурсов, а также дана постановка задачи. В разделе 3 представлен обзор литературы по теме совместного управления канальными ресурсами в сетях 5G. В разделе 4 приведено описание предложенного совместного планировщика ресурсов, а в разделе 5 представлены результаты его исследования с помощью имитационного моделирования в среде NS-3. Основные результаты работы резюмируются в разделе 6.

## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 2.1. Двойное подключение в сетях 5G

Функция двойного подключения в сетях 5G определена в спецификации [14]. При использовании данной функции пользователь устанавливает соединение одновременно с двумя базовыми станциями. В данной работе рассматривается функция двойного подключения, в которой основной базовой станцией (англ.: Master Node, MN) назначается базовая станция, работающая в низкочастотном диапазоне, а вспомогательной базовой станцией (англ.: Secondary Node,

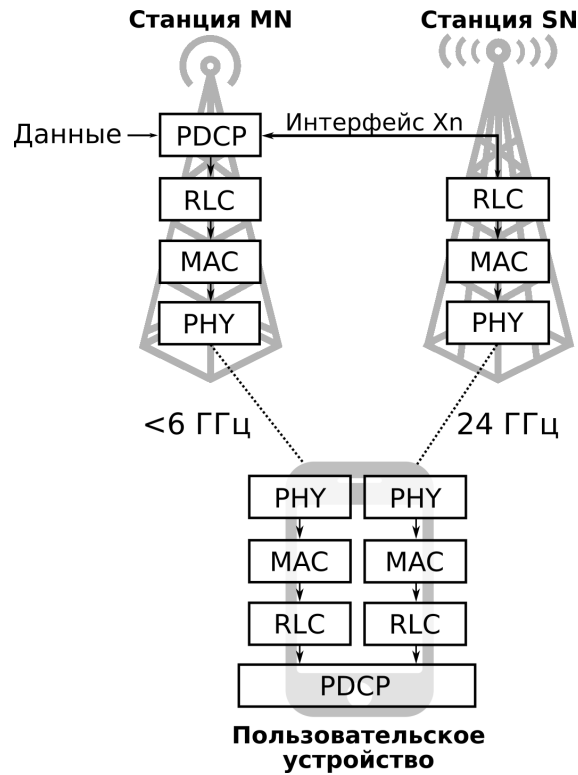


Рис. 1. Схема двойного подключения в сетях 5G.

SN) назначается базовая станция, работающая в миллиметровом диапазоне. За счет того, что базовая станция MN работает в низкочастотном канале, который обеспечивает высокую надежность доставки данных, она используется для передачи служебной информации, например, информации о параметрах подключения и команд по изменению обслуживающих базовых станций и каналов. Базовая станция SN используется для передачи пользовательских данных и повышения пропускной способности, когда в миллиметровом канале наблюдается достаточно высокий уровень сигнала.

Согласно спецификации, все данные, адресованные некоторому пользователю, сначала поступают на базовую станцию MN (см. рис. 1). Алгоритм балансировки трафика, исполняемый на базовой станции MN на уровне протокола Packet Data Convergence Protocol (PDCP), определяет, какие пакеты будут отправлены через базовую станцию MN (т.е. через низкочастотный канал), а какие будут отправлены через базовую станцию SN (т.е. через миллиметровый канал). Базовые станции MN и SN соединены проводным интерфейсом Xn с высокой пропускной способностью, через который базовая станция MN отправляет данные на базовую станцию SN.

## 2.2. Алгоритмы балансировки трафика

Спецификации 3GPP не определяют конкретного алгоритма балансировки трафика, поэтому оператор сотовой связи и/или производители телекоммуникационного оборудования самостоятельно выбирают алгоритм в зависимости от типа обслуживаемого трафика и доступных частотных ресурсов. В данной работе рассматриваются два базовых алгоритма балансировки eMBB-трафика, предложенные в литературе: (а) переключение между базовыми станциями и (б) разбиение данных.

