



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

<https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.865-873>

УДК 519.872

Анализ поллинговой модели узла сети интегрированного доступа и транзита

Д. И. Николаев

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

1032201198@rudn.ru

Аннотация

В этой работе построена поллинговая модель обслуживания узла сети интегрированного доступа и транзита (*Integrated Access and Backhaul, IAB*) с целью анализа вероятностно-временных характеристик (ВВХ) системы, что даст возможность оценки задержек передачи пакетов в сети. Поллинговая система массового обслуживания предполагается марковской. Одна из очередей предназначена для хранения пакетов от родительских узлов сети IAB, а вторая – от дочерних узлов и ассоциированных с данным узлом пользовательских устройств. Циклический опрос очередей позволяет учесть главную особенность IAB в сетях 5G – полудуплексный режим передачи пакетов. С помощью аппарата марковских процессов получены формулы для расчета времени ожидания заявки и времени пребывания заявки в системе, которое соответствует задержке передачи пакета в узле. Результаты численного анализа позволяют дать оценку сверху для длительности переключения прибора, при которой выполняются ограничения 5G NR на задержку для сетей с одним релейным узлом.

Ключевые слова: поллинг, система массового обслуживания, совмещенный (интегрированный) доступ и транспорт, листовая сеть.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Николаев Д. И. Анализ поллинговой модели узла сети интегрированного доступа и транзита // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 4. С. 865-873. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.865-873>

© Николаев Д. И., 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

Analysis of the Polling Model of a Node in the Integrated Access and Backhaul System

D. I. Nikolaev

Original article

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

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

1032201198@rudn.ru

Abstract

In this paper, a polling model of node service of *Integrated Access and Backhaul (IAB)* network is constructed to analyze the probabilistic-time characteristics (PTC) of the system, which will enable the estimation of packet transmission delays in the network. The polling-based queueing system is assumed to be Markovian. One of the queues is designed to store packets from parent nodes in the IAB network, and the second queue is designed to store packets from child nodes and user equipments associated with a given node. Cyclic polling of queues allows to consider the main feature of IAB in 5G networks – half-duplex mode of packet transmission. Using the apparatus of Markov processes, formulas for calculating the queueing delay and the time spent in the system of the request in the system, which corresponds to the delay of packet transmission in the node, are obtained. The results of the numerical analysis allow us to give an upper bound estimate for the device switching duration at which the 5G NR delay constraints are fulfilled for networks with a single relay node.

Keywords: Polling, queueing system, Integrated Access and Backhaul (IAB), edge node

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

For citation: Nikolaev D.I. Analysis of the Polling Model of a Node in the Integrated Access and Backhaul System. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(4):865-873. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.865-873>



Введение

Интегрированный доступ через базовые станции gNB (*gNodeB*) для транзитных соединений в сетях 5G (*Integrated Access and Backhaul, IAB*) стал одной из утвержденных задач 17 Релиза Партнерского проекта 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*)ⁱ. При использовании технологии IAB, только малая часть узловых базовых станций имеет соединение с традиционной оптоволоконной инфраструктурой сети фиксированной связи, остальные узлы передают транзитный трафик по беспроводным каналамⁱⁱ.

И хотя в существующих спецификациях базовых станций в стандартах 3GPP Long Term Evolution Advanced (*LTE-Advanced*) возможно осуществление транзитной передачи данных через одно звено соединения (*hop*), IAB же, в свою очередь, являет собой более продвинутое решение, способное поддерживать многосвязные (*multi-hop*) соединения, динамическое мультиплексирование ресурсов и конструкцию "plug-and-play", что уменьшает сложность развертывания сети [1]. Принимая во внимание перечисленные преимущества технологии IAB, проектирование эффективной и высокопроизводительной сети 5G/6G с ее применением остается актуальной исследовательской задачей [2].

В связи с растущими потребностями в высокопроизводительных сетях нового поколения технология IAB, будучи одной из ключевых в сетях 5G/6G, её особенности и предоставляемые преимущества широко исследуются в литературе [3-8]. Технология IAB, её характеристики и функционирование исследуются в различных аспектах: решаются вопросы маршрутизации в многосвязных сетях [9, 10], выбора оптимальной топологии сети [11] и эффективного распределения ресурсов [12], формирования луча [13], разработки политик управления каналами передачи данных для контроля уровня задержки [14], условий стабильности сети [15, 16] при которой пропускная способность максимальна. Кроме того, исследуется повторное использование

