

На правах рукописи



Рындин Артём Валерьевич

**МЕТОД ПРИОРИТЕТНОЙ МУЛЬТИПОТОКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ
МНОГОМОДАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2023

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южном федеральном университете»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент
Веселов Геннадий Евгеньевич
- Официальные оппоненты:** **Рогозинский Глеб Гендрихович**
доктор технических наук, начальник НОЦ «Медиацентр», профессор кафедры информатики и компьютерного дизайна, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»
- Кочеткова Ирина Андреевна**
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятности ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»
- Ведущая организация:** ФГКВБОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации»

Защита состоится «03» марта 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.398.02 при Северо-Кавказском федеральном университете по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корпус 20, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СКФУ по адресу: 355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2, и на сайте: <https://www.ncfu.ru/export/uploads/dokumenty-dissertacii/Dissertaciya-Ryndina.pdf>

С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте СКФУ: https://ncfu.ru/science/dissertacionnye-sovety/obyavleniya-o-zaschite-dissertaciy/Ryndin-Artm-Valer_evich/

Автореферат разослан «__» _____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.398.02
доктор физико-математических наук, профессор



Г.В. Шагрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Информационно-коммуникационные технологии являются естественным окружением современного человека. Они призваны решать широкий круг задач: сбор, обработка, хранение, распространение, отображение и использование информации в интересах пользователей. В настоящее время появилось множество сервисов многомодального взаимодействия: сервисы биометрической аутентификации и идентификации, интернет-банкинг, системы контроля состояния диспетчеров на критически важных объектах и т.д. Подобные сервисы не требуют для своей работы передачи полного объема данных с удаленных объектов в сетях передачи данных, а лишь только отдельных модальностей.

Под модальностью следует понимать физически регистрируемый элемент коммуникации (человеко-машинной и/или межличностной), включающий как собственно передаваемую информацию (сообщение), так и информацию о самом индивиде (его состоянии; отношении к сообщению, к собеседнику, к коммуникации и пр.).

Современные персональные средства коммуникации пользователей оборудованы несколькими интерфейсами связи (ИС) и используют беспроводную связь для передачи данных. При сценарии, когда многомодальная информация (МИ) от первой системы передается второй системе по открытым каналам беспроводных сетей связи, трудно обеспечить эффективную, своевременную передачу данных, поскольку нет постоянного подключения к какой-либо точке доступа (базовой станции), которая бы гарантирована необходимый уровень качества. Это связано с тем, что пользователь может перемещаться от одной точки доступа (базовой станции) к другой.

Вопросам обработки МИ посвящено множество работ как отечественных (Басов О.О., Карпов А.А., Ронжин А.Л.), так и зарубежных исследователей (Oviatt S., Turk M., Norris S.). Однако вопросы передачи информации в многомодальном представлении в этих работах были рассмотрены в общих чертах без учета ее особенностей и только в рамках традиционных, исторически сложившихся технологий передачи, не учитывая специфики технологий беспроводной передачи данных, сетей связи следующего поколения (NGN – Next Generation Network).

Таким образом, при анализе вопросов передачи МИ были выявлены противоречия.

Противоречие в практике состоит в том, с одной стороны все больше трафика МИ присутствует в сети, с другой стороны, существующие способы передачи МИ не удовлетворяют требуемым показателям производительности и своевременности при недостатке ресурсов сети.

Противоречие в теории обусловлено тем, что в настоящее время существующие методы исследования систем, не рассматривают особенности построения моделей систем мультиточечной передачи МИ.

Одним из решений указанных противоречий может быть разработка моделей, а также методов и алгоритмов решения задач передачи МИ путем применения мультиточечной схемы передачи данных.

Мультиточечная передача данных является одним из актуальных направлений современных исследований, которому посвящены стандарты протоколов мультиточечной передачи данных MPTCP (RFC 6824), SCTP (RFC 4960), проектов Multipath RTP (MPRTP) и Multi-Flow Real-time Transport Protocol (MRTP), Multi-Path Extensions for QUIC (MP-QUIC), а также большое количество научных работ, как зарубежных, так и отечественных ученых К.Сибролу, С.Рао, Д. Юрка, Ж. Найтигале, К. Де Конинк, О. Бонавентур, Р.Б. Трегубов, Е.А. Пакулова и т.д.

Объектом исследования в данной работе является система мультиточечной передачи МИ. **Предметом исследования** являются методы, алгоритмы, методики передачи МИ, представленной в виде отдельных модальностей и их комбинаций, в гетерогенных беспроводных сетях.

Целью работы является повышение эффективности передачи МИ за счет организации мультипоточковой передачи МИ в гетерогенной беспроводной сети с учетом приоритетов модальностей. Под эффективностью при этом понимается своевременность и производительность передачи МИ. Своевременность доставки сообщений характеризует количество данных, доставленных в сроки времени жизни многомодального сообщения (МС) и определяется как отношение доставленных сообщений в рамках времени их жизни к общему количеству переданных сообщений. Производительность характеризует удовлетворение требований класса QoS (Quality of Service, параметры качества обслуживания).

Научная задача диссертационного исследования заключается в разработке моделей мультипоточковой передачи МИ и метода приоритетной мультипоточковой передачи МИ, позволяющего повысить эффективность передачи МИ в условиях широкого применения многомодальных пользовательских интерфейсов и гетерогенных беспроводных сетей.

Для решения общей научной задачи в работе поставлены и решаются следующий **частные задачи исследования**:

1. Разработать модель системы мультипоточковой передачи МИ в гетерогенной сети, учитывающей приоритет входных модальностей и вероятностно-временные характеристики сетей передачи данных.
2. Разработать метод приоритетной мультипоточковой передачи МИ в гетерогенной беспроводной сети связи, позволяющий повысить эффективность передачи МИ.
3. Разработать методику оценки эффективности передачи МИ, позволяющую оценить эффективность предложенного метода.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель системы мультипоточковой передачи МИ в гетерогенной сети, учитывающей приоритет входных модальностей и вероятностно-временные характеристики сетей передачи данных.
2. Метод приоритетной мультипоточковой передачи МИ в гетерогенной беспроводной сети, позволяющий повысить эффективность передачи МИ.
3. Методика оценки эффективности передачи МИ в гетерогенной сети связи, позволяющая оценить эффективность предложенного метода и модели.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы теории множеств, теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории телетрафика. Для проведения численных экспериментов применялось математическое программное обеспечение РТС Mathcad Prime 5.0, для имитационного моделирования использовалась среда AnyLogic 8.7.12.