При использовании первого алгоритма все данные передаются через одну из базовых станций. Выбор активной базовой станции, с помощью которой будет вестись передача, осуществ-

ляется на основе текущего значения метрики соответствующего соединения между пользователем и базовой станцией. Наиболее распространенной метрикой, рассматриваемой в литературе, является усредненное по всему каналу отношение сигнал-шум [14]. Однако данная метрика не учитывает существенной разницы в ширине канала между низкочастотным каналом и миллиметровым каналом. Одним из способов учесть ширину канала является использование метрики емкости канала, которая оценивается для каждого пользователя исходя из среднего SNR и ширины канала, например, по формуле Шеннона [15]. Поскольку емкость миллиметрового канала может значительно меняться со временем, для уменьшения частоты переключений значение метрики необходимо усреднять. Заметим, что метрика емкости канала не учитывает различную нагрузку (число активных пользователей) каждой базовой станции. Чтобы учесть этот фактор, в работе [16] предлагается метрика эффективной пропускной способности. Данная метрика рассчитывается как отношение емкости канала для данного пользователя к числу активных пользователей в данном канале (для данной базовой станции). При построении метрики предполагается, что планировщик ресурсов на каждой базовой станции назначает равную долю ресурсов каждому пользователю. Далее в разделе 5 для алгоритма переключения между базовыми станциями используется метрика эффективной пропускной способности.

В работе [17] предложен алгоритм, который осуществляет разбиение данных в заданной пропорции. В частности, авторами предложено разделять данные в пропорции значений емкости канала для соединений с базовыми станциями MN и SN. Показано, что при передаче конечного объема данных данный алгоритм позволяет минимизировать полное время доставки данных.

### *2.3. Планировщик ресурсов*

После распределения трафика на уровне PDCP планировщик ресурсов, работающий на уровне Medium Access Control (MAC) каждой базовой станции, назначает каналные ресурсы для передачи данных конкретным пользователям. В частности, каждый временной слот базовая станция осуществляет назначение частотных ресурсов (ресурсных блоков) пользователям. Для каждого ресурсного блока пользователи сортируются согласно некоторой метрике, и ресурсный блок назначается пользователю с максимальным значением метрики.

Одним из самых распространенных алгоритмов планирования радиоресурсов для eMBB-трафика является планировщик Proportional Fair (PF) [18], который обеспечивает баланс между общей пропускной способностью сети и справедливостью распределения каналных ресурсов между пользователями. Как показано во многих работах, в частности [18], планировщик PF предоставляет каждому пользователю в среднем равную долю ресурсных блоков.

Заметим, что алгоритм планирования должен выполняться за время порядка слота. В миллиметровом диапазоне длительность слота составляет сотни микросекунд. В данной работе мы предполагаем, что базовые станции MN и SN являются различными физическими устройствами, соединенные проводным интерфейсом. С учетом указанных выше ограничений на время выполнения базовым решением является то, что каждая базовая станция независимо выполняет алгоритм планирования, используя локальную информацию, доступную на данной базовой станции.

### *2.4. Влияние задержки интерфейса Xn*

Базовые станции MN и SN обмениваются пользовательскими и служебными данными через специальный интерфейс Xn (см. рис. 1). В частности, используя интерфейс Xn, базовые станции обмениваются такой служебной информацией, как текущие значения SNR пользователей и команды по их переключению. Также интерфейс Xn используется для передачи

пользовательских данных от базовой станции MN к базовой станции SN. Во многих работах [12, 15, 17, 22] предполагается, что интерфейс Xn представляет собой высокоскоростное проводное соединение с практически нулевой задержкой. Однако в реальных сетях задержка интерфейса Xn может быть большой и существенно меняться со временем, например, из-за резкого увеличения интенсивности трафика между базовыми станциями, что может приводить к резкому увеличению задержки и длины очереди на отправляющей базовой станции. Заметим, что высокая задержка передачи пользовательских и служебных данных через интерфейс Xn может негативно повлиять на производительность рассматриваемых алгоритмов балансировки трафика и планировщиков ресурсов. В связи с этим, в данной работе детально исследуется влияние задержки интерфейса Xn на качество обслуживания широкополосного трафика при использовании различных алгоритмов балансировки трафика и планирования радиоресурсов.