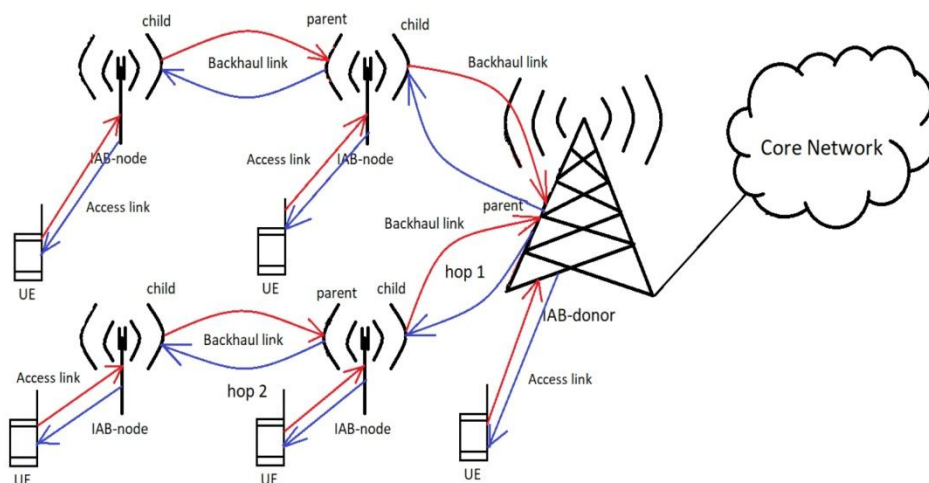
частот методом раскраски графов [17], также строится математическая модель сети IAB с блокировками [18] и модель числа пользователей на узле IAB в виде системы массового обслуживания [19].

При проектировании сети необходимо учитывать не только условия радиоканала, доступный радиодиапазон, топологию разрабатываемой сети и ограничения на энергоэффективность, но и требования к качеству обслуживания пользователей (*Quality of Service, QoS*), особенно важным из которых является задержка при предоставлении услуг. И хотя технология IAB поддерживает возможность передачи данных в двунаправленном полнодуплексном режиме (*full duplex*), на большую часть реализаций наложится ограничение в виде однонаправленного полудуплексного режима (*half duplex*), что вызывает увеличение задержки. Полудуплексный режим обязывает особенно внимательно следить за значением задержки передачи данных из конца в конец.

В работе для анализа работы отдельного узла сети IAB с полудуплексным режимом передачи данных предложена марковская система массового обслуживания (СМО) в виде модели поллинговой системы с двумя очередями, ненулевым временем переключения между ними и поступлением пакетов в течение периодов переключения прибора. Среди полученных вероятностно-временных характеристик (ВВХ) системы акцент сделан на задержках и блокировках доступа, для которых проведен численный анализ.

Системная модель

На Рис.1 схематически изображен пример топологии сети IAB в виде связующего дерева (*Spanning Tree, SP*) с корнем в узле IAB-donor, имеющим проводное соединение с оптоволоконной сетью, при этом все остальные узлы IAB-node соединены только с одним родительским узлом. Объектом исследования является граничный узел IAB-Node, соответствующий листовой вершине дерева, а предметом исследования – поток пакетов, проходящий через этот узел.



Р и с. 1. Схема фрагмента сети с технологией интеграции доступа и транзита в виде связующего дерева
F i g. 1. A diagram of a network fragment with access and transit integration technology implemented as a spanning tree

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены автором.
Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the author.



В случае полудуплексного режима передачи данных пакеты, которые поступают в узел IAB-node, можно разделить на две группы:

- пакеты, идущие по нисходящему каналу (*downlink*) от родительского узла (*parent*);
- пакеты, идущие по восходящему каналу (*uplink*) от дочерних узлов (*child*) вместе с пакетами от ассоциированных с текущим узлом абонентских устройств (*User Equipment, UE*).

Полудуплексный режим накладывает следующие ограничения на передачу данных в сети:

- невозможно одновременно включить соединение доступа (*access link*) и транзитное соединение (*backhaul link*) на одном узле;
- невозможно одновременно включить передачу данных в обе стороны как в соединении доступа, так и в транзитном соединении.

