

На правах рукописи



Маличенко Дмитрий Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ХРАНЕНИЯ И
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.12.13 — «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Крук Евгений Аврамович

Официальные оппоненты: **Кабатянский Григорий Анатольевич**
доктор физико-математических наук, советник ректора по науке Автономной некоммерческой образовательной организации высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий»

Киричѐк Руслан Валентинович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Сетей связи и передачи данных» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)**

Защита состоится 6 июня 2017 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ауд. 53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО ГУАП и на сайте www.guar.ru.

Автореферат разослан 28 апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Овчинников Андрей Анатольевич
к.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Системы хранения данных очень востребованы в современном мире. С каждым годом объем обрабатываемой информации существенно возрастает. Этому способствует рост производительности и развитие электронных устройств для создания и обработки информации, а также развитие сетей связи. В последние годы большую популярность набирает направление, называемое “большие данные” (от англ. Big Data), которое связано с обработкой и хранением огромного количества данных.

Требования, предъявляемые к системам хранения, остаются неизменными:

- надежность – записанные данные не должны быть испорчены;
- доступность – разрешенным пользователям должен быть обеспечен бесперебойный доступ к системе;
- производительность – возможность работы с большим количеством клиентов и большими объемами данных (основными показателями производительности являются количество одновременных операций ввода/вывода и время их выполнения);
- масштабируемость – способность увеличивать объем памяти и количество поддерживаемых клиентов без ущерба для других характеристик системы.

С ростом объемов данных и количества клиентов выполнять эти требования становится сложнее, также возникают новые задачи. Ответом на эти трудности стало появление распределенных систем хранения, в которых данные распределены по сети узлов, выполняющих функции хранения. Такие системы могут использоваться в службах бронирования билетов, системах электронной коммерции (интернет-магазины, биржи), в банках, медицинских учреждениях. Распределенные системы хранения являются ключевым элементом сетей доставки “содержимого” (от англ. Content Delivery Network или CDN) и облачных сервисов.

Появление все большего количества устройств, которые могут хранить, обрабатывать и передавать информацию, создает потенциал для дальнейшего развития распределенных систем хранения. Активно развивается направление под названием “интернет вещей” (от англ. Internet of Things, сокр. IoT), подразумевающее подключение большого количества новых устройств (“вещей”) к

сети. Уже в настоящее время исследуется использование в качестве узлов системы относительно простых устройств, доступных на потребительском рынке, однако в большинстве случаев узлы распределенной системы хранения все же представляют собой сложный объект.

В решениях, востребованных на предприятиях, это интеллектуальная система, состоящая из памяти разного типа, серверов и операционной системы, в которой заложены алгоритмы обработки данных и управления. С одной стороны, в самих узлах распределенной системы возникают задачи, связанные с эффективным хранением данных, с другой стороны, возникают задачи, связанные с передачей данных между узлами и клиентами системы.

В данной работе рассматривается распределенная система хранения. В узлах системы находятся многоуровневые хранилища данных. Имеется набор приложений, работающих с системой, для которых задано требование к задержке.

Степень разработанности темы. Вопросам хранения и передачи информации в распределенных системах хранения данных посвящено большое количество работ. Много работ посвящено использованию корректирующих кодов для организации памяти и передачи информации по сети. Разработаны коды специально для распределенных систем хранения такими учеными как М. Луби, А. Шокролахи, А. Барг, П. Гопалан, В. Кадамбе. Давно известны фундаментальные исследования Ч.К. Чоу, посвященные организации многоуровневых хранилищ данных.

Вопрос передачи информации рассматривается в работах таких российских ученых как Э.М. Габидулин, В.В. Зяблов, К.Ш. Зигангиров, Г.А. Кабатянский, Е.А. Крук, С.В. Семенов. Среди зарубежных исследователей – Н. Максчук, А.Г. Димакис, М. Медард, М. Митценмахер, М. Герами.

Целью диссертационного исследования является разработка методов для повышения эффективности работы распределенной системы хранения данных.

В соответствии с целью были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритма распределения памяти между приложениями на каждом уровне памяти таким образом, чтобы удовлетворить требованиям на задержку для каждого приложения.

2. Исследование метода транспортного кодирования как средства уменьшения задержки в сети и разработка модификаций данного метода с целью повышения его эффективности.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является распределенная система хранения данных.