Соответствие шифру специальности. Диссертационная работа соответствует специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Научная новизна представленных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель обслуживания МС при мультипоточковой передаче данных в виде гетерогенной обобщенной модели Эрланга с ожиданием и нетерпеливыми заявками, особенность которой заключается в том, что для обработки и передачи данных предоставлены два гетерогенных канала конечного объема и разной интенсивности обслуживания, а также позволяющие учитывать срок жизни МС, после которого передавать их нет смысла, что адекватно описывает реальные процессы передачи данных.
2. Предложен новый метод мультипоточковой передачи МИ в гетерогенной беспроводной сети связи, который впервые рассматривает возможность передачи различных модальностей с разным уровнем приоритета и их комбинаций в мультипоточковом сценарии передачи данных.
3. Предложена методика оценки эффективности передачи в гетерогенной сети связи, позволяющая оценить эффективность предложенного метода и модели на основе показателей своевременности и производительности передачи.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в построении новых моделей передачи данных, чувствительных к задержкам на базе инструментария теории массового обслуживания, а также разработанном новом методе приоритетной передачи МИ, в котором модальности в составе МС имеют разный приоритет.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования, в том числе аналитические формулы для расчета параметров предлагаемых моделей могут быть использованы при анализе функционирования реальных многомодальных и гибридных инфокоммуникационных систем. Найденные основные вероятностные характеристики исследуемых математических моделей позволяют оценить их основные характеристики и дают возможность научно обоснованно выбирать значения параметров сетей и управляющих протоколов доступа, что существенно расширяет возможности решения ряда проблем в области проектирования сетей связи нового поколения. Разработанный комплекс программ для численного анализа имитационного моделирования позволяет выполнять расчеты параметров QoS при заданных входной нагрузке и количестве ресурсов сети.

Достоверность полученных автором теоретических и практических результатов обусловлена строгостью использования математического аппарата, а также согласованностью результатов имитационного, аналитического моделирования и натуральных экспериментов.

Обоснованность полученных результатов обеспечивается корректным использованием методов математического моделирования, методов теории телетрафика, использованием апробированного инструментария, математически адекватного описываемым процедурам и функциям, выполняемым в сети передачи данных.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований, полученные в диссертации, были внедрены в практической деятельности ООО «ВИДЕОСТРОЙКОМПЛЕКС», а также нашли свое отражение в материалах грантов РФФИ «Принципы передачи многомодальной информации в роботизированных системах» (№ 19–37-90129), «Принципы построения интеллектуальных инфокоммуникационных систем для комфортного обслуживания пользователей информационного пространства» (№ 18-07-00380). Кроме того, результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры синергетики и процессов управления имени профессора А.А. Колесникова ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» при подготовке бакалавров направления 27.03.03 «Системный анализ и управление» и магистров направления подготовки 27.04.03 «Системный анализ и управление».

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследования были доложены на научно-практических международных конференциях: 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (г. Москва, 2017 г.), «Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике» (г. Курск, 2017 г.), 12th International conference on Security of Information and Networks (г. Сочи, 2019 г.), 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (г. Лимассол, Кипр, 2020г.), HCI International (Копенгаген, г. Дания, 2020 г.), 14th IEEE International Conference “Application of Information and Communication Technologies” (г. Ташкент, Узбекистан, 2020 г.), 3d International Conference “Futuristic trends in Networks and Computing Technologies (г. Таганрог, 2020 г.), XI Всероссийская научная конференция "Системный синтез и прикладная синергетика"(п. Нижний Архыз, 2022 г.).

Результаты исследований были опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 3 изданиях, включенных ВАК РФ в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 6 публикаций в изданиях, входящих в системы индексирования научных работ WoS и/или Scopus; 1 патенте на изобретение; 1 свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором самостоятельно. Во всех совместно опубликованных статьях и докладах соискателю принадлежит ведущая роль при постановке и решении частных научных задач, а также обобщении полученных

результатов. Направления исследований диссертационной работы и постановки задач обсуждались с научным руководителем, д.т.н., доцентом Веселовым Г.Е и доцентом Южного федерального университета к.т.н. Пакуловой Е.А., что отражено в совместных публикациях с автором диссертационной работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 170 наименований, 2 приложений и изложена на 138 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, цель и предмет исследования, сформулирована научная задача и методы исследования, описаны положения, выносимые на защиту, их научная новизна и соответствие паспорту специальности, приведены сведения о публикациях и апробации полученных результатов.

В первой главе производится системный анализ передачи МИ в инфокоммуникационных системах, обусловленных с одной стороны спецификой МИ, ее съема и обработки, с другой стороны спецификой передачи данных в беспроводных сетях связи.

В работе обосновано наличие приоритетов различных модальностей и дано описание принципов объединения модальностей в рамках МС. Принято допущение, что различные модальности синхронизированы по времени.

Для многомодальных информационных систем актуальным является применение систем беспроводной связи. В этом случае данные пользователя передаются по открытому каналу публичных сетей, что вносит дополнительную нагрузку на сеть. Набор многомодальных данных и их размер может быть различным в зависимости от задачи. Таким образом, сеть представляется динамической системой с ограниченными ресурсами.

Одними из основных критериев эффективности функционирования инфокоммуникационных сетей является производительность и своевременность. Производительность определяет удовлетворение требований классам QoS, своевременность определяет свойство системы передачи обеспечивать доставку информации в сроки, гарантирующие выполнение соответствующей функции согласно целевому назначению системы.

При анализе вопросов передачи МИ было выявлено противоречие в практике: с одной стороны, все больше трафика МИ присутствует в сети, с другой стороны, существующие способы передачи МИ не удовлетворяют требуемым показателям производительности и своевременности при недостатке ресурсов сети. При этом следует отметить, что ввиду гетерогенности МИ в различных многомодальных системах требования к показателям QoS могут значительно различаться (табл.1).

Одним из решений указанного противоречия может быть применение мультипоточковой передачи МИ.

В заключении главы дана формальная постановка общей научной задачи исследования.

Дано: Система мультипоточковой передачи МИ S , в которую поступает поток МС $X(T_{ttl})$ с заданным временем их «жизни». В системе мультипоточковой передачи МИ может быть реализована единственная политика выбора ИС для передачи данных из множества Z . Множество параметров среды и условий функционирования задается множеством $E = \{L, N\}$, где L – множество доступных сетей связи, N – множество объемов их ресурсов. Показатели эффективности функционирования системы определяется множеством Q и в общем случае характеризуются показателями своевременности и производительности.