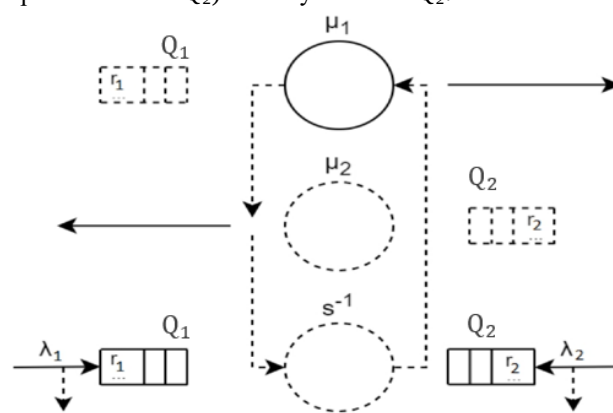
В следующих разделах для описания процесса обработки пакетов данных на граничных узлах IAB предложена модель поллингового обслуживания с двумя очередями, циклическим обходом очередей, ненулевым временем переключения между ними и поступлением заявок исключительно в периоды переключения, обусловленным вышеописанными ограничениями полудуплексного режима. Таким образом, одна из очередей будет ассоциирована с нисходящим каналом, а вторая – с восходящим, а пакеты, передающиеся по этим каналам, будут соответствовать заявкам в очередях. Целью исследования является анализ зависимости времени ожидания заявки от длительности интервала переключения между очередями, который соответствует длительности фазы поступления пакетов в IAB-node от родительского узла и UE при полудуплексном режиме.

Модель поллингового обслуживания

Под поллингом подразумевают «упорядоченный опрос»¹ [20-23]: прибор переключается от очереди к очереди по некоторому заданному закону и обслуживает заявки, находящиеся в очереди, в соответствии с заданным правилом обслуживания. Системы поллинга с двумя очередями и постоянным поступлением заявок исследованы в работах [24, 25]. Так, в работе² найдены аналитические выражения для средних времен ожидания заявок в очереди для шлюзовой и исчерпывающей дисциплин обслуживания. Для анализа процесса передачи пакетов данных граничным узлом IAB предложена модель поллингового обслуживания с двумя очередями $M_2|M_2|1|(r_1, r_2)$, соответствующая описанным в предыдущем разделе условиям (схема изображена на

рис. 2). В очередь Q_1 поступают заявки из нисходящего канала, а в очередь Q_2 – из восходящего канала. Ввиду особенностей предложенной системы, однозначно определить ее дисциплину обслуживания не представляется возможным, так как она является исчерпывающей из-за обслуживания всех поступивших в очереди заявок и, одновременно с этим, глобально-шлюзовой, так как с момента начала цикла обслуживания новые заявки не допускаются к обслуживанию. В качестве допущения примем, что переключение от первой очереди ко второй происходит мгновенно, чтобы объединить фазы поступления заявок в обе очереди.

В итоге система будет работать согласно следующему циклу: наполнение очередей (переключение прибора от Q_2 к Q_1) – обслуживание Q_1 (если пуста, то сразу переключение к Q_2) – обслуживание Q_2 .



Р и с. 2. Схема системы поллингового обслуживания с двумя очередями

F i g. 2. A polling service system scheme with two queues

Так как модель предполагается марковской, то длительности интервалов между соседними поступлениями заявок в систему, длительности обслуживания заявок и время переключения между очередями имеют экспоненциальное распределение, что соответствует рекомендациям 3GPP по моделированию сети IAB.

Введем параметры системы: λ_i – интенсивности поступления заявок в Q_i , μ_i – интенсивности обслуживания заявок, r_i – емкость накопителя, s^{-1} – интенсивность переключения прибора от Q_2 к Q_1 (то есть среднее время переключения равняется s), где $i = 1, 2$.

Функционирование системы описывается случайным процессом (СП) $\mathbf{X}(t)$:

$$\mathbf{X}(t) = \{(q(t), n_1(t), n_2(t)), t \geq 0\}, \quad (1)$$

где $q(t) \in \{0, 1, 2\}$ – состояние прибора ($q = 0$ – поступление заявок, $q = 1, 2$ – обслуживание первой и второй очередей соответственно), $n_i(t) \in \{0, 1, \dots, r_i\}$ – число заявок в Q_i в момент времени t .

Теперь можем записать главную особенность системы, отражающую полудуплексный режим передачи пакетов в сети IAB, которую можно сформулировать следующим образом:

¹ Семенова О. В. Методы и алгоритмы анализа моделей массового обслуживания с поллингом, ненадежными обслуживающими приборами и коррелированными потоками : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: РУДН, 2022. 291 с. EDN: OKMZHI

² Зарипова Э. Р. Методы анализа показателей эффективности телекоммуникационной сети серверов протокола установления сессий : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: РУДН, 2015. 126 с. EDN: EDSJID



$$\lambda_i = \begin{cases} \lambda_i, & q=0 \text{ (переключение прибора)}, \\ 0, & q=1, 2 \text{ (обслуживание очереди } Q_1 \text{ или } Q_2) \end{cases}, \quad i=1, 2. \quad (2)$$