Предметом исследования является распределение памяти в многоуровневом хранилище данных и задержка при передаче информации по сети.

Методология и методы исследования. При получении основных результатов работы использовались методы теории вероятности и математической статистики, методы имитационного моделирования, теории кодирования и методы построения алгоритмов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработана модель потока запросов к системе хранения, которая параметризуется распределением стековых расстояний и распределением частот появления адресов.
2. Разработан алгоритм распределения памяти между приложениями, удовлетворяющий требованиям на задержку приложения, который адаптируется к изменяемым характеристикам входного потока запросов.
3. Разработаны модели сети с коммутацией пакетов, учитывающие неэкспоненциальный характер задержки пакетов, изменения емкостей каналов сети и ограниченного времени жизни пакетов.
4. Исследована эффективность транспортного кодирования при различных распределениях задержки пакетов, а также при условиях, возникающих в реальных сетях связи, таких как изменяемые со временем емкости каналов и ограниченное время жизни пакетов. Представлены зависимости выигрыша транспортного кодирования от таких параметров как средняя загрузка сети, скорость кодирования, количество информационных пакетов, длина маршрутов.
5. Предложена модификация транспортного кодирования, которая позволяет повысить его эффективность в сетях с нерегулярной структурой. Проведен анализ выигрыша от кодирования.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы определяется тем, что полученные в ней результаты позволяют повысить эф-

фективность организации памяти в системах хранения данных и расширить область применения транспортного кодирования в реальных сетях связи.

Предложенный алгоритм распределения памяти между приложениями позволяет удовлетворить требованиям приложений к задержке системы, которая является важной характеристикой системы. Алгоритм повышает эффективность работы системы, т.к. выполняет расчет необходимого каждому приложению объема памяти, учитывая характеристики запросов к системе и заданные требования по задержке.

Проведенное исследование транспортного кодирования является продолжением и развитием предыдущих работ, посвященных данной теме. Уточнены условия выигрыша от кодирования при дополнительных эффектах, присутствующих в реальных сетях. Предложенная модификация транспортного кодирования повышает его эффективность в сетях с нерегулярной структурой.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается корректным использованием математического аппарата, использованием имитационного моделирования для проверки корректности выполненных вычислений, а также апробацией полученных результатов на научно-технических конференциях. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, в том числе и в международных.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: на 9-й Международной конференции «FRUCT» (Петрозаводск, Россия, 2011); на Всероссийской научной конференции по проблемам информатики «СПИСОК» (Санкт-Петербург, Россия, 2012); на 14-м Международном симпозиуме «Problems of Redundancy in Information and Control Systems» (Санкт-Петербург, Россия, 2014); на 8-й Международной конференции «KES Conference on Intelligent Interactive Multimedia: Systems And Services» (Сорренто, Италия, 2015); на 15-м Международном симпозиуме «Problems of Redundancy in Information and Control Systems» (Санкт-Петербург, Россия, 2016)

Внедрение результатов. Результаты работы были использованы в научно-исследовательских работах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) и ЗАО «ИКТ». Теоретические результаты работы используются в учебном процессе кафедры безопасности информационных систем ГУАП.

Личный вклад. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах [1–10]. Среди них 3 работы [1–3] опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК, а также 2 работы [5], [6] опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм перераспределения памяти в многоуровневой системе хранения данных, который позволяет удовлетворить требованиям на задержку системы и адаптироваться к входному потоку запросов.
2. Анализ эффективности транспортного кодирования с учетом особенностей реальных сетей, таких как изменяемые емкости каналов и неэкспоненциальный характер задержки пакетов, в результате которого получены зависимости эффективности кодирования от параметров сети.
3. Модифицированный алгоритм транспортного кодирования для нерегулярных сетей передачи информации, который позволяет уменьшить среднюю задержку сообщений.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, одного приложения и списка литературы из 107 наименований. Полный объем диссертационной работы составляет 125 страниц с 68 рисунками, 4 таблицами и 1 приложением.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность и разработанность темы диссертационной работы, поставлена цель исследования и, в соответствии с целью, сформулированы задачи. Приводится информация о научной новизне работы, а также о её теоретической и практической значимости. Приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. В конце приведено краткое содержание работы по разделам.

