



**Теоретические вопросы информатики, прикладной математики,
компьютерных наук и когнитивно-информационных технологий**

<https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.828-836>

УДК 004

Разработка алгоритма управления расписанием для снижения задержек в полудуплексной сети интегрированного доступа и транзита

А. А. Живцова

Оригинальная статья

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

aazhivtsova@sci.pfu.edu.ru

Аннотация

Для обеспечения высокой скорости передачи в мобильных сетях пятого поколения (5th Generation, 5G) предусмотрено использование высокочастотного радиоспектра, отличающегося высокими потерями распространения и требующего уплотнения сети. Один из вариантов развертывания плотных сетей 5G основывается на технологии интегрированного доступа и транзита (Integrated Access and Backhaul, IAB), позволяющей использовать не подключенные к опорной сети ретрансляционные узлы в качестве дополнительных точек доступа. Для минимизации влияния интерференции в сформированной сети многошаговой беспроводной передачи предполагается использование полудуплексного режима, ограничивающего множество каналов, по которым передача может происходить одновременно. Вследствие этого возникает необходимость в управлении расписанием передачи в сети. В данной работе рассмотрены алгоритмы класса максимальных весов, обеспечивающие оптимальное по пропускной способности, централизованное управление расписанием передачи. Особое внимание уделяется показателю сквозной задержки пакетов, как одному из ключевых показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS). На основе особенностей сети IAB разрабатывается алгоритм управления расписанием передачи. Численное моделирование различных алгоритмов управления в сети IAB, параметризованной в соответствии с рекомендациями стандарта сетей 5G, показывает, что предложенный алгоритм превосходит конкурентов по средней задержке.

Ключевые слова: 5G, интегрированный доступ и транзит, полудуплексный режим, многошаговые сети с интерференцией, расписание передачи, качество обслуживания, задержка пакетов

Финансирование: публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Живцова А. А. Разработка алгоритма управления расписанием для снижения задержек в полудуплексной сети интегрированного доступа и транзита. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 4. С. 828-836. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.828-836>

© Живцова А. А., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



**Theoretical Questions of Computer Science, Computational Mathematics,
Computer Science and Cognitive Information Technologies**

Link Scheduling Algorithm for Delay Reduction in Half-Duplex Integrated Access and Backhaul Network

A. A. Zhivtsova

Original article

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

Address: 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation

aazhivtsova@sci.pfu.edu.ru

Abstract

To achieve high data transmission rates in fifth-generation (5G) mobile networks, the use of high-frequency radio spectrum is envisaged. However, these frequency bands are characterized by significant propagation losses, making network densification necessary. One of the approaches to deploying dense 5G networks is based on the Integrated Access and Backhaul (IAB) technology, which enables relay nodes without direct connectivity to the core network to operate as additional access points. To mitigate interference in the resulting multi-hop wireless network, a half-duplex transmission mode is assumed, restricting the set of links that can be simultaneously active. Consequently, efficient transmission scheduling becomes a critical requirement.

This paper investigates scheduling algorithms belonging to the Max-Weight class, which provide centralized throughput-optimal transmission scheduling. Particular attention is paid to end-to-end packet delay, one of the key Quality of Service (QoS) metrics. Taking into account the specific characteristics of IAB networks, a transmission scheduling algorithm is developed. Numerical simulations of various scheduling algorithms in an IAB network parameterized according to the recommendations of the 5G standards demonstrate that the proposed algorithm outperforms competing approaches in terms of average packet delay.

Keywords: 5G, Integrated Access and Backhaul, IAB, half-duplex, multi-hop networks, link scheduling, Quality of Service, QoS, delay

Funding: This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Zhivtsova A.A. Link Scheduling Algorithm for Delay Reduction in Half-Duplex Integrated Access and Backhaul Network. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(4):828-836. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.828-836>



Введение

Цифровизация многих сфер человеческой деятельности в рамках перехода к индустрии 4.0 влечет за собой потребность в обеспечении надежной, глобальной, быстрой, пространственно емкой и эффективной связью. Этим требованиям удовлетворяет стандарт сетей пятого поколения, позволяющий обслуживать до миллиона абонентов на квадратный километр, предоставляя возможность передачи с ультра малой ($< 5\text{мс}$) задержкой и скорость передачи данных до 20 Гбит/с^1 .

Переход операторов связи к новому стандарту передачи данных представляет собой комплекс ресурсоемких процедур начиная от изучения технологии и заканчивая закупкой и установкой оборудования. Для более быстрого развертывания плотных сетей 5G, стандартизирующие организации ввели технологию интегрированного доступа и транзита (*Integrated Access and Backhaul, IAB*)².

Технология интегрированного доступа и транзита позволяет операторам связи осуществить переход к сетям пятого поколения планомерно. Устанавливая сеть IAB, состоящую из опорных и ретрансляционных узлов, оператор начинает предоставлять услуги 5G и имеет возможность в будущем оснастить ретрансляционные узлы сети доступом к опорной сети и усовершенствовать качество обслуживания [1-3].