### 2.5. Постановка задачи

Целью данной работы являются разработка и исследование алгоритмов управления обслуживанием широкополосного трафика в сетях 5G с двойным подключением, а именно алгоритмов балансировки трафика и планирования радиоресурсов, с целью повышения суммарной пропускной способности сети  $C_{sum}$ , т.е. объема данных, доставляемых пользователям обеими базовыми станциями MN и SN за единицу времени. При этом предлагаемое решение должно обеспечивать баланс между пропускной способностью и справедливостью распределения ресурсов между пользователями. В данной работе в качестве критерия справедливости распределения ресурсов рассматривается 5% квантиль  $C_{5\%}$  распределения пропускных способностей пользователей [20]. Таким образом, предлагаемое решение должно повышать величину  $C_{sum}$  и не снижать  $C_{5\%}$ .

## 3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Рассмотрим существующие методы управления радиоресурсами для широкополосного трафика при одновременном обслуживании пользователей несколькими базовыми станциями. Распространенным методом совместного управления канальными ресурсами базовых станций является централизованное управление (англ.: Centralized Radio Resource Management, Centralized RRM), реализуемое за счет виртуализации сетевых функций (англ.: Network Functions Virtualization, NFV), доступной в сетях 5G. В схеме централизованного управления радиоресурсами за планирование ресурсов базовых станций сети отвечает отдельное устройство, расположенное в ядре сети, что позволяет гибко управлять назначением канальных ресурсов и снизить вычислительную нагрузку на базовых станциях сети.

Исследованию централизованного управления радиоресурсами посвящено множество работ. Например, предложенный в [21] планировщик решает задачу повышения пропускной способности сети за счет распределения ресурсных блоков низкочастотного и миллиметрового диапазонов между eMBB-пользователями и URLLC-пользователями. В [22] предложено перенести планировщики базовых станций, работающих в режиме двойного/множественного подключения, на центральное устройство, которое управляет канальными ресурсами всех базовых станций. В спецификации 3GPP [23] описана функция координированной множественной передачи (англ.: Coordinated MultiPoint, CoMP), целью которой является снижение интерференции с помощью централизованного управления радиоресурсами. В [24] авторы используют функцию CoMP и метод неортогонального множественного доступа (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) и разрабатывают централизованный алгоритм управления параметрами передачи для повышения энергоэффективности передачи в нисходящем канале.

Заметим, что для реализации централизованного управления радиоресурсами необходимо обеспечить передачу больших объемов служебной информации на центральный узел, который использует данную информацию для решения задач оптимизации с высокими требованиями к вычислительным ресурсам. Это, в свою очередь, приводит к существенному увеличению времени принятия решений при планировании ресурсов сети. Учитывая, что длительность слота миллиметровых базовых станций составляет несколько сотен микросекунд, задержка интерфейса Xn даже в несколько миллисекунд делает невозможным использование централизованных алгоритмов управления радиоресурсами. По этой причине в данной работе предлагается новый подход к планированию радиоресурсов, при котором базовые станции локально управляют канальными ресурсами, но обмениваются информацией о качестве соединений с подключенными к ним пользователями (например, SNR пользователя или средняя скорость отправки ему данных) и используют данную информацию при выборе обслуживаемого в данном слоте пользователя.

#### 4. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПЛАНИРОВЩИК РЕСУРСОВ

Рассмотрим сеть, состоящую из множества базовых станций  $\mathcal{S}$  и множества пользователей  $\mathcal{U}$ . Пользователь может быть подключен к нескольким базовым станциям. Обозначим за  $r_{u,s,b}(t)$  скорость передачи данных базовой станцией  $s$  пользователю  $u$  в ресурсном блоке  $b$  в слоте  $t$ . Если пользователь не подключен к базовой станции, то соответствующее значение  $r_{u,s,b}(t) = 0$ . В слоте  $t$  каждая базовая станция осуществляет назначение ресурсов. Пусть  $\alpha_{u,s,b}(t)$  – индикатор, который равен единице, если ресурсный блок  $b$  назначен пользователю  $u$ , и равен нулю в противном случае. Для каждого пользователя базовая станция оценивает среднюю пропускную способность:

$$R_{u,s}(t) = (1 - \gamma)R_{u,s}(t - 1) + \gamma \sum_b r_{u,s,b}(t)\alpha_{u,s,b}(t),$$

где  $0 < \gamma < 1$  – параметр сглаживания.