В **первом разделе** рассматривается объект исследования – распределенная система хранения данных. Описывается архитектура и назначение элементов системы, а также используемые технологии. Приводятся функции, и предъявляемые к распределенному хранилищу требования. Рассматриваются различ-

ные варианты сетевого взаимодействия узлов распределенной системы хранения данных.

Одной из основных характеристик системы является ее производительность, выражаемая во времени доступа к данным. В распределенной системе хранения данных это время складывается из времени передачи по сети и времени доступа к информации на узле. Делается вывод о том, что важными задачами являются обеспечение быстродействия системы в узле и обеспечение эффективной и быстрой передачи данных по сети.

Во **втором разделе** рассматривается узел распределенной системы хранения – многоуровневое хранилище данных. Известно количество уровней и их размеры. Имеется набор приложений, работающих с системой, для которых задано требование на среднюю задержку операций ввода/вывода. В разделе решается задача распределения памяти между приложениями на уровнях хранилища таким образом, чтобы выполнялись требования на задержку. В начале раздела описываются задачи, решаемые в работах, посвященных многоуровневым системам хранения, и выполняется обзор существующих решений по задаче распределения памяти.

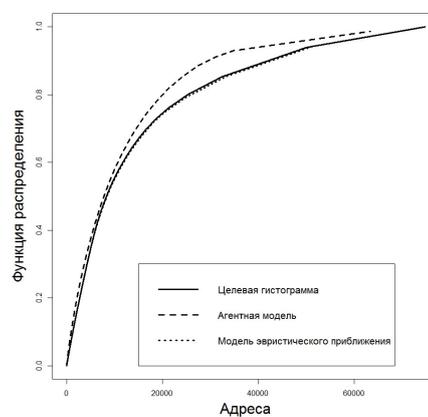
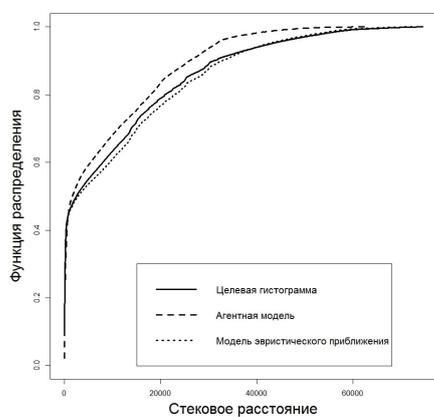
Для решения поставленной задачи разработана модель системы хранения на основе известных моделей, в которой представлен новый модуль, реализующий алгоритм расчета объемов памяти, необходимых для выполнения требования на задержку. Рассматриваемая система хранения выполняет изолирование адресного пространства разных приложений друг от друга, путем деления его на секции.

Разработанный алгоритм является адаптивным. Он анализирует характеристики потока заявок и учитывает их при управлении системой. В качестве характеристик потока были выбраны следующие: распределение стековых расстояний адресов; распределение частот запросов блоков данных.

Выходными данными являются размеры секций для каждого приложения на каждом уровне памяти кроме кэш-памяти и цель на хит-рейт для алгоритма управления кэш-памятью. Отличительными чертами рассматриваемой задачи от других подобных являются следующие: логическое разделение памяти приложений друг от друга; наличие требования на задержку системы для каждого приложения; адаптивное изменение параметров системы в зависимости от входного потока.

Для оценки работы предложенного алгоритма использовались два типа потоков запросов. Во-первых, потоки, собранные с реальных систем хранения и доступные в сети интернет. Во-вторых, синтетические потоки. Для генерации синтетических потоков заявок к системе разработан алгоритм, входными данными которого являются распределения стековых расстояний и распределения частот запросов блоков данных. Свойствам потоков запросов и методам их генерации посвящены отдельные подразделы работы. Показано влияние таких характеристик как распределение стековых расстояний адресов и распределение частот запросов блоков данных на эффективность работы системы хранения данных. Для оценки предложенного алгоритма генерации потока запросов представлены кривые (рисунок 1) для заданного распределения стековых расстояний адресов, распределения частот запросов к блокам данных, а также распределения для следующих потоков запросов:

- потока, полученного с помощью предложенного алгоритма генерации адресов по агентной модели;
- потока, полученного с помощью стороннего алгоритма генерации адресов методом последовательного приближения.