Интерференция, возникающая в беспроводной сети интегрированного доступа и транзита с многошаговой передачей данных, приводит к необходимости использования полудуплексного режима передачи, в котором каждый узел сети не может одновременно получать и передавать данные, а также одновременно взаимодействовать с пользователями и узлами сети. Такой режим доступа к среде предусматривает наличие расписания передачи, указывающего группу каналов, ведущих передачу в каждый момент времени. Постепенно расширяясь, задача построения алгоритма управления расписанием изучается на протяжении последних 30 лет [4-16]. Исследования по данной тематике включают в себя построение централизованных и децентрализованных алгоритмов управления с различными характеристиками сложности, пропускной способности и задержки пакетов. Так, в классе централизованных алгоритмов можно выделить алгоритмы типа *max weight* [4-8], жадные [9, 10] и рандомизированные алгоритмы [11]. Для этих алгоритмов, также как и для децентрализованных алгоритмов, основанных на случайном доступе [12] выведены теоретические доказательства и оценки характеристик в различных предположениях о работе системы [13-15]. Напротив, децентрализованные алгоритмы, основанные на локальном обмене данными изучены в немногих

условиях [16]. Среди упомянутых алгоритмов оптимальными по пропускной способности являются алгоритмы типа *max weight*, рандомизированные и основанные на случайном доступе алгоритмы, хотя последние два отличаются от первого значительными задержками пакетов.

Описанные выше классы алгоритмов применяются к сети интегрированного доступа и транзита [17-22]. Отмечая важность поддержания трафика с требованиями к обслуживанию (*Quality of Service, QoS*), в частности к задержке в сетях IAB различной конфигурации, в данной работе, мы сосредоточимся на алгоритмах класса *max weight*, разработаем алгоритм управления расписанием и сравним с известными алгоритмами *backpressure* [4], *delay-based backpressure* [8] и $\alpha\beta$ [6], оценивая 99% перцентиль среднее значение задержки пакетов. Численный эксперимент показал, что предложенный алгоритм превосходит известные по средней задержке.

Технология интегрированного доступа и транзита (IAB)

Пятое поколение мобильной связи предусматривает использование миллиметрового диапазона частот. Выход в новый, свободный спектр, позволил обеспечить большую полосу пропускания и, следовательно, большую скорость передачи данных, большее количество обслуживаемых абонентов, большее разнообразие предоставляемых услуг. Однако при существенном снижении длины волны радиосигнала увеличиваются и потери при распространении сигнала. Следовательно, пятое поколение мобильной связи отличается меньшим радиусом соты. При развертывании данной сети это влечет необходимость увеличения числа базовых станций на единицу площади. Так как установка базовой станции и подключение ее к опорной сети - ресурсозатратное мероприятие, 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*) предложил использовать интегрированный доступ и транзит (*Integrated Access and Backhaul, IAB*) [2].

Использование данной технологии подразумевает разделение точек доступа на два типа: доноры и ретрансляторы. Ретрансляторы содержат распределенный модуль (*Distributed Unit, DU*), не имеют проводного доступа к опорной сети и передают данные ассоциированных устройств донору, по беспроводному каналу. Доноры, помимо распределенного модуля, содержат центральный модуль (*Central Unit, CU*) и имеют доступ к транспортной оптоволоконной сети. Донор с ретрансляторами образует IAB сеть [23-25].

Транзитное соединение между точками доступа отличается от соединений точки доступа с пользователями, во-первых, возможностью использования крупных антенных решеток и, во-вторых, формированием направленного луча [2]. Эти различия позволяют увеличить скорость передачи данных между точками доступа. Технология IAB может

¹ Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета : монография / Д. А. Молчанов, В. О. Бегишев, К. Е. Самуйлов, Е. А. Кучерявый. Москва : РУДН, 2022. 516 с. EDN: LLLEAE

² 3GPP, "Study on Integrated Access and Backhaul," Technical Report (TR) 38.874, 3GPP, 12 2018. Version 16.0.0. 2018.



быть использована для сценария микро сот, для поддержания покрытия внутри помещений или для реализации концепции фиксированного беспроводного доступа [1].

Модель сети IAB

Будем строить модель в дискретном времени с номером такта $t = 0, 1, 2 \dots$ и представим сеть интегрированного доступа и транзита, как направленных граф, узлами которого являются донор IAB сети, ретрансляционные IAB узлы и группы пользователей, подключенных к одной точке доступа (донору или ретранслятору), ребрами графа являются каналы передачи данных. С каждой группой пользователей ассоциировано по два потока данных: восходящий (от пользователей к донору) и нисходящий (от донора к пользователю). Всего в системе F потоков данных. Каналы в пути потока f пронумерованы от 1 до H_f . Число всех каналов в сети обозначим E . Каждый канал в системе