Выпишем далее пространство состояний данной системы:

$$X = \{(0, n_1, n_2) : n_1 \in \{0, 1, K, r_1\}, n_2 \in \{0, 1, K, r_2\};$$

$$(1, n_1, n_2) : n_1 \in \{1, \dots, r_1\}, n_2 \in \{0, 1, \dots, r_2\}; \quad (3)$$

$$(2, 0, n_2) : n_2 \in \{1, \dots, r_2\}\},$$

мощность которого равна

$$|X| = (r_1 + 1)(r_2 + 1) + r_1(r_2 + 1) + r_2. \quad (4)$$

Заметим, что его можно представить, как объединение трех непересекающихся подпространств, то есть

$$X = X_0 \cup X_1 \cup X_2, \quad (5)$$

где $X_0 = \{(0, n_1, n_2) : n_1 \in \{0, 1, \dots, r_1\}, n_2 \in \{0, 1, \dots, r_2\}\}$ – пространство состояний приема заявок в систему (переключение прибора),

$X_1 = \{(1, n_1, n_2) : n_1 \in \{1, \dots, r_1\}, n_2 \in \{0, 1, \dots, r_2\}\}$ –

пространство состояний обслуживания Q_1 ,

$X_2 = \{(2, 0, n_2) : n_2 \in \{1, \dots, r_2\}\}$ – пространство

состояний обслуживания Q_2 .

Введем теперь пространства блокировок доступа. В нашей системе заявки блокируются, в случае переполнения накопителя. Тогда пространство состояний блокировок Q_i выражается как:

$$\mathcal{B}_i = \{(q, n_1, n_2) : q=0, n_i = r_i\}, \quad i=1, 2. \quad (6)$$

Значит пространство состояний блокировок хотя бы одной из очередей представляется как:

$$\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2 = \mathcal{B}_1 + \mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2, \quad (7)$$

где

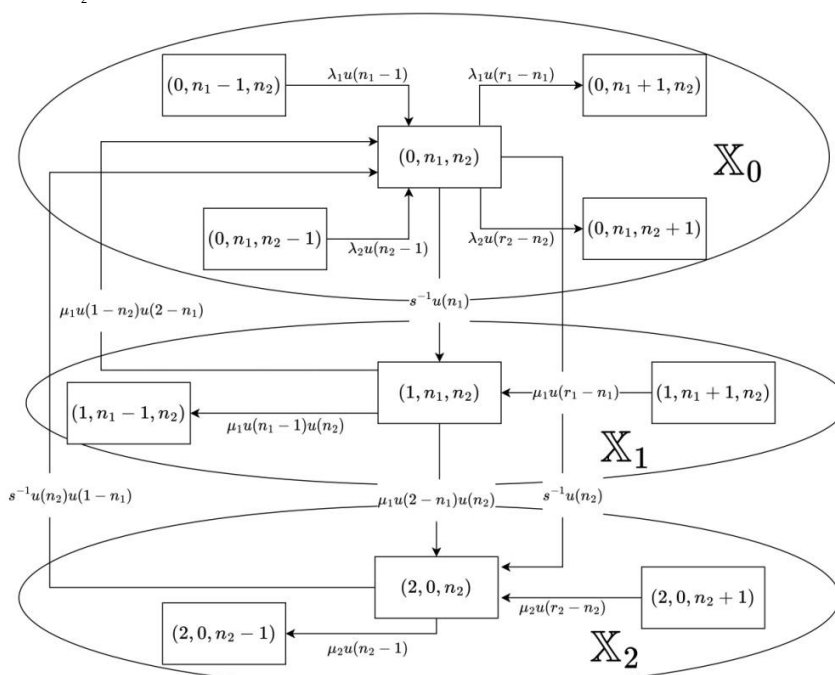
$$\mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2 = (0, r_1, r_2). \quad (8)$$

Основной задачей является нахождение стационарного распределения СП $\mathbf{X}(t)$

$$p(q, n_1, n_2) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\mathbf{X}(t) = (q(t), n_1(t), n_2(t))\}, (q, n_1, n_2) \in X \quad (9)$$

Для его нахождения необходимо решить систему уравнений равновесия (СУР), составить которое поможет граф интенсивностей переходов.

На рис. 3 представлен граф интенсивностей переходов данной системы. Он состоит из трех центральных состояний, относящихся к каждому из трех непересекающихся пространств состояний соответственно.