Таким образом, формально систему мультипоточковой передачи МИ можно записать следующим виде:

$$S = \{X(T_{ttl}), Z, E, Q\} \quad (1)$$

Таблица 1 – Требования к характеристикам QoS для передачи различных модальностей

QoS метрика	Человеко-машинные тактильные ощущения	Видео	Аудио	3D	Обоняние	Машинно-человеческая тактильная обратная связь	
Тип пакета	(Позиция, Скорость, Сила, Крутящий момент)	H.264/MPEG-4	Долби-Сураунд	Сетка, Текстура	Запах	Кинестетические сигналы	Тактильные сигналы
Размер пакета(В)	1 DoF: 2-8	1.5К	>50	1.5	1	1 DoF: 2-8	1 DoF: 2-8
	3 DoFs: 6-24					3 DoFs: 6-24	10 DoFs: 20-80
	6 DoFs: 12-48					6 DoFs: 12-48	100 DoFs: 200-800
Вариация задержки (мс)	1-2	30	30	30	≤23	2	1
Задержка (мс)	1-50	≤400	≤150	100-300	0-1500	10	1
Пропускная способность (кбит/с)	≥512	≥2500	≥128	≥1200	0.008	≥512	≥1000
Уровень потери данных (%)	0.01-10	1	1	1-10	1	10	0.01
Частота обновления (Гц)	≥1000	30	20	30	0.1-10	≥500	≥1000

Требуется:

Разработать метод M повышения эффективности функционирования системы мультиточковой передачи МИ по показателям эффективности при заданной входной нагрузке и объеме ресурсов сети, т.е. необходимо найти метод M такой, что:

$$M: \langle S, X, Z, E, Q \rangle \rightarrow \{\Delta q_1, \dots, \Delta q_n\} \mid \forall \Delta q_i > 0, q_i \in Q, i = 1 \dots n, \quad (2)$$

при этом $\Delta q_i = q_i^n - q_i^d, i = 1 \dots n$, где индекс «д» означает «до использования метода», индекс «п» - «после использования метода»; при ограничениях $Z = 1, L = 2, N \geq 1, 1 \leq T_{ttl} \leq 1500$ мс.

Во второй главе было произведено моделирование системы мультиточковой передачи МИ. Была предложена концептуальная модель системы мультиточковой передачи МИ с целью определения функциональных связей элементов системы.

Примем что обмен информацией между источником S и приемником D происходит посредством гетерогенной беспроводной сети, состоящей из L возможных каналов передачи данных. Связь реализуется как соединения пар IP-адресов.

Функционально модель передачи МИ можно представить как показано на рисунке 1.

Множество сигналов модальностей $NS = \{ns_a\}$ от пользователя снимаются многомодальным интерфейсом устройства-источника. В Блоке обработки и объединения входных модальностей они обрабатываются и формируется множество искусственных сигналов

$AS = \{as_q\}$. Далее множество искусственных сигналов $AS = \{as_q\}$ кодируется во множество входных модальностей $IM = \{IM_1, IM_2, \dots, IM_N\}$, из которых выделяются их параметры $F = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ и формируется МС M , которое передается в Блок распределения данных на ИС. Далее в Блоке распределения данных на ИС из сообщения M формируется множество протокольных блоков (ПБД) модальностей $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$. Так количество ПБД для каждого потока l определяется как $X_l = \left\lceil \frac{V_p}{MTU} \right\rceil$, где $\lceil x \rceil$ – округление в большую сторону при делении, V_l – объем данных, распределенных на субпоток l . Передача ПБД данных модальностей X осуществляется Блоком отправки согласно политики передачи, определенной в Блоке распределения данных на ИС. На приемнике ПБД данных модальностей X' принимаются и обрабатываются Блоком приема и обработки. Блок контроля и передачи осуществляет мониторинг состояния сетей и формирует сервисные ПБД ($Y_l^s, s \in S$).

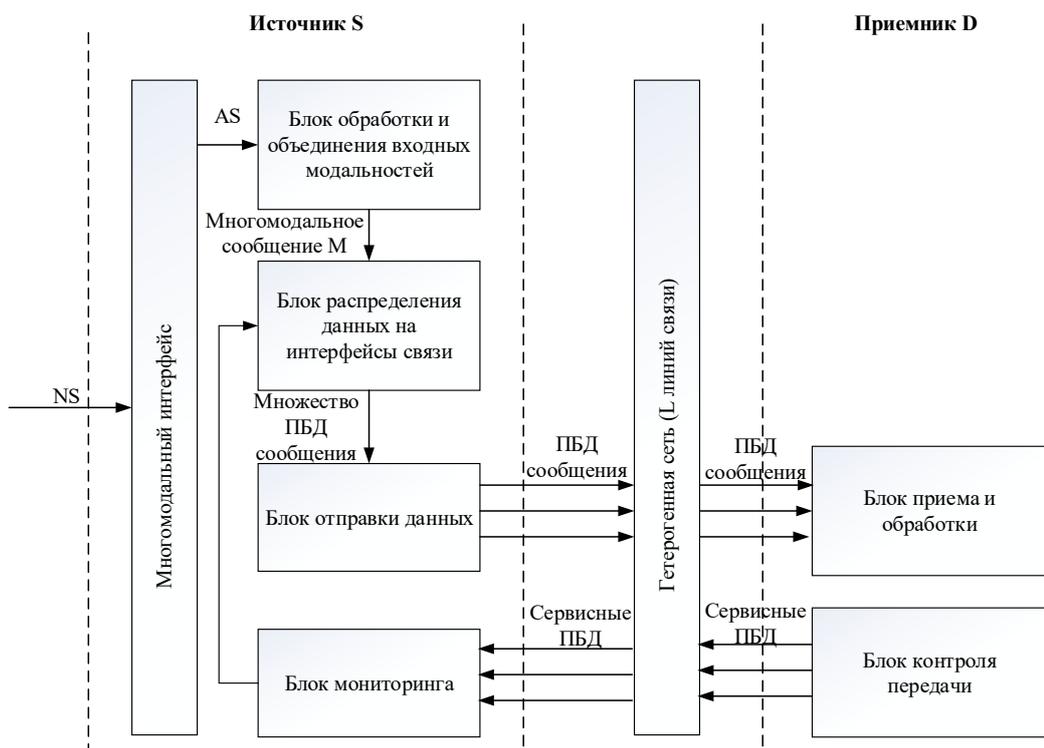


Рисунок 1 – Концептуальная модель системы передачи МИ

Для оценки вероятностно-временных характеристик качества обслуживания сети была предложена обобщенная гетерогенная модель Эрланга с ожиданием, особенность которой заключается в том, что для обработки и передачи данных предоставлены два гетерогенных ресурса конечного объема и разной интенсивности обслуживания. Для измерения пропускной способности каналов связи, а также для определения скорости передачи данных вводится понятие единицы канального ресурса (ЕКР) каждого типа, используемое для обслуживания поступающих ПБД модальностей.

Используя символику Д. Кендалла, такая СМО была представлена в следующем виде: $M / (M1, M2) / (N, M) / \infty / FIFO$. Схематическое изображение системы представлено на рисунке 2.