обозначается парой (f, h) , $h=1, \dots, H_f$ и может передавать до $c_{(f,h)}$ пакетов в такт. Перед передачей по каналу (f, h) пакеты содержатся в очереди, длина которой на такте t обозначается $Q_{(f,h)}(t)$. На каждом такте t в очереди к каналу $(f, 1)$ поступает $a_f(t)$ пакетов. Математическое ожидание величины $a_f(t)$ обозначается λ_f . Для моделирования полудуплексного режима передачи введем двоичный вектор $i = \{0, 1\}^E$ являющийся индикатором множества каналов, по которым передача может идти одновременно. Будем называть его также вектором активации. Множество всех допустимых с точки зрения полудуплексного режима векторов активации обозначим I . Так как множество каналов, по которым идет передача может изменяться каждый такт, обозначим через $i(t)$ – вектор активации на такте t . Запишем уравнения, описывающие динамику системы (1).

$$\begin{cases} Q_{(f,1)}(t+1) = Q_{(f,1)}(t) + a_f(t) - i_{(f,1)}(t) \min(Q_{(f,1)}(t), c_{(f,1)}) \\ Q_{(f,h)}(t+1) = Q_{(f,h)}(t) + i_{(f,h-1)}(t) \min(Q_{(f,h-1)}(t), c_{(f,h-1)}) - i_{(f,h)}(t) \min(Q_{(f,h)}(t), c_{(f,h)}), \\ h = 2, \dots, H_f, f = 1, \dots, F \end{cases} \quad (1)$$

Т а б л и ц а 1. Обозначения в модели сети
T a b l e 1. Notations in the network model

$t = 0, 1, 2 \dots$	номер такта
F	число потоков пакетов в системе. По два (восходящий и нисходящий) для каждой группы пользователей
H_f	длина пути потока f
(f, h)	h -ый канал потока f , $h = 1, \dots, H_f$
E	число каналов в сети
$c_{(f,h)}$	пропускная способность канала (f, h) (пакетов в такт)
$Q_{(f,h)}(t)$	длина очереди к каналу (f, h) на такте t
$a_f(t)$	число пакетов, поступивших в очередь к каналу $(f, 1)$ на такте t .
λ_f	математическое ожидание числа поступающих на каждом такте пакетов $a_f(t)$
$i(t) = \{0, 1\}^E$	вектор активации. Индикатор множества каналов, по которым происходит передача на такте t . Управляемый элемент системы
I	множество всех допустимых векторов активации
$w_{(f,h)}(t)$	вес, присвоенный каналу (f, h) на такте t
$w(t)$	вектор весов каналов на такте t
$D_{(f,h)}(t)$	время пребывания в системе для первой заявки из непустой очереди к каналу (f, h) на такте t . Если очередь пуста и $h = 1$, то $D_{(f,h)}(t) = 0$, если очередь пуста и $h > 1$, то $D_{(f,h)}(t) = D_{(f,h-1)}(t)$
$\tilde{D}_{(f,h)}(t)$	$= \{D_{(f,1)}(t) D_{(f,h)}(t) - D_{(f,h-1)}(t), h = 2, \dots, H_f$
$i^*(t)$	$= (i_{(f,h)}(t))$, где $i^*_{(f,h)}(t) = 1$ если $Q_{(f,h)}(t) > c_{(f,h)}$, иначе 0
$\mathcal{J} \subseteq \mathcal{I}$	множество векторов активации i обеспечивающие наибольшее значение показателя $\frac{\sum_{(f,h), f=1, \dots, F, h=1, \dots, H_f} i^*_{(f,h)}(t) i_{(f,h)}}{\sum_{(f,h), f=1, \dots, F, h=1, \dots, H_f} i_{(f,h)}}$

Источник: здесь и далее в статье все таблицы и рисунки составлены автором.

Source: Hereinafter in this article all tables and figures were made by the author.



Алгоритмы управления расписанием типа Max Weight

Принцип функционирования алгоритмов типа Max Weight можно описать следующим образом: на каждом такте t каждому каналу (f, h) присваивается вес $w_{(f,h)}(t)$. После этого для передачи выбирается допустимое множество каналов, имеющее максимальный суммарный вес входящих в него каналов т.е. $\mathbf{i}(t) = \operatorname{argmax}(\mathbf{i}, \mathbf{w}(t)), i \in \mathcal{J}, \mathbf{w}(t) = (w_{(f,h)}(t))$. Ниже приведем функции расчета весов для различных алгоритмов.