Как отмечено в разделе 2.3, в данной работе предполагается, что базовые станции являются различными физическими устройствами, которые независимо выполняют процедуру планирования ресурсов. Планировщик PF, запущенный на каждой базовой станции, осуществляет распределение ресурсов следующим образом. Для каждого ресурсного блока все пользователи сортируются согласно метрике

$$m_{u,s,b}^{PF}(t) = \frac{r_{u,s,b}(t)}{R_{u,s}(t - 1)}.$$

Ресурсный блок назначается пользователю с максимальным значением метрики. Заметим, что при таком способе планирования каждая базовая станция использует только локальную информацию о соединениях с подключенными к ней пользователями.

В данной работе предлагается следующий подход к совместному планированию радиоресурсов. Используя интерфейс Xn, базовые станции периодически обмениваются текущими значениями пропускных способностей различных пользователей  $R_{u,s}(t)$ . Метрика назначения ресурсов для базовой станции  $s$  изменяется следующим образом:

$$m_{u,s,b}^{new}(t) = \frac{r_{u,s,b}(t)}{R_{u,s}(t - 1) + \sum_{s' \neq s} R_{u,s'}^{last}},$$

где  $R_{u,s'}^{last}$  – последнее полученное от базовой станции  $s'$  значение скорости передачи данных пользователю  $u$ . Данная метрика учитывает, что пользователь, который получил много ресурсов от одной базовой станции, будет иметь меньший приоритет при доступе к ресурсам

Таблица 1. Основные параметры имитационной модели.

Параметр	Значение
Сценарий	3GPP Dense Urban [25]
Ширина низкочастотного канала	100 МГц
Несущая частота низкочастотного канала	3,6 ГГц
Ширина миллиметрового канала	1 ГГц
Несущая частота миллиметрового канала	24 ГГц
Мощность базовых станций	30 дБм
Высота базовых станций	30 м
Высота пользовательского устройства	1,5 м
Трафик	Насыщенный
Длительность эксперимента	60 с
Количество независимых прогонов	100

на другой базовой станции. Например, если пользователь находится близко к миллиметровой базовой станции и получает высокую пропускную способность, он будет получать меньшую пропускную способность от низкочастотной базовой станции, что, в свою очередь, освободит ресурсы для обслуживания дальних пользователей.

По сравнению с централизованными планировщиками, предложенными в литературе (см. раздел 3), предлагаемый планировщик не требует развертывания отдельного узла в ядре сети и генерирует значительно меньшие объемы служебной информации. Кроме того, как показывают результаты, представленные в разделе 5, планировщик оказывается устойчивым даже к значительному увеличению задержки на интерфейсе Xn.