а) Функции распределения стековых расстояний

б) Функции распределения частот запросов адресов

Рис. 1 — Сравнение характеристик потока при разных алгоритмах их генерации

Несмотря на наличие погрешности в полученных характеристиках потока, предложенный алгоритм генерации потока позволяет получать необходимые эффекты. Основным преимуществом алгоритма является меньшая сложность по сравнению с более точным алгоритмом последовательного приближения.

В работе сформулирована оптимизационная задача распределения памяти с целевой функцией Q

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i,$$

где n – количество приложений, $q_i = \frac{N\{T_i \leq R_i\}}{N}$, $N\{T_i \leq R_i\}$ – количество десятиминутных интервалов, в течение которых для приложения i среднее время считывания блока данных T_i не превышало заданное ограничение R_i , а N – общее количество десятиминутных интервалов работы системы. Анализ слож-

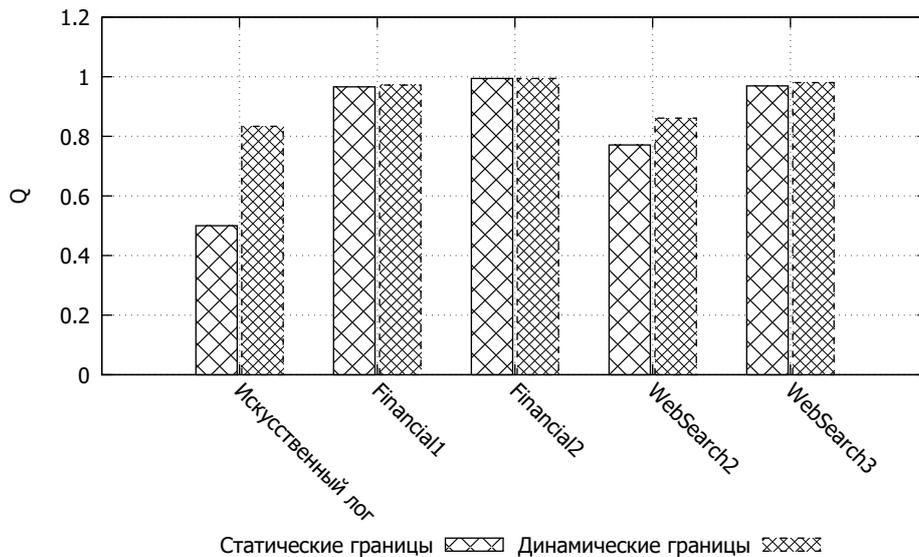


Рис. 2 — Результаты моделирования предложенного алгоритма

ности алгоритма распределения памяти приведен в подразделе 2.7.

Результаты имитационного моделирования демонстрируют эффективность предложенного алгоритма. На рисунке 2 приведены значения Q для предложенного алгоритма (динамические границы) и алгоритма, у которого заранее есть информация о характеристиках предстоящего потока заявок (статические границы). Второй алгоритм выполняет следующее:

- собирает статистику по заранее известному потоку заявок, чтобы получить распределения стековых расстояний и популярности адресов для каждого приложения за все время;
- вычисляет объемы памяти (границы) для каждого клиента на каждом уровне памяти исходя из полученных распределений;
- значения границ остаются неизменными в течение всей работы системы.

Таким образом рисунок 2 демонстрирует выигрыш от адаптации параметров системы к потоку заявок.

Потоки запросов Financial1, Financial2 сняты с систем обработки транзакций в реальном времени в финансовых организациях. Потоки запросов WebSearch2, WebSearch3 собраны с известных поисковых систем. Как видно из рисунка, наибольший выигрыш получается на искусственном потоке запросов, так как в нем в наибольшей степени реализована переменчивость характеристик потока.

В **третьем разделе** рассматривается передача данных по сети. Выполнен обзор существующих работ, посвященных механизмам взаимодействия узлов распределенной системы хранения. Перечислены основные задачи, возникающие при передаче данных. Описана известная модель сети с коммутацией пакетов Клейнрока. Дано определение транспортного кодирования и приведен существующий анализ задержки сообщений. Разработана новая модель сети, учитывающая ряд свойств, присутствующих в реальных сетях передачи данных. С помощью данной модели проведен анализ выигрыша от использования транспортного кодирования. Проведено исследование выигрыша транспортного кодирования в нерегулярных сетях. Предложена модификация транспортного кодирования, повышающая его эффективность в нерегулярных сетях.