Вес для *backpressure* алгоритма $w_{(f,h)}(t) =$

$$\begin{cases} (Q_{(f,H_f)}(t)) c_{(f,H_f)} \\ (Q_{(f,h)}(t) - Q_{(f,h+1)}(t)) c_{(f,h)}, & h = 1 \dots H_f - 1 \end{cases} \quad (2)$$

Вес для α алгоритма $w_{(f,h)}(t) =$

$$\begin{cases} (Q_{(f,H_f)}(t))^\alpha c_{(f,H_f)} \\ (Q_{(f,h)}(t) - Q_{(f,h+1)}(t))^\alpha c_{(f,h)}, & h = 1 \dots H_f - 1 \end{cases} \quad (3)$$

Введем величину $D_{(f,h)}(t)$, обозначающую время пребывания в системе для первой заявки из непустой очереди к каналу (f, h) на такте t . Если очередь пуста и $h = 1$, то $D_{(f,h)}(t) = 0$, если очередь пуста и $h > 1$, то $D_{(f,h)}(t) = D_{(f,h-1)}(t)$. Также введем величину

$$\tilde{D}_{(f,h)}(t) = \begin{cases} D_{(f,1)}(t) \\ D_{(f,h)}(t) - D_{(f,h-1)}(t), & h = 2, \dots, H_f \end{cases}$$

Вес для *delay – based backpressure* $w_{(f,h)}(t) =$

$$\begin{cases} \tilde{D}_{(f,H_f)}(t) c_{(f,H_f)} \\ (\tilde{D}_{(f,h)}(t) - \tilde{D}_{(f,h+1)}(t)) c_{(f,h)}, & h = 1 \dots H_f - 1 \end{cases} \quad (4)$$

Вес для алгоритма $\alpha\beta$ $w_{(f,h)}(t) =$

$$\begin{cases} (Q_{(f,H_f)}(t))^\alpha \frac{(\sum_{n=1}^{H_f} (Q_{(f,n)}(t))^{\alpha+1})^{\frac{\beta-\alpha}{\alpha+1}}}{\lambda_f^{\beta+1}} \\ (Q_{(f,h)}(t) - Q_{(f,h+1)}(t))^\alpha \frac{(\sum_{n=1}^{H_f} (Q_{(f,n)}(t))^{\alpha+1})^{\frac{\beta-\alpha}{\alpha+1}}}{\lambda_f^{\beta+1}} & h = 1 \dots H_f - 1 \end{cases} \quad (5)$$

Коротко отметим особенности представленных алгоритмов:

- *Backpressure* помимо управления расписанием позволяет осуществлять и маршрутизацию, и разделение мощности [14]
- α алгоритм аналогичен *Backpressure*, но, как видно из возведения в степень длины очереди при неизменной степени пропускной способности, данный алгоритм более ориентирован на снижение длины очереди (и соответственно задержек в сети), чем на утилизацию спектра [5].
- *delay – based backpressure* использует разность задержки первых пакетов в очереди для определения веса канала, что позволяет регулировать максимальное значение задержки пакетов [8].
- $\alpha\beta$ алгоритм был разработан с целью снижения вероятности переполнения накопителя, вследствие чего оптимизирует и среднюю и максимальную задержку пакетов [6].

Стоит отметить, что все вышеперечисленные алгоритмы разработаны для сетей с переменной

пропускной способностью каналов, т.е. для сетей, где $c_{(f,h)}$ зависит от номера такта. Однако обращая внимание на высокую направленность лучей в миллиметровом диапазоне частот и статическое положение ретрансляторов в сети, мы используем постоянные пропускные способности каналов транзитного соединения (между точками доступа т.е. ретрансляторами и донором). Каналы доступа (каналы между пользователями и точкой доступа) более подвержены затуханию, блокировке и воздействию шума, однако, как отмечалось выше, мы группируем всех пользователей, подключенных к точке доступа в группы и рассматриваем агрегированный канал между ними, как канал с фиксированной пропускной способностью. Используя данное отличие нашей модели от предлагаемых в литературе, мы формируем следующий алгоритм управления расписанием, основанный на приоритетах.

На каждом такте t приоритет назначается каналам, для которых $Q_{(f,h)}(t) > c_{(f,h)}$. Введем вектор индикатор

$$\mathbf{i}^*(t) = (i_{(f,h)}^*(t)), \text{ где } i_{(f,h)}^*(t) = 1 \text{ если } Q_{(f,h)}(t) >$$

$c_{(f,h)}$, иначе 0. Обозначим через $\mathcal{J} \subseteq \mathcal{J}$ множество векторов активации $\mathbf{i}$ обеспечивающие наибольшее значение показателя

$$\frac{\sum_{(f,h), f=1, \dots, F, h=1, \dots, H_f} i_{(f,h)}^*(t) i_{(f,h)}}{\sum_{(f,h), f=1, \dots, F, h=1, \dots, H_f} i_{(f,h)}^*(t)}$$

характеризующего долю приоритетных из активных каналов. Выбор вектора активации на данный такт производится из найденного множества $\mathcal{J}$ по критерию максимизации суммы длин очередей перед активными каналами т.е.

$$\mathbf{i}(t) = \operatorname{argmax}(\mathbf{i}, \mathbf{w}(t)), i \in \mathcal{J}, \mathbf{w}(t) = (Q_{(f,h)}(t)).$$