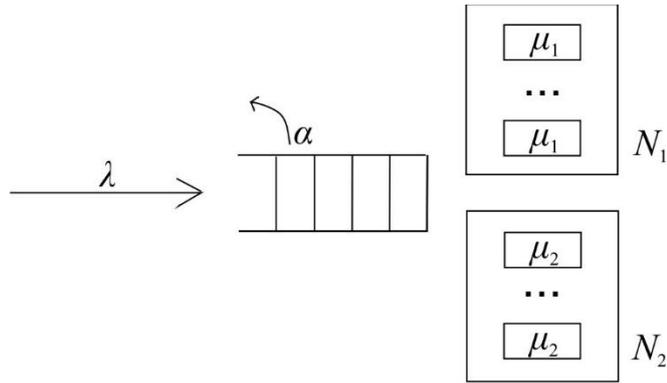


Рисунок 2 – Аналитическая модель системы мультипоточковой передачи данных

На вход СМО поступает пуассоновский поток заявок с интенсивностью λ . Предполагается, что канал включает в себя N_1 и N_2 единиц канального ресурса. Время обслуживания каждого сообщения является неотрицательной случайной величиной, имеющей экспоненциальное распределение с параметрами μ_1 и μ_2 соответственно. Если свободных ресурсов нет, то заявка поступает в очередь.

Обозначим $n_k(t)$ – число занятых ЕКР k -ого канала в момент времени t , $i(t)$ – число сообщений, находящихся в очереди в момент времени t . Трехмерный случайный процесс $\{n_1(t), n_2(t), i(t)\}$ является марковским.

Определим $P(n_1, n_2, i) = P\{n_1(t) = n_1, n_2(t) = n_2, i(t) = i\}$ – стационарные вероятности числа занятых ЕКР каналов и сообщений в очереди, здесь $n_1 = 0, 1, \dots, N_1$; $n_2 = 0, 1, \dots, N_2$, $i = 0, 1, \dots, \infty$. Так как сообщения в очереди начинают накапливаться только в том случае, если все ЕКР обоих каналов заняты ($n_1 = N_1$ и $n_2 = N_2$), то мы будем иметь дело с вероятностями только вида $P_0(n_1, n_2)$ и $P(N_1, N_2, i)$. При этом стационарные вероятности числа сообщений в очереди, имеющие вид $P(N_1, N_1, i) = P\{n_1(t) = N_1, n_2(t) = N_2, i(t) = i\}$, будем записывать как $\pi(i)$. В диссертации представлены диаграммы переходов для $P_0(n_1, n_2)$ и $\pi(i)$.

Принимая во внимание, что $V(n_1, n_2) = P(N_1 - n_1, N_2 - n_2)$, получаем системы линейных уравнений равновесия для стационарного распределения вероятностей числа занятых ЕКР каналов:

$$\begin{cases} \lambda P(0,0) = \mu_1 P(1,0) + \mu_2 P(0,1), \\ (\lambda + n_1 \mu_1) P(n_1, 0) = (n_1 + 1) \mu_1 P(n_1 + 1, 0) + \lambda P(n_1 - 1, 0) + \\ \quad + \mu_2 P(n_1, 1), \\ (\lambda + N_1 \mu_1) P(N_1, 0) = \lambda P(N_1 - 1, 0) + \mu_2 P(N_1, 1). \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (\lambda + n_2 \mu_2) P(0, n_2) = \mu_1 P(1, n_2) + (n_2 + 1) \mu_2 P(0, n_2 + 1), \\ (\lambda + n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2) P(n_1, n_2) = (n_1 + 1) \mu_1 P(n_1 + 1, n_2) + \\ \quad + \lambda P(n_1 - 1, n_2) + (n_2 + 1) \mu_2 P(n_1, n_2 + 1), \\ (\lambda + N_1 \mu_1 + n_2 \mu_2) P(N_1, n_2) = \lambda P(N_1 - 1, n_2) + \lambda P(N_1, n_2 - 1) + \\ \quad + (n_2 + 1) \mu_2 P(N_1, n_2 + 1). \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} (\lambda + N_2 \mu_2) P(0, N_2) = \mu_1 P(1, N_2), \\ (\lambda + n_1 \mu_1 + N_2 \mu_2) P(n_1, N_2) = (n_1 + 1) \mu_1 P(n_1 + 1, N_2) + \\ \quad + \lambda P(n_1 - 1, N_2), \\ (N_1 \mu_1 + N_2 \mu_2) P(N_1, N_2) = \lambda P(N_1 - 1, N_2) + \lambda P(N_1, N_2 - 1). \end{cases} \quad (5)$$

Для стационарного распределения вероятностей числа сообщений в очереди получим,

$$\pi(i) = \frac{\lambda}{(\mu + i\alpha)} \pi(i - 1) = \pi(0) \prod_{v=1}^i \frac{\lambda}{(\mu + v\alpha)}, \quad i = \overline{1, \infty}, \mu = N_1 \mu_1 + N_2 \mu_2 \quad (6)$$

Заметим, что при $\alpha > 0$ стационарный режим существует при любых значениях $\lambda, \mu_1, \mu_2, N_1$ и N_2 . При $\alpha = 0$ стационарный режим существует при $\lambda < N_1\mu_1 + N_2\mu_2$.

Для решения систем уравнений (3)-(5) был предложен рекуррентный скалярно-векторный алгоритм, подробное описание которого приведено в диссертации. В результате были получены выражения для следующих показателей качества.

Интенсивность λ_1 потери заявок

$$\lambda_1 = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha i \pi(i)$$

Вероятность P_0 потери заявок или долей сообщений, ушедших из очереди

$$P_0 = \frac{\lambda_1}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda} \sum_{i=0}^{\infty} i \pi(i)$$

Среднее количество заявок в очереди

$$\kappa = \sum_{i=0}^{\infty} i \pi(i)$$

Среднее время пребывания заявки в очереди

$$T_o = \frac{\kappa}{\lambda}$$

Среднее время пребывания заявки в системе

$$T_c = \frac{\kappa}{\lambda} + \frac{1}{\mu}$$

Имитационная модель системы мультиточковой передачи данных реализована в среде AnyLogic 8.7.12. Логика работы модели соответствует аналитической модели. Подробное описание имитационной модели приведено в тексте диссертации.

Адекватность предлагаемой математической модели подтверждается согласованностью результатов численной реализации аналитической модели и результатов имитационного моделирования.