Р и с. 3. Граф интенсивностей переходов с тремя центральными состояниями
F i g. 3. A transition intensity graph with three central states

Теперь, воспользовавшись графом, представленном на рис. 3 и принципом глобального баланса, составим СУР:

$$\begin{cases} \mu_1 p(1, 1, 0) + \mu_2 p(2, 0, 1) = (\lambda_1 + \lambda_2) p(0, 0, 0), \\ \lambda_1 p(0, i-1, 0) = (u(r_1 - i) \lambda_1 + \lambda_2 + s^{-1}) p(0, i, 0), \quad i=1, \dots, r_1, \\ \lambda_2 p(0, 0, i-1) = (\lambda_1 + u(r_2 - i) \lambda_2 + s^{-1}) p(0, 0, i), \quad i=1, \dots, r_2, \\ \lambda_1 p(0, i-1, j) + \lambda_2 p(0, i, j-1) = (u(r_1 - i) \lambda_1 + u(r_2 - j) \lambda_2 + s^{-1}) p(0, i, j), \quad i=1, \dots, r_1, j=1, \dots, r_2, \\ s^{-1} p(0, i, j) + u(r_1 - i) \mu_1 p(1, i+1, j) = \mu_1 p(1, i, j), \quad i=1, \dots, r_1, j=0, \dots, r_2, \\ s^{-1} p(0, 0, j) + \mu_1 p(1, 1, j) + u(r_2 - j) \mu_2 p(2, 0, j+1) = \mu_2 p(2, 0, j), \quad j=1, \dots, r_2, \end{cases} \quad (10)$$

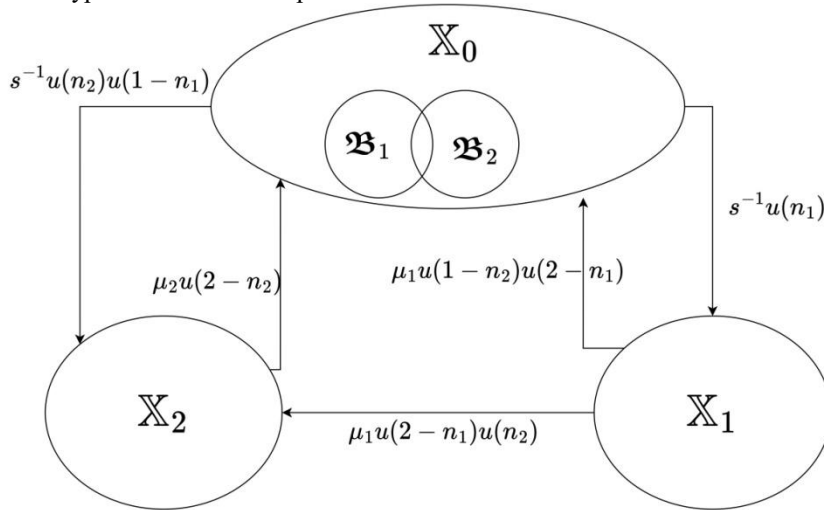


где $u(x)$ – функция Хевисайда

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для лучшего понимания переходов между непересекающимися пространствами на рис. 4 представлен сокращенный граф переходов системы. Так, левая часть первого уравнения СУР образована

переходами из X_1 и X_2 в X_0 , слагаемые из второго, третьего и четвертого уравнений, содержащие множитель s^{-1} , ответственные за переходы в состояния пространств X_1 или X_2 , тогда как оставшиеся слагаемые – переходы внутри пространств.



Р и с. 4. Сокращенный граф интенсивностей переходов между непересекающимися пространствами
F i g. 4. A reduced transition intensity graph between non-overlapping spaces

Можно записать СУР более компактно, где каждое уравнение соотносится с одним из пространств:

$$\begin{cases} u(1-i-j)(\mu_1 p(1,1,0) + \mu_2 p(2,0,1)) + u(i)\lambda_1 p(0,i-1,j) + u(j)\lambda_2 p(0,i,j-1) = \\ = (u(r_1-i)\lambda_1 + u(r_2-i)\lambda_2 + u(i+j)s^{-1})p(0,i,j), & i=0,\dots,r_1, j=0,\dots,r_2, \\ s^{-1}p(0,i,j) + u(r_1-i)\mu_1 p(1,i+1,j) = \mu_1 p(1,i,j), & i=1,\dots,r_1, j=0,\dots,r_2, \\ s^{-1}p(0,0,j) + \mu_1 p(1,1,j) + u(r_2-j)\mu_2 p(2,0,j+1) = \mu_2 p(2,0,j), & j=1,\dots,r_2. \end{cases}$$