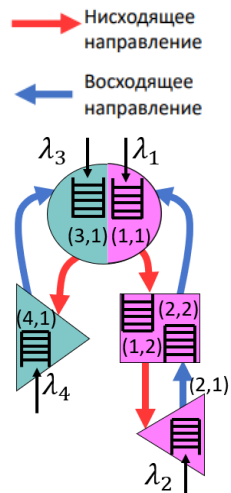
Численный анализ

В численном эксперименте будем рассматривать сеть, содержащую один ретрансляционный узел, обозначенный квадратом на рисунке 1, донор, обозначенный кругом, и две группы пользователей (подключенных к донору и к ретранслятору), обозначенных треугольниками. В сети представлено $F = 4$, потока пакетов $H_1 = H_2 = 2, H_3 = H_4 = 1$. Значения $a_f(t)$ для всех t представляют собой независимые одинаково распределенные случайные величины, распределенные по закону Пуассона с параметром λ_f . Для определения пропускных способностей каналов, воспользуемся формулой из стандарта 3GPP [26] (6)

$$C_{X[\text{Mbps}]} = 10^{-6} v_{L,X} Q_{m,X} f R_X \frac{12 N_{PRB}^{BW,\mu}}{T_s^\mu} (1 - O_{H_X}), X \in \{UL, DL\}$$

Мы будем рассматривать два сценария, отличающиеся характеристиками точек доступа.

Названия и значения используемых величин приведены в таблицах 2 и 3.



Р и с. 1. Сеть для проведения численного эксперимента
F i g. 1. Network for conducting numerical experiments

Т а б л и ц а 2. Названия, обозначения и значения
физических величин инвариантных сценарию
T a b l e 2. Names, designations and values of physical
quantities invariant to the scenario

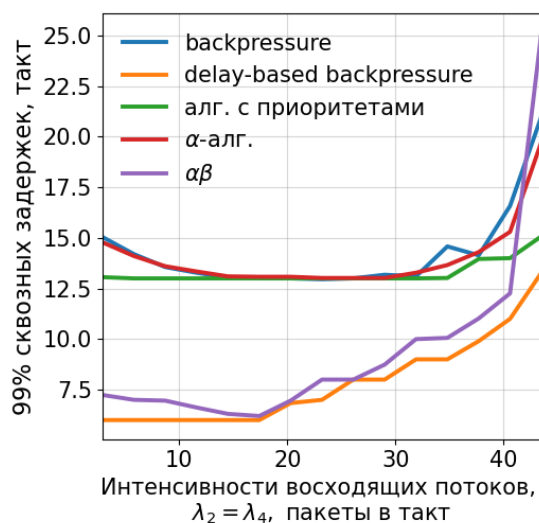
Характеристика	Обозначение	Значение
Нумерология	μ	3
Ширина полосы	BW	200 МГц
Количество ресурсных блоков	$N_{PRB}^{BW,\mu}$	132
Длительность символа	T_s^μ	$8.92 \cdot 10^{-6}$
Накладки восходящего направления	OH_{UL}	0.1
Накладки нисходящего направления	OH_{DL}	0.18

Т а б л и ц а 3. Названия, обозначения и значения физических величин для разных сценариев
T a b l e 3. Names, designations and values of physical quantities for different scenarios

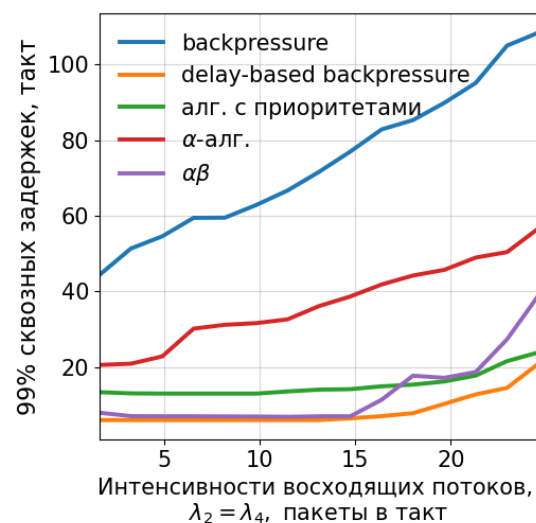
Характеристика	Обозначение	Значение			
		Сценарий 1. Максимальные значения		Сценарий 2. Ограниченные пользовательские устройства	
		Восходящее направление	Нисходящее направление	Восходящее направление	Нисходящее направление
Количество мультиплексируемых слоев	$v_{L,X}$	4	6	2	6
Морядок модуляционно кодовой схемы	$Q_{m,X}$	6	6	4	6
Ошибка кодирования	R_X	948/1024	948/1024	490/1024	948/1024
Пропускная способность мб/с	C_X	3547	4848	4848	280

Построим зависимость 99% перцентиля и средней задержки от интенсивности входящих потоков, приняв интенсивности восходящих потоков одинаковыми, а интенсивности нисходящих потоков в 4 раза больше, чем интенсивности восходящих (см. рисунок 2).