В результате анализа чувствительности для изменяющейся интенсивности входных потоков при моделировании были получены зависимости коэффициентов потерь от количества сгенерированных сообщений (рисунок 3) для каждого из субпотоков. В результате анализа чувствительности для изменяющегося количества канальных ресурсов были получены зависимости коэффициентов потерь для каждого из субпотоков от общего количества канального ресурса (рисунок 4). Очевидно, что потери обратно пропорциональны количеству ресурсов.

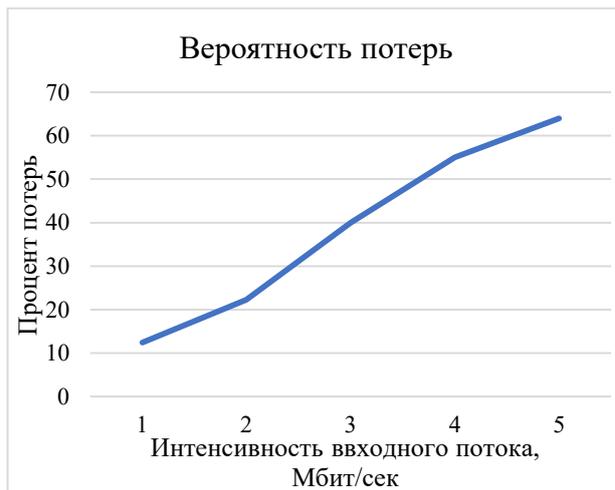


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента потерь от количества сгенерированных сообщений

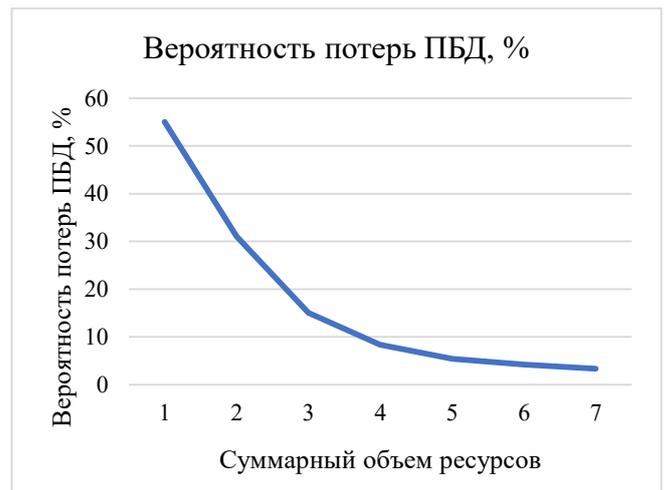


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента потерь от количества ресурсов гетерогенной сети

Во третьей главе для решения задач определения каналов связи для передачи многомодальных данных разработан метод мультиточковой передачи МИ, учитывающий ее приоритет.

Предложенный метод выполняет следующие задачи.

Первая задача сводится к определению характеристик МИ и требований к QoS. Вторая задача заключается в определении объема ресурсов доступных сетей связи и их характеристик. Третья задача сводится к определению последовательности ПБД МС в зависимости от их приоритета, доступных ресурсов сетей, а также предполагаемого времени передачи. При этом формируются субпотoki в рамках мультипотокковой передачи данных.

Входными данными для метода приоритетной мультипотокковой передачи МИ являются: МС, состоящее из ПБД модальностей различной степени приоритета объемом $X = \{X_1, X_2, \dots, X_K\}$, где K – количество модальностей в МС, и список доступных ИС для передачи данных $L = \{L_1, L_2, \dots, L_L\}$, где L – общее количество субпотокков. Выходными параметрами является распределенные ПБД модальностей на доступные субпотокки передачи.

Рассмотрены 2 фазы работы метода: начальная и основная. В начальный момент времени система передачи данных не обладает информацией о параметрах качества сетей, если ИС не был использован до начала работы многомодального сервиса. На данном этапе производится редундантная передача сообщений модальностей. Передача одних и тех же данных на все доступные каналы связи повышает вероятность доставки данных, но не гарантирует оптимального использования канального ресурса. Перерасчет показателей качества обслуживания сети происходит после получения сервисных ПБД на каждом из каналов связи.

После получения первого сервисного ПБД согласно методу приоритетной мультипотокковой передачи МИ необходимо вычислить доступную пропускную способность доступных каналов связи следующим образом:

$$C_i(t_1 - t_0) = \frac{(X_i(t_1 - t_0) + A_i(t_1 - t_0)) * (1 - \omega_i(t_1 - t_0))}{t_1 - t_0}, \quad (7)$$

где t_0 – время отправления первой группы ПБД по субпотокку i , t_1 – время получения первой группы ПБД, $X_i(t_1 - t_0)$ – объем ПБД МС, отправленных в потоке i за время $t_1 - t_0$, $A_i(t_1 - t_0)$ – объем ПБД сторонних приложений, отправленных в потоке i за время $t_1 - t_0$, $\omega_i(t_1 - t_0)$ – количество потерь в потоке i за время $t_1 - t_0$.

Каждое МС имеет срок жизни T_{ttl} . Поскольку данные модальностей чувствительны к задержке, при многомодальном общении после срока T_{ttl} они могут быть неактуальны.

Для обеспечения передачи высокоприоритетных модальностей разработанный метод ранжирует ПБД модальностей разного приоритета в рамках МС: $X = \{X_j\}, j = \overline{1, K}$. При этом предположим, что МС безусловно имеют более высокий приоритет, чем данные других приложений.

Вычисляется объем данных, который предположительно может быть передан в рамках жизни МС для каждого из субпотокков:

$$Y_i = T_{ttl} * C_i(\tau) \quad (8)$$

и общий объем данных, который может быть передан по всем субпотоккам в рамках T_{ttl} :

$$Y = \sum_{i=1}^L Y_i \quad (9)$$

Полученные значения объемов ресурсов ранжируются от большего к меньшему: $Y = \{Y_i\}, i = \overline{1, L}$.

Далее, в рамках метода приоритетной мультипотокковой передачи МС проверяется, могут ли ПБД МС X быть переданы в рамках T_{ttl} по какому-либо субпотокку. Если условие достижимо, то МС распределяется на один из субпотокков полностью. В противном случае распределяются ПБД каждой модальности отдельно $X_j, j = \overline{1, K}$. При этом, если на один из субпотокков уже распределены ПБД модальностей, проверяется свободное количество ресурсов в этом субпотокке для распределения ПБД текущей модальности.

В случае, если ПБД какой-либо модальности не могут быть распределены на какой-либо субпоток (ресурсы все заняты), то ПБД модальностей распределяются на следующий субпоток. Если ПБД модальности не могут быть распределены ни на один субпоток, то они распределяются частями, начиная с высокоприоритетных, на все субпотокки до момента, когда все ПБД модальностей будут распределены или заняты все доступные ресурсы.