## 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 5.1. Постановка экспериментов

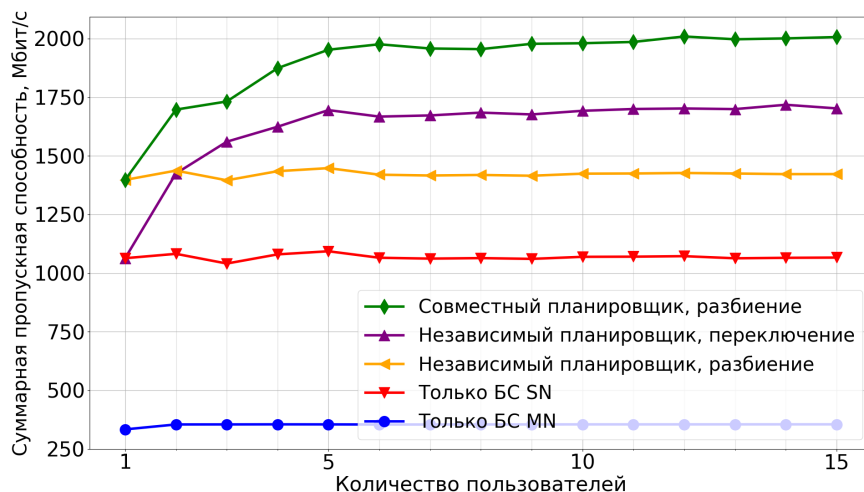
Для исследования описанных выше алгоритмов управления обслуживанием широкополосного трафика, а также влияния задержки интерфейса Xn, используется среда имитационного моделирования NS-3 [26]. Значения основных параметров, используемых при моделировании, представлены в таблице 1.

В данной работе рассматривается сценарий 3GPP Dense Urban, описанный в спецификации [25]. Рассматриваются две базовые станции, одна из которых работает в низкочастотном диапазоне (базовая станция MN), а другая работает в миллиметровом диапазоне частот (базовая станция SN). Обе базовые станции расположены в одной из вершин шестиугольной соты и соединены интерфейсом Xn с заданной задержкой передачи данных. Пользовательские устройства случайно размещены внутри соты и подключены к обеим базовым станциям с помощью функции двойного подключения. Сервер генерирует пользовательские данные со скоростью, всегда превышающей суммарную пропускную способность беспроводных каналов (модель Full Buffer). Рассматриваются следующие планировщики ресурсов.

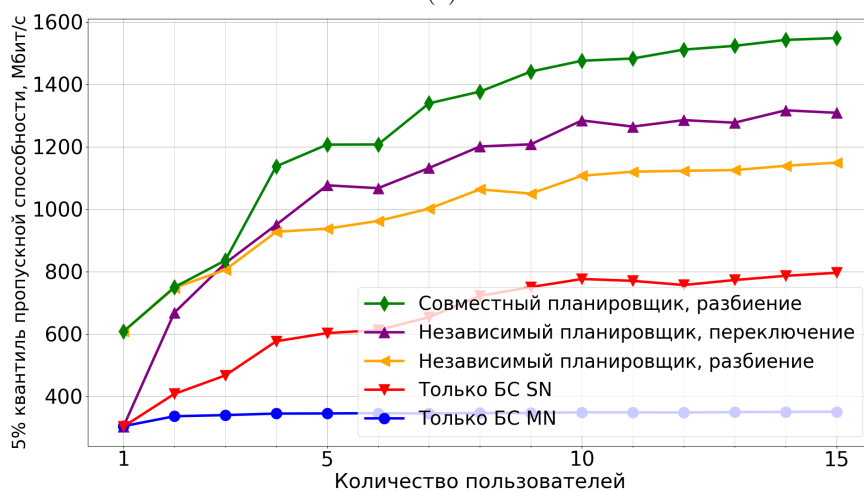
- Независимый планировщик: каждая базовая станция независимо осуществляет распределение радиоресурсов с помощью планировщика RF.
- Совместный планировщик, предложенный в разделе 4.

Также рассматриваются два алгоритма балансировки трафика, описанные в разделе 2.2: (а) переключение между базовыми станциями и (б) разбиение данных.

В качестве показателей эффективности рассматриваемых решений используются суммарная пропускная способность сети и 5%-ный квантиль распределения пропускной способности по пользователям.