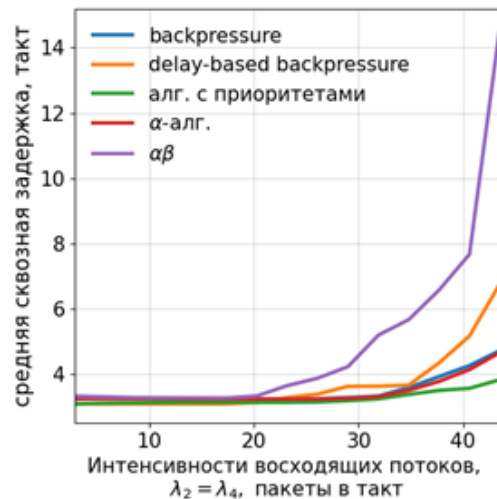
Дополнительно построим зависимость характеристик задержки от отношения интенсивностей входящего и нисходящего трафика, при сохранении суммарной интенсивности всех входящих в систему потоков (см. рисунок 3).



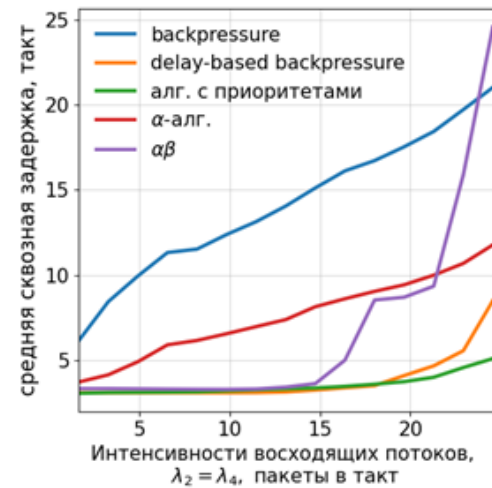
Сценарий 1. Максимальные значения



Сценарий 2. Ограниченные пользовательские устройства



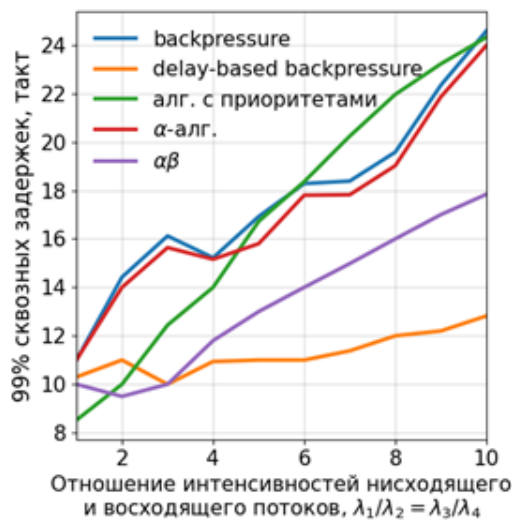
Сценарий 1. Максимальные значения



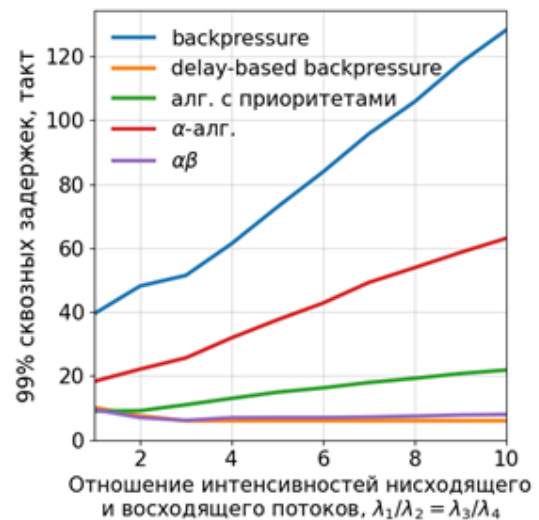
Сценарий 2. Ограниченные пользовательские устройства

Р и с. 2. 99 перцентиль и средняя задержка в сети с различными алгоритмами управления расписанием для двух сценариев. Интенсивности нисходящих потоков больше интенсивности восходящих потоков в 4 раза.

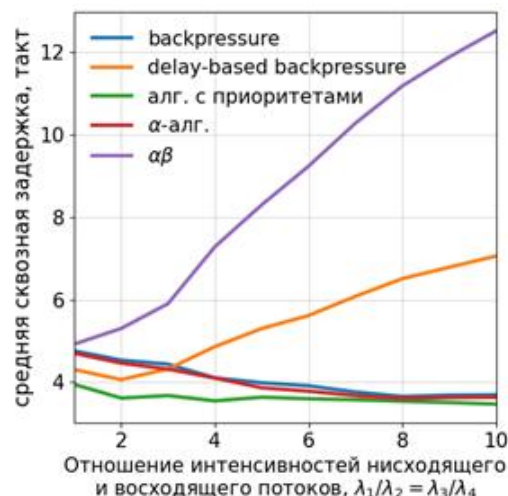
Fig. 2. 99th percentile and average network latency with different scheduling algorithms for two scenarios. Downstream flow rates are 4 times greater than upstream flow rates.