Решая СУР вместе с условием нормировки

$$\sum_{(q,n_1,n_2) \in X} p(q,n_1,n_2) = 1, \quad (13)$$

найдем стационарное распределение, зная которое, сможем вычислить некоторые ВВХ системы. Вероятность состояния наполнения очередей

$$P_0 = P\{(q,n_1,n_2) \in X_0\} = \sum_{n_1=0}^{r_1} \sum_{n_2=0}^{r_2} p(0,n_1,n_2). \quad (14)$$

Вероятность обслуживания очереди Q_i

$$P_i = P\{(q,n_1,n_2) \in X_i\} = \sum_{n_1=0}^{r_1} \sum_{n_2=0}^{r_2} p(i,n_1,n_2), \quad i=1,2. \quad (15)$$

Вероятность блокировки очереди Q_1

$$B_1 = P\{(q,n_1,n_2) \in \mathcal{B}_1\} = \sum_{n_2=0}^{r_2} p(0,r_1,n_2). \quad (16)$$

Вероятность блокировки очереди Q_2

$$B_2 = P\{(q,n_1,n_2) \in \mathcal{B}_2\} = \sum_{n_1=0}^{r_1} p(0,n_1,r_2). \quad (17)$$

Вероятность блокировки хотя бы одной из очередей

$$B = P\{(q,n_1,n_2) \in \mathcal{B}\} = B_1 + B_2 - p(0,r_1,r_2) = \sum_{n_2=0}^{r_2} p(0,r_1,n_2) + \sum_{n_1=0}^{r_1} p(0,n_1,r_2). \quad (18)$$

Среднее число заявок в Q_i , где если $i=2$, то $i+1=1$

$$N_i = \sum_{n_i=1}^{r_i} n_i \sum_{q=0}^2 \sum_{n_{i+1}=0}^{r_{i+1}} p(q,n_1,n_2), \quad i=1,2. \quad (19)$$

Среднее время ожидания в Q_i

$$\omega_i = \frac{N_i}{\lambda_i(1-B_i)}, \quad i=1,2. \quad (20)$$

В следующем разделе проведён численный анализ среднего времени ожидания заявки в очереди, блокировки доступа хотя бы одной из очередей и вероятности непоступления заявок (то есть вероятности обслуживания одной из очередей) в зависимости от интенсивности переключения между очередями.

Численный анализ

На рис. 5 построены графики средних времен ожидания заявок в очередях Q_1 и Q_2 для близких к реальности исходных данных из [26], согласно которым $\mu_1 = 23$,

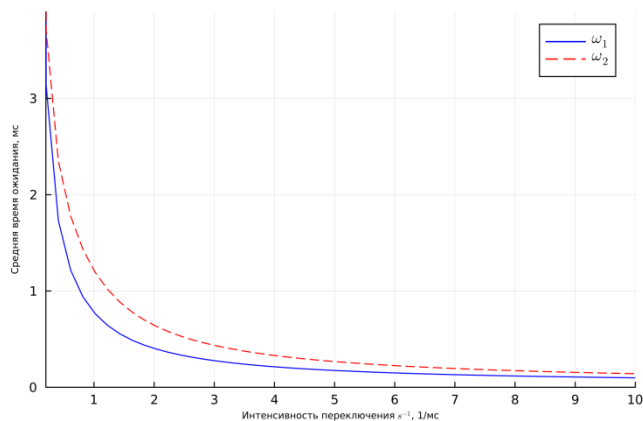


$\mu_2 = 34$, $\lambda_1 = 12$, $\lambda_2 = 16$. Как показано на графике Рис.5, для того, чтобы удовлетворить ограничению в 1 мс на межконцевую задержку, накладываемого стандартами сетей 5G, для однозвеньеовой сети IAB, длительность переключения должна удовлетворять оценке сверху $s < 0.8$ мс (так как $s^{-1} > 1.25$). Для многозвеньеовой сети IAB подобная оценка не подойдет, и для более точной оценки нужно учитывать число и параметры звеньев и узлов маршрута. В частности, необходимо учитывать скорости передачи в радиоканалах, связывающих транзитные узлы, длительности фаз полудуплексного режима передачи и быстроедействие процессоров транзитных узлов.