(а)



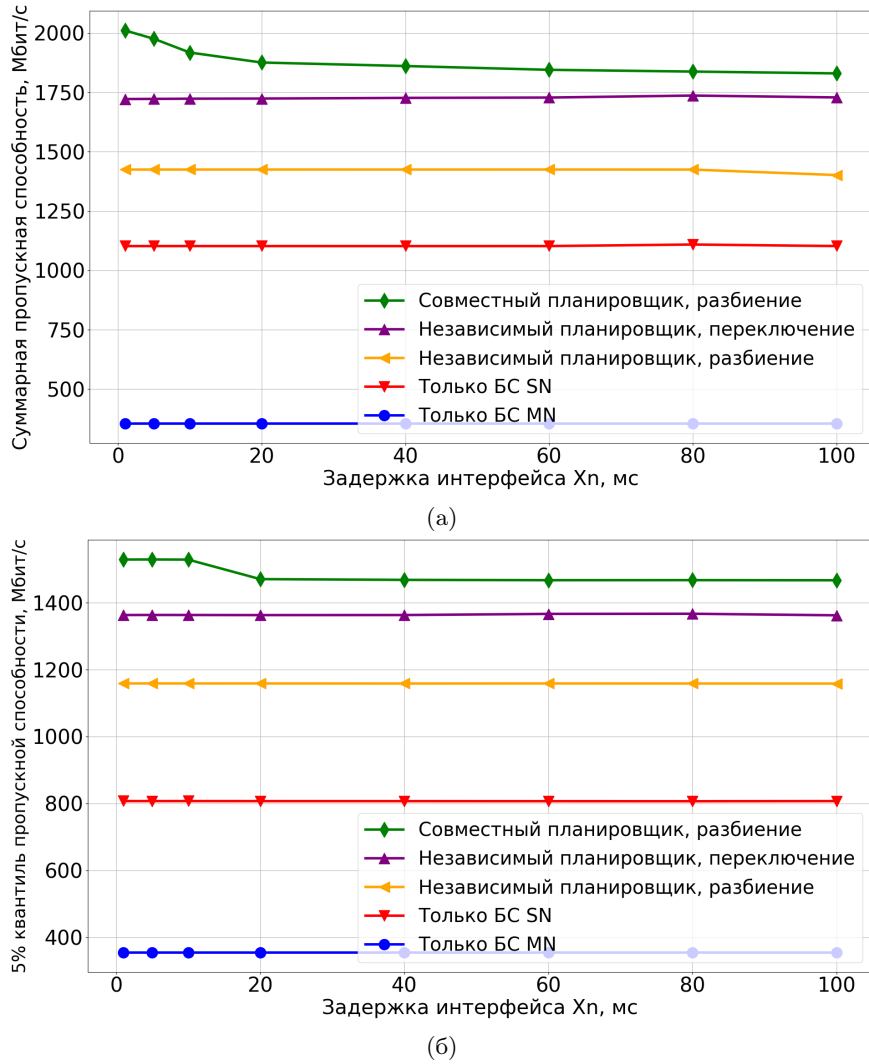
(б)

**Рис. 2.** Графики зависимости (а) суммарной пропускной способности сети, (б) 5%-ного квантиля пропускной способности от количества пользователей.

### 5.2. Анализ результатов

На рис. 2(а) представлена зависимость суммарной пропускной способности (СПС) от количества подключенных пользователей. Результаты показывают, что использование совместного планировщика обеспечивает увеличение СПС до 20% по сравнению с использованием независимого планировщика и алгоритма переключения. Метрика приоритета пользователей в предложенном планировщике ресурсов зависит от качества обоих каналов, связанных с определенным пользователем, за счет чего достигается более гибкое распределение каналных ресурсов по сравнению с независимым планировщиком. В случае одного пользователя разбиение данных обеспечивает более высокую СПС, чем переключение каналов, поскольку при разбиении данных используются каналные ресурсы и низкочастотного и миллиметрового диапазонов, тогда как переключение каналов при данном размере соты выбирает преимущественно станцию SN. При большем количестве пользователей алгоритм переключения каналов группирует пользователей по станциям в зависимости от качества соответствующих каналов и чаще использует базовую станцию MN, что повышает среднюю скорость передачи данных. В случае независимого планировщика и алгоритма разбиения данных планировщик станции SN назначает каналные ресурсы равномерно всем пользователям сети. По сравнению с алгоритмом разбиения данных алгоритм переключения каналов повышает СПС за счет полного переключения





**Рис. 3.** График зависимости (а) суммарной пропускной способности сети, (б) 5%-ного квантиля пропускной способности от задержки интерфейса  $X_n$ .