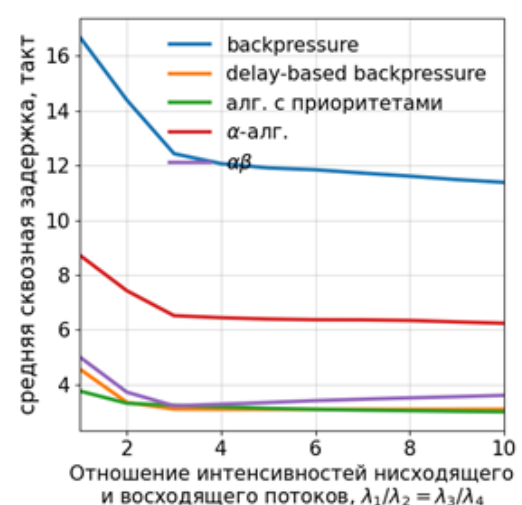
Сценарий 1. Макс. значения $\sum_{f=1}^F \lambda_f = 198$



Сценарий 2. $\sum_{f=1}^F \lambda_f = 46$



Сценарий 1. Макс. значения $\sum_{f=1}^F \lambda_f = 198$



Сценарий 2. $\sum_{f=1}^F \lambda_f = 46$

Р и с. 3. 99 перцентиль и средняя задержка в сети с различными алгоритмами управления расписанием для двух сценариев при различном отношении интенсивности восходящих и нисходящих потоков ($\lambda_1 = \lambda_3$)

Fig. 3. 99th percentile and average network delay with different scheduling algorithms for two scenarios with different upstream to downstream flow intensity ratios ($\lambda_1 = \lambda_3$)



Заключение

Переход к сетям пятого поколения мобильной связи предусматривает необходимость поддерживать до миллиона пользователей на квадратный километр и предоставлять услуги в миллиметровом диапазоне с малым радиусом покрытия, что влечет повышение плотности точек доступа. Технология интегрированного доступа и транзита, позволяющая использовать плотную сеть из ретрансляционных узлов вместо полноценных базовых станций, дает возможность снизить уровень затрат со стороны оператора при переходе к плотным сетям. В полудуплексном режиме функционирования, сети IAB нуждаются в применении алгоритмов управления расписанием, обеспечивающих низкую сквозную

задержку передачи. Данное требование выполняется в алгоритмах типа *max weight*, которые мы и рассматриваем в работе. Базируясь на высокой направленности луча в миллиметровом диапазоне, мы делаем предположение о постоянной пропускной способности канала и строим алгоритм управления расписанием. Используя *backpressure* [4], *delay-based backpressure* [8] и [5], и, $\alpha\beta$ [6] алгоритмы из литературы, мы проводим численное сравнение 99% перцентиля и средней задержки системы при различном управлении расписанием. Изучая сценарии с ограничением на возможности пользовательских устройств и без ограничения, мы устанавливаем, что предложенный алгоритм превосходит конкурентов по средней задержке.

References

1. Ronkainen H., Edstam J., Ericsson A., Östberg C. Integrated Access and Backhaul: A New Type of Wireless Backhaul in 5G. *Frontiers in Communications and Networks*. 2021;2:636949. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.636949>
2. Fabian P., Papadopoulos G.Z., Savelli P., Cousin B. Performance Evaluation of Integrated Access and Backhaul in 5G Networks. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN 2021)*. Thessaloniki, Greece: IEEE Press; 2021. p. 88-93. <https://doi.org/10.1109/CSCN53733.2021.9686110>
3. Sadovaya Y., Moltchanov D., Mao W., Orhan O., Yeh S.P., Nikopour H., Talwar S., Andreev S. Integrated Access and Backhaul in Millimeter-Wave Cellular: Benefits and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2022;60:81-86. <https://doi.org/10.1109/MCOM.004.2101082>
4. Tassiulas L., Ephremides A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum 759 throughput in multihop radio networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1992;37:1936-1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>
5. Venkataramanan V.J., Lin X. On Wireless Scheduling Algorithms for Minimizing the Queue-Overflow Probability. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2010;18:788-801. <https://doi.org/10.1109/TNET.2009.2037896>
6. Venkataramanan V.J., Lin X., Ying L., Shakkottai S. On Scheduling for Minimizing End-to-End Buffer Usage over Multihop Wireless Networks. In: *Proceedings of the 2010 Proceedings IEEE INFOCOM*. San Diego, California, USA: 2010. p. 1-9. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2010.5462117>
7. Ramanan K., Stolyar A.L. Largest Weighted Delay First Scheduling: Large Deviations and Optimality. *The Annals of Applied Probability*. 2001;11(1):1-48. <https://doi.org/10.1214/aoap/998926986>
8. Ji B., Joo C., Shroff N.B. Delay-based Back-Pressure scheduling in multi-hop wireless networks. In: *Proceedings of the 2011 Proceedings IEEE INFOCOM*. Shanghai, China: IEEE Press; 2011. p. 2579-2587. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2011.5935084>
9. Stolyar A. Maximizing Queueing Network Utility Subject to Stability: Greedy Primal-Dual Algorithm. *Queueing Syst*. 2005;50:401-457. <https://doi.org/10.1007/s11134-005-1450-0>
10. Joo C., Lin X., Shroff N.B. Greedy Maximal Matching: Performance Limits for Arbitrary Network Graphs Under the Node- Exclusive Interference Model. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2009;54:2734-2744. <https://doi.org/10.1109/TAC.2009.203531719>
11. Tassiulas L. Linear complexity algorithms for maximum throughput in radio networks and input queued switches. In: *Proceedings of the Proceedings. IEEE INFOCOM '98, the Conference on Computer Communications. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.98)*. Vol. 2. San Francisco, CA, USA; 1998. p. 533-539. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.1998.665071>
12. Jiang L., Walrand J. A distributed CSMA algorithm for throughput and utility maximization in wireless networks. In: *Proceedings of the 2008 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. Monticello, Illinois: IEEE Press; 2008. p. 1511-1519. <https://doi.org/10.1109/ALLERTON.2008.4797741>
13. Jiang L., Walrand J. Scheduling and Congestion Control for Wireless and Processing Networks. *Synthesis Lectures on Learning, Networks, and Algorithms (SLLNA)*. Vol. 3. Springer Cham; 2010. 144 p. <https://doi.org/10.2200/S00270ED1V01Y201008CNT006>
14. Georgiadis L., Neely M.J., Tassiulas L. Resource Allocation and Cross-Layer Control in Wireless Networks. *Foundations and Trends in Networking*. 2006;1(1):1-144. <https://doi.org/10.1561/13000000001>