Согласно предложенному методу, каждый раз, когда отправитель получает сервисный ПБД, он определяет коэффициенты потерь $\omega'_i, i = \overline{1, L}$ и значения текущих доступных пропускных способностей сетей $C'_i, i = \overline{1, L}$ для каждого потока L.

Коэффициент потерь $\omega_i, i = \overline{1, L}$ определяется как процент потерь ПБД МС, которые были отправлены, но не доставлены приемнику.

Пропускная способность за время τ для каждого из субпотокков определяется как:

$$C_i(\tau) = \frac{(\beta_i(\tau) - (1 - \omega_i(\tau)))}{\tau}, i = \overline{1, L} \quad (10)$$

где $\beta_i(\tau)$ – количество бит, отправленных в поток за время τ .

Под средней задержкой доставки ПБД понимается временной интервал, необходимый на доставку ПБД сообщения от источника до получателя, плюс время доставки сервисного ПБД.

Кроме того, в рамках третьей главы предложена методика оценки эффективности мультипотокковой передачи МИ, предполагающая выполнение следующих шагов:

- определение параметров QoS;
- определение показателя своевременности;
- определение показателя производительности.

Своевременность – свойство системы передачи обеспечивать доставку информации в сроки, гарантирующие выполнение соответствующей функции согласно целевому назначению системы.

$$E = \frac{N_{\text{ДОСТ.БД}}}{N_{\text{ПЕРЕД.БД}}}, \quad (11)$$

где $N_{\text{ДОСТ.БД}}$ – количество всех доставленных блоков данных (любого приоритета), $N_{\text{ПЕРЕД.БД}}$ – общее количество переданных сообщений.

Производительность (C) – свойство системы обеспечивать обслуживание с требуемым качеством требуемого объема данных на заданном интервале времени. Для анализа производительности были рассмотрены параметры QoS для сетей передачи данных, рассмотренные в МСЭ Y.1540 и МСЭ Y.1541.

Для апробации метода приоритетной передачи многомодальной информации, был сформулирован алгоритм приоритетной передачи МС в имитационной среде AnyLogic 8.7.12, реализующий логику разработанного метода (рисунок 5).

Для анализа работы алгоритма был проведен ряд экспериментов. Предположим, что на вход поступает поток ПБД МС с интенсивностью 4,3 Мбит/сек, состоящий из визуальной и аудио модальностей. Допустим, что ресурсная емкость для субпотокков меняется от 1 до 4 Мбит/сек. Значение статично для каждого эксперимента. Для простоты моделирования предположим, что размер ПБД для всех уровней приоритета одинаков. Время обслуживания пакета обратно пропорционально количеству свободных ресурсов сети. Требования к производительности ограничивается нулевым классом QoS, требование к своевременности должно стремиться к единице. Очевидно, что данные показатели достижимы только при достаточном количестве ресурсов.

Каждый эксперимент длился 10000 секунд с инициализацией генератора случайных чисел случайным начальным числом для задания количества генерируемых входных сообщений. Количество входных сообщений в единицу времени фиксировано. Результаты экспериментов приведены в таблице 2 (средние значения).

Из результатов экспериментов видно, что при пропускной способности меньшей требуемой в 2 раза (например, $N_1 = 1$ Мбит/сек, $N_2 = 1$ Мбит/сек), общий процент потерь достигает 45%, при двойном увеличении пропускной способности процент потерь составляет 1,5%, что объясняется формированием очереди и временем жизни ПБД. Т.е. процент потерь в данном случае включает и ПБД модальностей, которые были потеряны в сети, и которые были отброшены в результате прошествия срока их жизни.

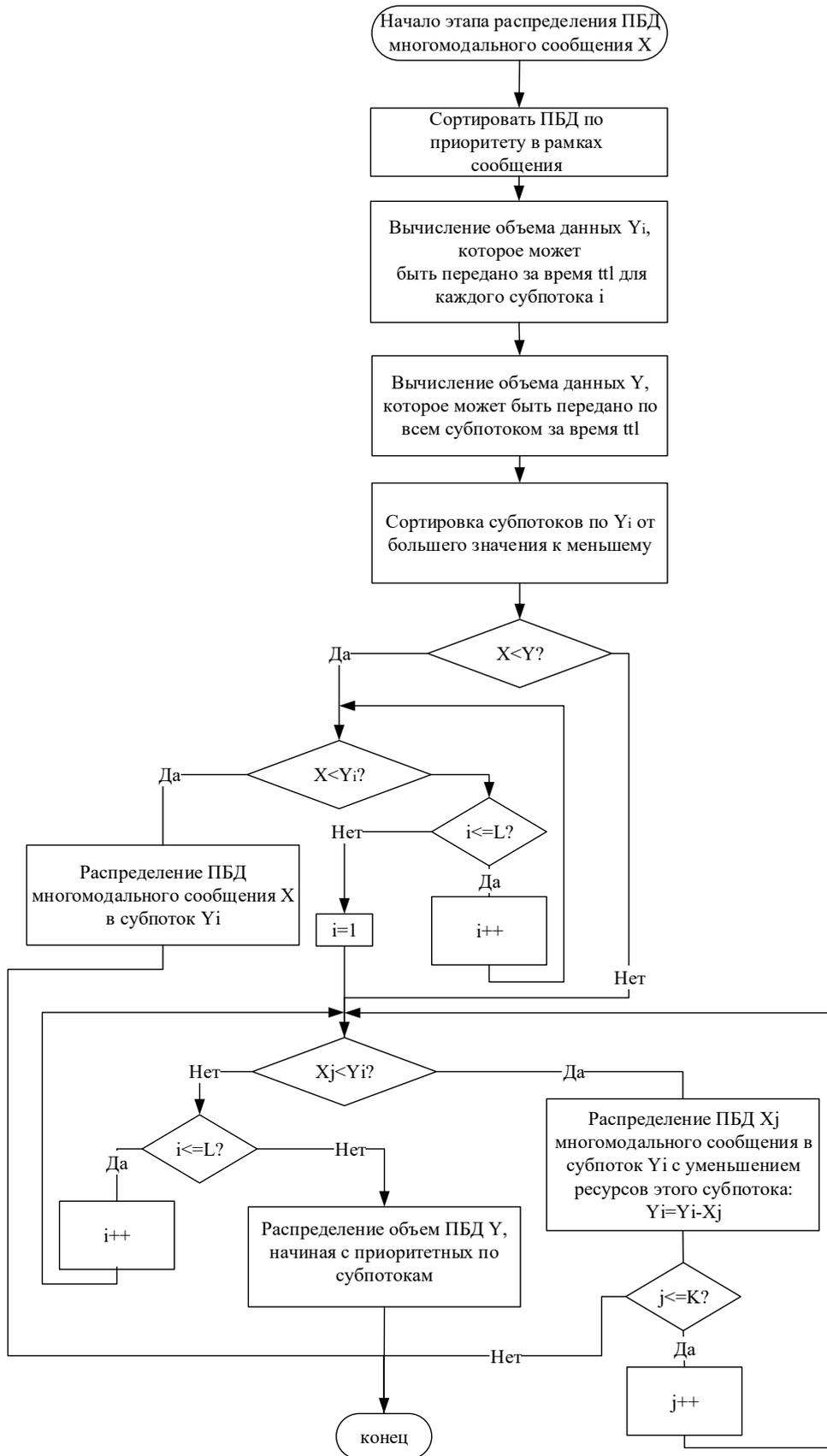


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма приоритетной мультипотоковой передачи МИ для имитационной среды AnyLogic