Как было отмечено ранее, в распределенной системе хранения задержка складывается из задержки на узле и задержки в сети. В данном разделе исследуется вопрос задержки в сети.

Рассмотрим кодирование на транспортном уровне, предложенное в работах Г.А. Кабатянского и Е.А. Крука. Пусть требуется передать по сети сообщение, состоящее из k пакетов. Для этого k пакетам сообщения применяется кодирование некоторым (N, k) кодом, после чего пакетов становится N штук ($N > k$). В сеть вместо k пакетов посылаются N , тем самым вносится избыточность в сообщение. Эта избыточность может быть использована для детектирования и исправления ошибок. Узел-получатель восстанавливает исходное сообщение по принятым пакетам, некоторые из которых могут быть искажены. Восстановление происходит путем декодирования (N, k) кода. При использовании делимого кода с максимальным расстоянием (МДР код) достаточно получить любые k из N пакетов, чтобы восстановить сообщение. Таким образом, описанный метод позволяет бороться с искажениями и потерями пакетов

в сети. На первый взгляд кажется, что применение данного метода в бесшумных и абсолютно надежных сетях бессмысленно, но в работах Г.А. Кабатянско-го, Е.А. Крука и С.В. Семенова показывается, что метод позволяет уменьшать задержку сообщений. При анализе задержки используется модель сети, основанная на известной модели Л. Клейнрока. В этой модели передача сообщений по каналам моделируется с помощью системы массового обслуживания (СМО) типа М/М/1. Для модели Клейнрока известно выражение для средней задержки пакетов

$$\bar{t}(\rho) = \frac{\lambda_0}{\mu c \gamma} \frac{1}{1 - \rho},$$

где λ_0 – суммарная интенсивность внутреннего трафика сети, γ – суммарная интенсивность внешнего трафика сети, c – емкость каналов, $1/\mu$ – средняя длина пакета, ρ – загрузка сети. В работах Г.А. Кабатянско-го и Е.А. Крука введено допущение об экспоненциальном распределении задержки пакета. Использование математического аппарата порядковых статистик и данного допущения позволило получить выражение для средней задержки кодированного сообщения в замкнутой форме

$$\bar{T}_{k:n} = \bar{t}(\rho/R) \sum_{i=n-k+1}^n i^{-1}.$$

Выигрыш от кодирования определяется следующим выражением

$$T_1/T_2 = \frac{\bar{T}_{k:k}}{\bar{T}_{k:n}}. \quad (1)$$

С одной стороны использование допущения об экспоненциальном законе распределения задержки имеет свое обоснование. С другой стороны, для модели сетей Клейнрока не доказано, что распределение задержки сообщения носит экспоненциальный характер. Более того, выяснение закона распределения для сетей Клейнрока представляется сложной задачей.

В данной работе рассматриваются другие законы распределения задержки пакетов, отличные от экспоненциального. Проводится анализ выигрыша от транспортного кодирования при данных распределениях. В подразделе 3.6.1 рассматривается распределение Эрланга, т.к. оно при некоторых параметрах сети соответствует распределению задержки пакетов для сети Клейнрока, что

показано в работе. При длине пути равной единице, этот закон распределения сводится к экспоненциальному. В подразделе 3.6.2 рассматривается нормальное распределение задержки пакетов. Нормальное распределение возникает при рассмотрении закона Эрланга при достаточно больших длинах путей, так как известно, что с ростом порядка, распределение Эрланга стремится к нормальному. Методика анализа средней задержки сообщений и выигрыша от кодирования использовалась такая же, как и в работах Г.А. Кабатянского, Е.А. Крука и С.В. Семенова. Использовался аппарат порядковых статистик. В результате для средней задержки сообщения при распределении Эрланга получено выражение

$$\bar{T}_{k:n}(l, \rho) = n \binom{n-1}{k-1} \int_0^\infty -t \left(1 - e^{-t/\bar{t}(\rho)} \sum_{i=0}^{l-1} \frac{(t/\bar{t}(\rho))^i}{i!} \right)^{k-1} \left(e^{-t/\bar{t}(\rho)} \sum_{i=0}^{l-1} \frac{(t/\bar{t}(\rho))^i}{i!} \right)^{n-k} e^{-t/\bar{t}(\rho)} \sum_{i=0}^{l-1} \left(\left(\frac{t}{\bar{t}(\rho)} \right)^i \left[\frac{i}{ti!} - \frac{1}{\bar{t}(\rho) i!} \right] \right) dt,$$