пользователей, находящихся далеко от базовых станций, на станцию MN, что освобождает каналные ресурсы для пользователей, находящихся близко к базовым станциям.

На рис. 2(б) представлен график зависимости 5%-ного квантиля пропускной способности от количества пользователей. Решение, включающее в себя совместный планировщик и алгоритм разбиение данных, показывает повышение значения 5%-ного квантиля до 20% относительно других решений. Таким образом, данное решение также обеспечивает справедливое распределение ресурсов сети между пользователями.

На рис. 3 представлена зависимость СПС и 5%-ного квантиля пропускной способности от задержки интерфейса  $X_n$ . Видно, что в случае использования совместного планировщика ресурсов повышение задержки интерфейса между базовыми станциями приводит к небольшому снижению пропускной способности сети (не более чем на 10% при задержке до 20 мс), то есть данное решение устойчиво к увеличению задержки интерфейса  $X_n$ . Также заметим, что даже при значениях задержки порядка сотни миллисекунд совместный планировщик ресурсов по прежнему обеспечивает наибольшую суммарную пропускную способность среди рассмотренных решений.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен планировщик ресурсов, реализующий совместное управление каналными ресурсами нескольких базовых станций сетей 5G, работающих в низкочастотном и миллиметровом диапазонах. Предлагаемый планировщик использует информацию о качестве соединений других базовых станций с пользователями для эффективного назначения ресурсов.

Результаты имитационного моделирования показывают, что использование предложенного планировщика обеспечивает прирост суммарной пропускной способности сети и 5%-ного квантиля пропускной способности пользователей до 20%. Исследована устойчивость предложенного планировщика ресурсов к изменению задержки интерфейса между базовыми станциями.

В дальнейших работах планируется исследовать другие методы совместного использования каналов в различных частотных диапазонах и алгоритмы балансировки трафика, а также изучить методы обслуживания гетерогенного трафика, представляющего собой смесь широкополосного трафика и трафика со строгими ограничениями к задержке и надежности (например, трафика виртуальной и дополненной реальности), в том числе с использованием кросс-уровневого взаимодействия [27].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-R. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, 2015.
2. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2, Technical Specification (TS), Version 18.1.0, 2024.
3. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Study on self evaluation towards IMT-2020 submission, Technical Report (TR) 37.910, Version 17.0.0, 2022
4. Khorov E., Krasilov A., Susloparov M., Kong L., *Boosting TCP & QUIC Performance in mmWave, Terahertz, and Lightwave Wireless Networks: A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 4, pp. 2862–2891, 2023.
5. Trifonov P.V. Design and Decoding of Polar Codes with Large Kernels: A Survey. *Problems of Information Transmission*, vol. 59, no. 1, pp. 22–40, 2023.
6. Uglovskii A. Y., Melnikov I. A., Alexeev I. A., and Kureev A. A. Effective Error Floor Estimation Based on Importance Sampling with the Uniform Distribution, *Problems of Information Transmission*, vol. 59, no. 4, pp. 217–224, 2023.
7. Hemadeh I. A., Satyanarayana K., El-Hajjar M., Hanzo L. Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 870–913.
8. Lichtzinder B. Y., Privalov A. Y., Moiseev V. I., Batch Poissonian Arrival Models of Multiservice Network Traffic, *Problems of Information Transmission*, vol. 59, no. 1, pp. 63–70, 2023.
9. Lichtzinder B. Y. and Privalov A. Y. Generalization of Formulas for Queue Length Moments under Nonordinary Poissonian Arrivals for Batch Queues in Telecommunication Systems. *Problems of Information Transmission*, vol. 59, no. 4, pp. 243–248, 2023.
10. Liubogoshchev M., Ragimova K., Lyakhov A., Tang S., Khorov E. Adaptive Cloud-Based Extended Reality: Modeling and Optimization. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35287–35299, 2021.
11. Susloparov M., Krasilov A., Khorov E., Providing High Capacity for AR/VR traffic in 5G Systems with Multi-Connectivity, in *2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 385–390, 2022.
12. Weedage L., Stegehuis C., Bayhan S. Impact of Multi-Connectivity on Channel Capacity and Outage Probability in Wireless Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, vol. 72, no. 6, pp. 7973–7986.