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования передачи сообщений

Показатели качества передачи данных	Входные параметры модели			
	$\lambda = 4,3$ Мбит/сек			
	$N_1 = 1$ Мбит/сек $N_2 = 1$ Мбит/сек	$N_1 = 1$ Мбит/сек $N_2 = 2$ Мбит/сек	$N_1 = 2$ Мбит/сек $N_2 = 4$ Мбит/сек	$N_1 = 4$ Мбит/сек $N_2 = 4$ Мбит/сек
Общий процент потерь ПБД	45%	24%	2,8%	1,5%
Среднее время передачи	48 мсек	39 мсек	14 мсек	11 мсек

Таким образом, по результатам тестирования алгоритма передачи мультиточковой передачи МИ можно сделать следующие выводы. Очевидно, что применение разработанного алгоритма повышает эффективность передачи МИ в сценарии мультиточковой передачи данных. Общее количество потерянных ПБД сообщений в субпотоках снизилось на 6,75% по сравнению со сценарием мультиточковой передачи данных, рассмотренным при имитационном моделировании без применения разработанного метода. Количество потерянных высокоприоритетных ПБД модальностей уменьшилось в 1,5 раза. Коэффициент своевременности для решения без предлагаемого алгоритма (при достаточном количестве ресурсов для передачи, когда интенсивность входной нагрузки составляет 4,3 Мбит/сек, а суммарный объем ресурсов 8 Мбит/сек) равен 0.95, с предлагаемым решением – 0.98.

В результате можно сделать вывод, что при достаточном количестве ресурсов, предлагаемое решение полностью удовлетворяет требованиям своевременности и производительности. Однако даже при значительном ухудшении показателей качества передачи, предлагаемое решение позволяет повысить критерий своевременности и некоторые частные показатели производительности.

Кроме того, было проведено экспериментальное исследование сформулированного на базе метода приоритетной мультиточковой передачи МИ алгоритма в рамках протокола мультиточковой передачи МРТСР.

Для того чтобы оценить эффективность предложенных решений были написаны программы для отправителя и получателя в клиент-серверной архитектуре с использованием двух ИС под операционной системой Ubuntu 20.04, реализующие алгоритм приоритетной мультиточковой передачи МИ, сформулированного для протокола МРТСР на основе предложенного метода, в гетерогенной компьютерной сети.

В результате экспериментов было выявлено, что разработанное решение не оказывает влияния на вариацию задержки в среднем и сопоставимо с результатами стандартного решения протокола МРТСР (рисунок 6).

Эксперимент показал, что в среднем при использовании разработанного алгоритма приоритетной мультиточковой передачи МИ задержка приема-передачи значительно не меняется (рисунок 7).

Очевидно, что алгоритм, разработанный на базе метода приоритетной мультиточковой передачи МИ уменьшает количество потерь приоритетных ПБД МС (рисунок 8).

Согласно проведенным экспериментам, производительность системы мультиточковой передачи МИ можно отнести к 0 и 1 классу QoS. Однако коэффициент потерь оказывается выше, чем в рекомендациях МСЭ Y.1540 и МСЭ Y.1541 для соответствующих классов. Это обусловлено тем, что при проведении экспериментов было наложено серьезное ограничение на количество ресурсов, значительно меньших, чем входная нагрузка.

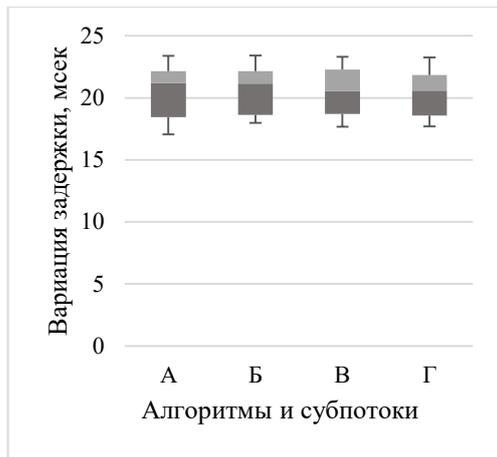


Рисунок 6 – Вариация задержки для А) субпотока 1 предложенного решения; Б) субпотока 2 предложенного решения; В) субпотока 1 стандартного решения; Г) субпотока 2 стандартного

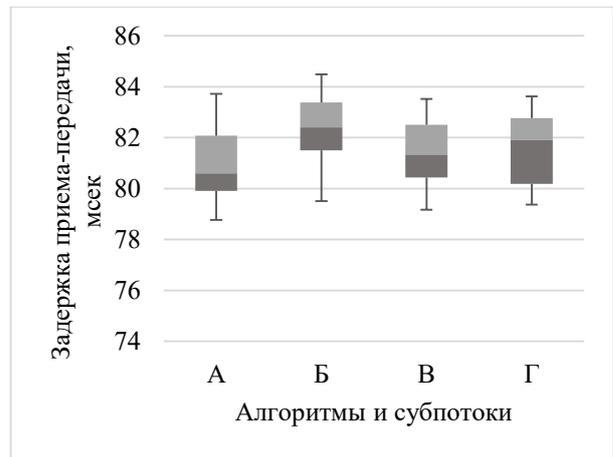


Рисунок 7 – Задержка приема передачи для А) субпотока 1 предложенного решения; Б) субпотока 2 предложенного решения; В) субпотока 1 стандартного решения; Г) субпотока 2 стандартного решения

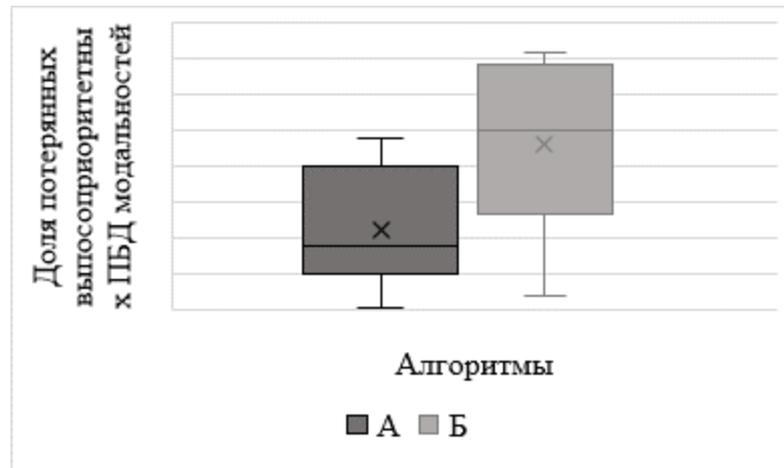


Рисунок 8 – Доля потерянных высокоприоритетных ПБД модальностей для А) предложенного решений; Б) стандартного решения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы полученные в работе научные и практические результаты, раскрываются степень их новизны.