где l – длина пути, ρ – нагрузка сети. Для средней задержки сообщения при усеченном нормальном распределении задержки пакета получено выражение

$$\bar{T}_{k:n}(l, \rho) = n \binom{n-1}{k-1} \int_0^\infty \left[x \left(\frac{\bar{t}(\rho)}{\sqrt{2\pi l}} \int_0^x e^{-\frac{(y\bar{t}(\rho)-l)^2}{2l}} dy \right)^{k-1} \left(1 - \frac{\bar{t}(\rho)}{\sqrt{2\pi l}} \int_0^x e^{-\frac{(y\bar{t}(\rho)-l)^2}{2l}} dy \right)^{n-k} \frac{\bar{t}(\rho)}{\sqrt{2\pi l}} e^{-\frac{(x\bar{t}(\rho)-l)^2}{2l}} \right] dx.$$

Выигрыш от кодирования вычисляется также с помощью выражения (1). Для выигрыша получены зависимости от таких параметров сети как нагрузка сети, длина маршрутов, скорость кода, количества информационных пакетов k . Пример одной из зависимостей приведен на рисунке 3. Дальнейший анализ задержки выполнен с помощью имитационного моделирования, т.к. получение аналитических выражений затруднено в силу отказа от ряда допущений, облегчающих получение таких выражений. Получены зависимости для выигрыша от кодирования, аналогичные описанным выше, но для модели сети с параллельными каналами и для модели сети Клейнрока с топологией типа решетка. В первой модели распределение задержки пакетов получено с помощью моделирования сети СМО. Введение конкретной топологии во второй модели услож-

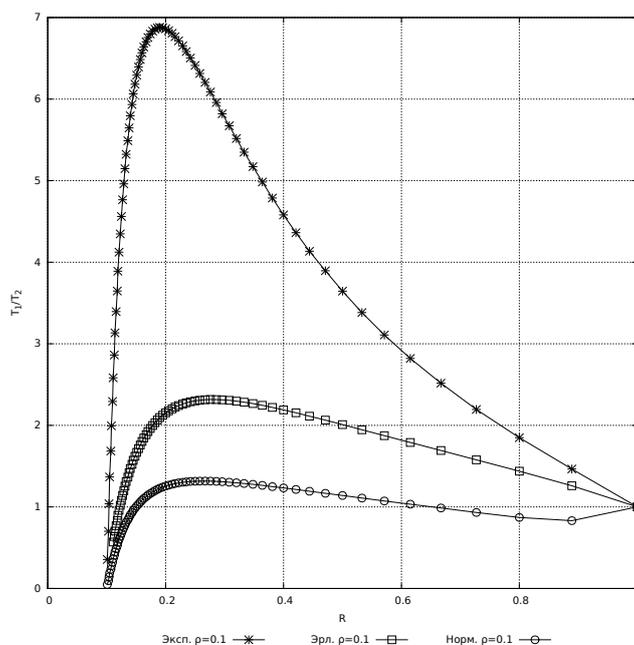


Рис. 3 — Выигрыш от кодирования в зависимости от скорости кода при $\rho=0.1$

няет анализ и влечет за собой необходимость решать такие задачи, как распределение потоков по сети. Вторая модель снимает следующие ограничения:

- независимость маршрутов;
- равенство длин всех маршрутов;
- равномерное распределение интенсивности потоков по всей сети;
- равенство емкостей всех каналов сети.

Несмотря на снятие ограничений выигрыш от кодирования по-прежнему наблюдается, однако в более узких границах. Так, например, при $k = 4$ и $\rho = 0.6$ выигрыш исчезает.