15. Chaporkar P., Kar K., Luo X., Sarkar S. Throughput and Fairness Guarantees Through Maximal Scheduling in Wireless Networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2008;54:572-594. <https://doi.org/10.1109/TIT.2007.913537>
16. Modiano E., Shah D., Zussman G. Maximizing Throughput in Wireless Networks via Gossiping. In: Proceedings of the joint international conference on Measurement and modeling of computer systems (SIGMETRICS '06/Performance '06). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2006. p. 27–38. <https://doi.org/10.1145/1140277.1140283>
17. Gopalam S., Hanly S.V., Whiting, P. Distributed and Local Scheduling Algorithms for mmWave Integrated Access and Backhaul. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2022;30:1749-1764. <https://doi.org/10.1109/TNET.2022.3154367>
18. García-Rois J., Gómez-Cuba F., Akdeniz M.R., González-Castaño F.J., Burguillo J.C., Rangan S., Lorenzo B. On the Analysis of Scheduling in Dynamic Duplex Multihop mmWave Cellular Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2015;14:6028-6042. <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2446983>
19. Gupta M., Rao A., Visotsky E., Ghosh A., Andrews J.G. Learning Link Schedules in Self-Backhauled Millimeter Wave Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19:8024-8038. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3018955>
20. Gómez-Cuba, F.; Zorzi, M. Optimal Link Scheduling in Millimeter Wave Multi-Hop Networks With MU-MIMO Radios. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2020, 19, 1839–1854. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2959295>
21. Li Y., Luo J., Xu W., Vucic N., Pateromichelakis E., Caire G. A Joint Scheduling and Resource Allocation Scheme for Millimeter Wave Heterogeneous Networks. In: Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco, CA, USA: IEEE Press; 2017. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925545>
22. Pagin M., Zugno T., Polese M., Zorzi M. Resource Management for 5G NR Integrated Access and Backhaul: A Semi-Centralized Approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2022;21:753-767. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3098967>
23. Reddy A.P.K., Kumari M.S., Dhanwani V., Bachkaniwala A.K., Kumar N., Vasudevan K., Selvaganapathy S., Devar S.K., Rathod P., James V.B. 5G New Radio Key Performance Indicators Evaluation for IMT-2020 Radio Interface Technology. *IEEE Access*. 2021;9:112290-112311. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3099845>
24. Koutlia K., Bojovic B., Lagén S., Zhang X., Wang P., Liu J. System analysis of QoS schedulers for XR traffic in 5G NR. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2023;125:102745. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102745>
25. Chen J., Mao C., Song W.W. QoS prediction for web services in cloud environments based on swarm intelligence search. *Knowledge-Based Systems*. 2023;259:110081. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110081>

Поступила 02.09.2023; одобрена после
рецензирования 07.10.2023; принята к публикации
24.11.2023.

Submitted 02.09.2023; approved after reviewing
07.10.2023; accepted for publication 24.11.2023.

Об авторе:

Живцова Анна Александровна, студент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Института компьютерных наук и телекоммуникаций, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-8438-6850>, aazhivtsova@sci.pfu.edu.ru

About the author:

Anna A. Zhivtsova, Student of the Probability Theory and Cybersecurity Department, Applied Mathematics & Communications Technology Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-8438-6850>, aazhivtsova@sci.pfu.edu.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.