13. Polese M., Mezzavilla M., Zorzi M.. Performance Comparison of Dual Connectivity and Hard Handover for LTE-5G Tight Integration. *Proceedings of the 9th EAI International Conference on Simulation Tools and Techniques*. Prague: Czech Republic, 2016, pp. 118–123.
14. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and NR; Multi-connectivity; Stage 2, Technical Specification (TS) 37.340, Version 17.1.0, 2022.
15. Poirot V., Ericson M., Nordberg M., Andersson K. Energy efficient multi-connectivity algorithms for ultra-dense 5G networks. *Wireless Networks*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 2207–2222.
16. Son K., Chong S., Veciana G. Dynamic Association for Load Balancing and Interference Avoidance in Multi-cell Networks. *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops*, 2007, pp. 1–10.
17. Mumtaz T., Muhammad S., Aslam M. I., Mohammad N. Dual Connectivity-Based Mobility Management and Data Split Mechanism in 4G/5G Cellular Networks. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 86495–86509.
18. Kelly F.P. Charging and Rate Control for Elastic Traffic. *European Transactions on Telecommunications*, 1997, vol. 8.
19. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). NR; Integrated Access and Backhaul (IAB) radio transmission and reception, Technical specification (TS) 38.174, Version 18.4.0, 2024.
20. Garcia-Morales J., Femenias G., Riera-Palou F.. Statistical Analysis and Optimization of a Fifth-Percentile User Rate Constrained Design for FFR/SFR-Aided OFDMA-Based Cellular Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 67, no. 4, pp. 3406–3419.
21. Zhang K. et al. Dynamic Multiconnectivity Based Joint Scheduling of eMBB and uRLLC in 5G Networks. *IEEE Systems Journal*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 1333–1343.
22. Antonioli R. P., Pettersson J., Maciel T. F. Split Responsibility Scheduler for Multi-Connectivity in 5G Cellular Networks. *IEEE Network*, 2020, vol. 34, no. 6, pp. 212–219.
23. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects, Technical Report (TR) 36.819, Version 11.2.0, 2013.
24. Moltafet M., Joda R., Mokari N., Sabagh M. R., Zorzi M. Joint Access and Fronthaul Radio Resource Allocation in PD-NOMA-Based 5G Networks Enabling Dual Connectivity and CoMP. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 6463–6477.
25. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, Technical Report (TR) 38.901, Version 17.0.0, 2022.
26. Network Simulator 3. – Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
27. Akyildiz I. F., Khorov E., Kiryanov A., Kovkov D., Krasilov A., Liubogoshchev M., Shmelkin D., Tang S., xStream: A New Platform Enabling Communication Between Applications and the 5G Network, in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, 2018.

## Joint Scheduler in 5G Systems with Multi-Connectivity for Improving eMBB Quality of Service

M.V. Susloparov, A.N. Krasilov, E.M. Khorov

5G cellular systems support an enhanced Mobile BroadBand (eMBB) service, which provides broadband traffic throughput of several Gbps. The millimeter-wave frequency range can be used to greatly increase network throughput as it offers wide frequency channels. However, the millimeter-wave channel capacity may quickly fluctuate and even drop to zero because of obstacles appearing between base stations and users. To solve this problem, 3GPP defines the Dual Connectivity feature that allows connecting user equipment to two base stations operating in low-frequency and millimeter-wave frequency ranges simultaneously. We propose a new scheduler which jointly

manages low-frequency and millimeter-wave channel resources and improves the quality of eMBB traffic service. Simulation results show that the proposed scheduler provides up to a 20 percent increase in total network throughput compared with the state-of-the-art solutions and preserves high throughput in the case of variable latency of control data transmitted between the base stations.

**KEYWORDS:** 5G, joint scheduler, dual connectivity, eMBB, broadband traffic