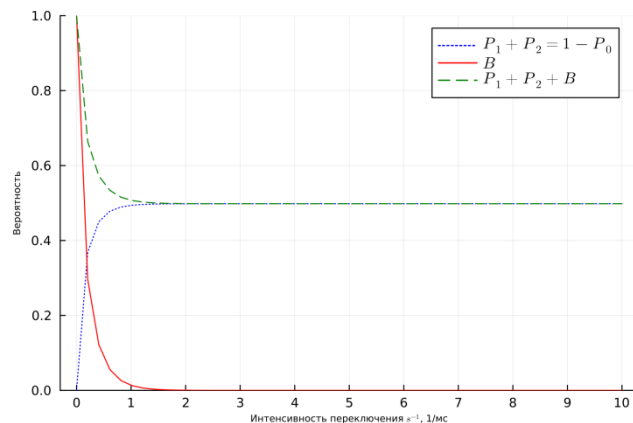
На рис. 6 построены графики вероятностей обслуживания очередей прибором, блокировки доступа хотя бы одной из очередей и их сумма в зависимости от интенсивности переключения между очередями.

График на Рис.6 показал, что начиная с $s^{-1} > 1.5$ вероятности поступления и не поступления (вероятности обслуживания очередей вместе с блокировкой доступа) заявок совпадают. Это объясняется тем, что суммарная предложенная нагрузка $\rho = \rho_1 + \rho_2 \approx 1$, где $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ ($i=1,2$), то есть в сумме,

время поступления заявок (при почти отсутствующих блокировках) будет совпадать со временем их обслуживания, что и даст нам равные вероятности со значением ≈ 0.5 . Таким образом, с увеличением суммарной нагрузки, будут расти описанные выше вероятности.



Р и с. 5. Средние времена ожидания заявок в очередях Q_i
F i g. 5. The average waiting times for requests in the queues Q_i



Р и с. 6. Вероятности не поступления заявок в систему, блокировок доступа и их сумма

F i g. 6. Probabilities of requests not entering the system, access blockings, and their sum

Закключение

В работе построена модель поллингового обслуживания с двумя очередями и получены некоторые BBX системы, которые позволяют оценить задержки и блокировки доступа в сети с применением технологии IAB, при учете некоторых упрощающих предположений. Для длительностей задержек и блокировок доступа на граничных узлах проведен численный анализ, который позволяет дать оценку сверху для длительности переключения, соответствующей требованиям 5G NR.

Одной из задач дальнейших исследований стоит формулировка и решение задачи оптимизации для построения наиболее эффективной многозвеньеовой сети IAB, в которой нагрузка на узлы сети будет сбалансирована, а показатели качества обслуживания пользователей останутся высокими.

References

1. Polese M., et al. Integrated Access and Backhaul in 5G mmWave Networks: Potential and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2020;58(3):62-68. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900346>
2. Molchanov D.A., Begishev V.O., Samuylov K.E., Koucheryavy D.A. *Seti 5G/6G: arhitektura, tekhnologii, metody analiza i rascheta* [5G/6G networks: architecture, technologies, analysis and calculation methods]. M.: RUDN Publishing House; 2022. 516 p. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LLEAE
3. Sadovaya Y., et al. Integrated Access and Backhaul in Millimeter-Wave Cellular: Benefits and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2022;60(9):81-86. <https://doi.org/10.1109/MCOM.004.2101082>
4. Li Y., et al. Integrated access and backhaul optimization for millimeter wave heterogeneous networks. *arXiv:1901.04959*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.04959>
5. Ronkainen H., Edstam J., Ericsson A., Östberg C. Integrated access and backhaul a New Type of Wireless Backhaul in 5G. *Ericsson Technology Review*. 2020;2020(7):2-11. <https://doi.org/10.23919/ETR.2020.9905510>