Далее в подразделе 3.9 исследуется выигрыш от кодирования при изменяемых емкостях канала. Как известно в реальных сетях, особенно в мобильных, встречается эффект временного ухудшения условий передачи (снижение емкости канала). В данной работе разработана модель, учитывающая этот эффект. Для его моделирования введено два состояния:

- нормальное состояние – значение емкости канала задано матрицей емкостей $C[i][j]$;
- “плохое” состояние – значение емкости канала устанавливается равным $C[i][j]\delta_{LC}/100$, где $\delta_{LC} = 0 \dots 100\%$.

С помощью данной модели на топологии типа решетка были получены зависимости для выигрыша от кодирования с учетом следующих параметров:

- интенсивность “плохих” состояний,

- длительность “плохих” состояний,
- величина δ_{LC} .

На рисунке 4 представлена одна из полученных зависимостей.

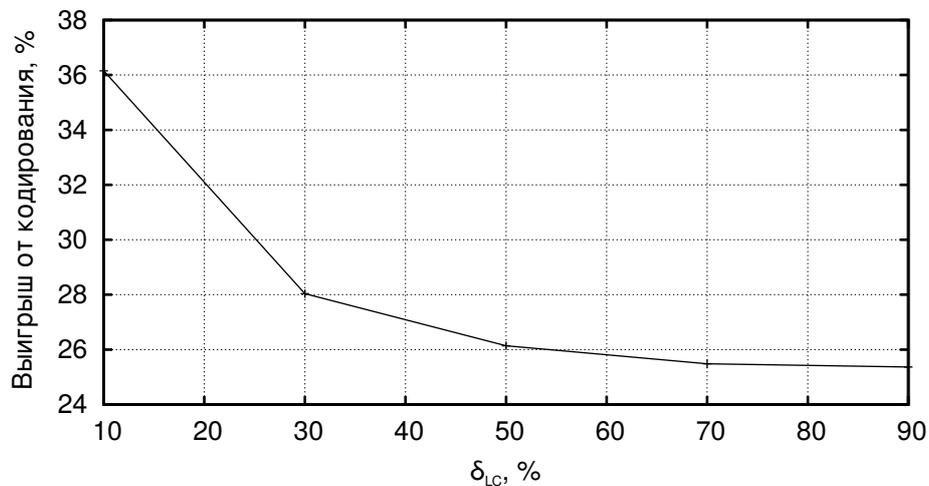


Рис. 4 — Зависимость выигрыша от кодирования от δ_{LC} при $\rho = 0.1$

Время жизни пакета в реальных сетях ограничено и обозначается как TTL (от англ. time to live). Это время, по истечении которого, пакет удаляется из сети, если он еще не доставлен до адресата. В подразделе 3.10 исследуется вероятность доведения сообщения до адресата $P_{\text{дов.}}$ и выигрыша от кодирования в зависимости от TTL . В результате проведенного анализа сделаны следующие выводы:

- при уменьшении TTL вероятность $P_{\text{дов.}}$ спадает очень медленно и имеет достаточно длинный участок высоких значений;
- существенного снижения трафика на участке высоких $P_{\text{дов.}}$ для рассматриваемой модели сети не наблюдается;
- на участке высоких $P_{\text{дов.}}$ для рассматриваемой модели сети выигрыш от кодирования практически не меняется, следовательно не имеет смысла уменьшение TTL для повышения выигрыша;

В подразделе 3.11 рассматривается передача в нерегулярных сетях, предлагается метод передачи, при котором используется транспортное кодирование с переменной скоростью кода.

Под нерегулярной сетью понимается сеть, которая состоит из неодинаковых подсетей. Подсети могут отличаться, например, загрузкой, топологией. В предлагаемом методе в некоторых промежуточных узлах, соединяющих подсети, выбирается новое значение скорости, адаптированное для следующей подсети, далее происходит перекодирование сообщения в промежуточном узле с

новой скоростью. Так как выбор новой скорости происходит неоднократно и с учетом параметров конкретной подсети, то ожидается, что такой способ передачи будет более выгодным в сравнении со случаем с фиксированной скоростью кода.