Предложена математическая модель обслуживания МС при мультипоточковой передаче данных представлена в виде гетерогенной обобщенной модели Эрланга с ожиданием и нетерпеливыми заявками, особенность которой заключается в том, что для обработки и передачи данных предоставлены два гетерогенных канала конечного объема и разной интенсивности обслуживания, а также позволяющие учитывать срок жизни сообщения, после которого передавать их нет смысла, что адекватно описывает реальные процессы передачи данных.

Разработана имитационная модель сети передачи МИ на базе пакета AnyLogic 8.7.12, получены экспериментальные результаты, оценена адекватность и чувствительность разработанной модели.

Предложенный метод приоритетной мультипоточковой передачи МИ обладает новизной, так как впервые рассматривает возможность передачи различных модальностей с разным уровнем приоритета и их комбинаций в мультипоточковом сценарии передачи данных.

Для оценки эффективности передачи МИ в мультипоточковом сценарии была предложена оригинальная методика оценки эффективности, в основу которой положены показатели своевременности и производительности доставки МС.

Разработано прикладное программное обеспечение, позволяющее впервые реализовать приоритетную мультипоточковую передачу МИ в гетерогенной сети на базе протокола мультипоточковой передачи и разработанного метода.

В совокупности применение разработанного научно-методического инструментария способствует достижению целей исследования – повышение эффективности передачи многомодальной информации за счет организации мультипоточковой передачи многомодальной информации в гетерогенной беспроводной сети с учетом приоритетов модальностей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Рындин, А.В. Имитационное моделирование мультипоточковой передачи данных в среде AnyLogic / А.В. Рындин, Е.А. Пакулова // Информатизация и связь. – 2022. – Вып. 2. – С. 21-24. – 0,25 п.л. / 0,125 п.л.
2. Назаров, А.А. Скалярно-Векторный рекуррентный алгоритм нахождения стационарных вероятностей в гетерогенной системе $M/(M1, M2)/(N1, N2)/Inf/FIFO$ / А.А. Назаров, А.В. Рындин, Е.А. Пакулова, И.А. Туренова и др. // Управление большими системами. – 2022. – Вып. 98. – С.5-21. – 1,0625 п.л. / 0,2125 п.л.
3. Рындин, А.В. Метод приоритетной мультипоточковой передачи многомодальных сообщений / А.В. Рындин // Современная наука и инновации. – 2022. – №. 3. – С. 60-68. - 0,56 п.л./ 0,56 п.л.

Научные публикации в журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus:

4. Pakulova, E. Principles of constructing polymodal infocommunication systems for information space user service / E. Pakulova, A. Ryndin, O. Basov, A. Struev // 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (Moscow, 20-22 September 2017). – Moscow, 2017. – P. 70-74. – 0,3125 п.л. / 0,078 п.л.
5. Pakulova, E. Multi-path multimodal authentication system for remote information system / E. Pakulova, A. Ryndin, O. Basov // Proceedings of the 12th International Conference on Security of Information and Networks. – Sochi, 2019. – P. 1-4. – 0,25 п.л. / 0,083 п.л.
6. Poleshnikov, D. A. Heart Rate Extraction from the Speech Signal Without a Priori Information About the Speaker / D. Poleshnikov, E. Pakulova, O. Basov, A. Ryndin // 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (Cyprus, 15-19 June 2020). – Limassol, 2020. – P. 589-594. - 0,375 п.л. / 0,094 п.л.
7. Ryndin, A. Analysis of Multimodal Information for Multi-robot System / A. Ryndin, E. Pakulova, G. Veselov // HCI International 2020: Late Breaking Posters (Denmark, 19-24 July 2020). – Copenhagen, 2020. – P. 148-155. – 0,5 п.л. / 0,17 п.л.
8. Ryndin, A. Modelling of multi-path transmission system of various priority multimodal information / A. Ryndin, E. Pakulova, G. Veselov // 14th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. – Tashkent, 2020. – P. 1-5. – 0,3125 п.л. / 0,104 п.л.
9. Ryndin, A. Multimodal interaction: taxonomy, exchange formats / A. Ryndin, E. Pakulova, G. Veselov // Futuristic trends in Networks and Computing Technologies (FTNCT-2020): Proceedings of the 3d International Conference. – 2020. – P. 402-411. – 0,625 п.л. / 0,208 п.л.

Научные публикации в других изданиях:

10. Сайтов, С. И. Повышение степени использования канального ресурса при предоставлении услуг видеоконференцсвязи / С.И. Сайтов, О. О. Басов, А.В. Рындин // Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике. – 2017. – С. 120-123. – 0,25 п.л. / 0,083 п.л.

11. Рындин, А.В. Особенности передачи многомодальных данных / А. Рындин, Е. Пакулова // Фундаментальные исследования с применением компьютерных технологий в науке, производстве, социальных и экономических процессах. – Новочеркасск, 2019. – С. 342-347. - 0,375 п.л. / 0,1875 п.л.

12. Рындин, А.В. Методика оценки эффективности передачи многомодальной информации / А.В. Рындин // Системный анализ и прикладная синергетика. – Таганрог, 2022. – С. 15-20. – 0,375 п.л.

Патент на изобретение:

13. Патент № 2696221 Российская Федерация, МПК H04L 12/58 (2006.01), СПК H04L 12/00 (2019.05), H04L 12/56 (2019.05). Способ передачи многомодальной информации на критически важных объектах: 2018138994: заявл. 06.11.2018; опубликовано 31.07.2019 / И.А. Сайтов, О.О. Басов, С.И. Сайтов, А.В. Рындин. – 9 с.

Свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ:

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022664421 Российская Федерация. Программа реализации имитационной модели мультипоточковой передачи данных / А. В. Рындин, Е. А. Пакулова; заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет». – № 2022662730; заявл. 08.07.22; опубл. 29.07.2022. – 1 с.