6. Krishnan K.S.A., Sharma V. Distributed Control and Quality-of-Service in Multihop Wireless Networks. In: 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City, MO, USA: IEEE Press; 2018. p. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422304>
7. Giuliano R. From 5G-Advanced to 6G in 2030: New Services, 3GPP Advances, and Enabling Technologies. *IEEE Access*. 2024;12:63238-63270. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396361>
8. Li Q., Novlan T., Dahlman E. NR Integrated Access and Backhaul. In: Lin X., Lee N. (eds.) 5G and Beyond. Springer, Cham; 2021. p. 485-501. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8_16
9. Gomez-Cuba F., Zorzi M. Optimal link scheduling in millimeter wave multi-hop networks with MU-MIMO radios. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(3):1839-1854. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2959295>
10. Alghafari H., Sayad Haghighi M. Decentralized Joint Resource Allocation and Path Selection in Multi-hop Integrated Access Backhaul 5G Networks. *Computer Networks*. 2022;207:108837. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108837>
11. Madapatha C., et al. On topology optimization and routing in integrated access and backhaul networks: A genetic algorithm based approach. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021;2:2273-2291. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3114669>
12. Tafintsev N., Moltchanov D., Yeh S.-p., Nikopour H., Mao W., Orhan O., Talwar S., Valkama M., Andreev S. Joint Path Selection and Resource Allocation in Multi-Hop mmWave-based IAB Systems. In: ICC 2023 – IEEE International Conference on Communications. Rome, Italy: IEEE Press; 2023. p. 4194-4199. <https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279180>
13. Jayasinghe P., Tölli A., Kaleva J., Latva-Aho M. Traffic Aware Beamformer Design for Flexible TDD-Based Integrated Access and Backhaul. *IEEE Access*. 2020;8:205534-205549. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037814>
14. Yarkina N., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Counter Waves Link Activation Policy for Latency Control in In-Band IAB Systems. *IEEE Communications Letters*. 2023;27(11):3108-3112. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3313233>
15. Neely M.J. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems. *Synthesis Lectures on Learning, Networks, and Algorithms*. 2010. Vol. 3. 199 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79995-2>
16. Tassiulas L., Ephremides A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1992;37(12):1936-1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>
17. Silard M., Fabian P., Papadopoulos G.Z., Savelli P. Frequency Reuse in IAB-based 5G Networks using Graph Coloring Methods. In: 2022 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS). Argostoli, Greece: IEEE Press; 2022. p. 104-110. <https://doi.org/10.1109/GIIS56506.2022.9937005>
18. Khayrov E., Koucheryavy Y. Packet Level Performance of 5G NR System Under Blockage and Micromobility Impairments. *IEEE Access*. 2023;11:90383-90395. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3307021>
19. Salimzyanov R., Moiseev A. *Uravnenie lokal'nogo balansa dlya raspredeleniya veroyatnostej chisla klientov v uzлах IAB-seti* [Local Balance Equation for the Probability Distribution of the Number of Customers in the IAB Network]. In: *Sistemy upravleniya, informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie* [Proceedings of the Conference on Control Systems, Information Technology and Mathematical Modeling]. Omsk: OmSTU; 2023. p. 284-289. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EJLOAK
20. Vishnevskiy V.M., Semenova O.V. *Sistemy pollinga: Teoriya i primeneniye v shirokopolosnykh besprovodnykh setyah* [Polling systems: Theory and application in the broadband wireless networks]. M.: Technosphere; 2007. 312 p. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QMRYPZ
21. Rykov V.V. On analysis of periodic polling systems. *Automation and Remote Control*. 2009;70:997-1018. <https://doi.org/10.1134/S0005117909060071>
22. Takagi H. Analysis of polling systems. MIT Press; 1986. 175 p.
23. Takagi H., Kleinrock L. A tutorial on the analysis of polling systems. Los Angeles: Computer Science Department, University of California; 1985. Report No. CSD-850005. 172 p.
24. Takagi H. Mean message waiting times in symmetric multiqueue systems with cyclic service. *Performance Evaluation*. 1985;5(4):271-277.
25. Gaidamaka Y.V., Zaripova E.R. Polling Model of a SIP Server with Exhaustive and GatedService Disciplines. *RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics*. 2013;(1):52-57. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PRNLWV
26. Zhivtsova A., Beschastnyi V., Koucheryavy Y., Samouylov K. A Survey of Delay-Oriented Dynamic Link Scheduling Policies for 5G/6G Integrated Access and Backhaul Systems. *IEEE Access*. 2024;12:118565-118586, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3446569>

Поступила 10.07.2023; одобрена после
рецензирования 05.09.2023; принята к публикации
23.10.2023.

Submitted 10.07.2023; approved after reviewing
05.09.2023; accepted for publication 23.10.2023.



Об авторе:

Николаев Дмитрий Иванович, 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/0009-0001-5885-8566>**, 1032201198@rudn.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Dmitry I. Nikolaev, 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/0009-0001-5885-8566>**, 1032201198@rudn.ru

The author has read and approved the final manuscript.

ⁱ 3GPP Technical Specification Group Services and System Aspects (2020) Technical Report TR 21.917, Release 17 description; Summary of Rel-17 Work Items (Release 17).

ⁱⁱ ETSI Technical Specification TS 138 474 V16.0.0 (2020-07) 5G NG-RAN. F1 data transport (3GPP TS 38.874 version 16.0.0 Release 16). [Электронный ресурс]. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138400_138499/138474/16.00.00_60/ts_138474v160000p.pdf (дата обращения: 10.07.2023).