Для анализа выигрыша от кодирования с переменной скоростью выбрана следующая модель сети. Представим некоторую сеть S с коммутацией пакетов, как состоящую из двух подсетей S_1 и S_2 . В качестве подсетей S_1 и S_2 рассмотрена модель Г.А. Кабатянского и Е.А. Крука. Кроме этого в качестве подсетей S_1 и S_2 рассмотрена модель с параллельными каналами. Отличие подсетей в обоих случаях заключается в значениях параметров сети. Будем считать, что имеется некоторый узел, соединяющий обе подсети и все маршруты между подсетями проходят между него. В этом узле выполняется выбор новой скорости кода и перекодирование сообщения с выбранной скоростью. Для модели подсетей Кабатянского-Крука получены аналитические выражения для выигрыша от кодирования

$$G = \frac{\bar{t}(\rho_1/R_0) \sum_{i=k/R_0-k+1}^{k/R_0} i^{-1} + \bar{t}(\rho_2/R_0) \sum_{i=k/R_0-k+1}^{k/R_0} i^{-1}}{\bar{t}(\rho_1/R_1) \sum_{i=k/R_1-k+1}^{k/R_1} i^{-1} + \bar{t}(\rho_2/R_2) \sum_{i=k/R_2-k+1}^{k/R_2} i^{-1}}, \quad (2)$$

где R_0 – скорость кода при передаче без перекодирования, R_1 – оптимальная скорость кода для подсети S_1 , R_2 – оптимальная скорость кода для подсети S_2 . Для модели подсетей с параллельными каналами получено выражение для выигрыша от кодирования

$$G = \frac{\min_R \{T(l_1 + l_2, R, \rho)\}}{\min_R \{T(l_1, R, \rho)\} + \min_R \{T(l_2, R, \rho)\}}. \quad (3)$$

где $T(l, R, \rho)$ – задержка в подсети при длине пути l , скорости кода R и загрузки сети ρ . Для задержки T нет аналитического выражения, значение получается с помощью имитационного моделирования.

Для выражений (2), (3) построены зависимости от загрузки подсетей и количества маршрутов в подсетях. В качестве примера, на рисунке 5 приведена одна из полученных зависимостей.

Проведенный анализ выигрыша от перекодирования на модели сети, состоящей из двух подсетей, демонстрирует, что предложенная модификация

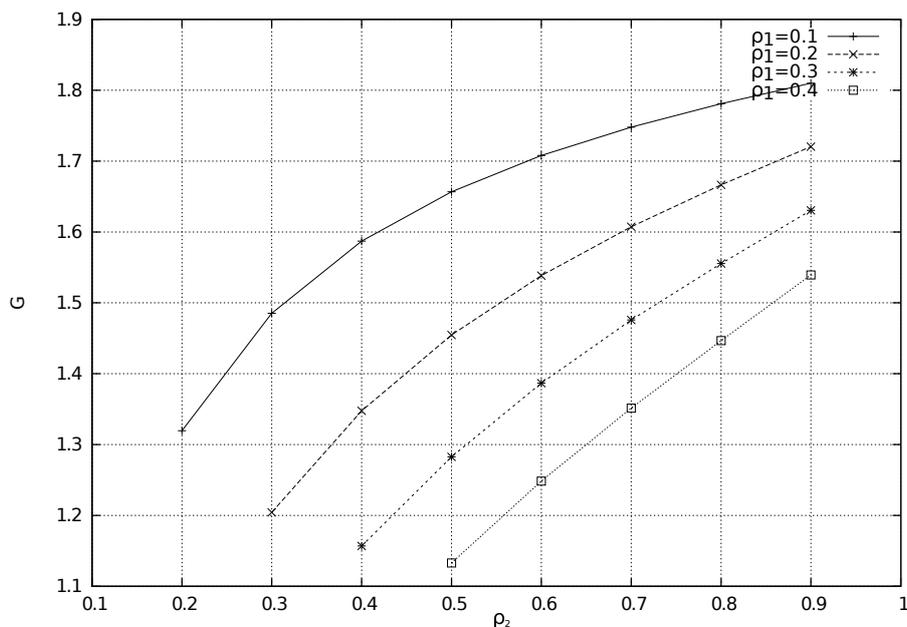


Рис. 5 — Выигрыш от перекодирования при разных значениях загрузки подсетей ρ_1, ρ_2

транспортного кодирования может повысить эффективность передачи. Данный анализ можно обобщить и на большее количество подсетей.

В **заключении** кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе, а также возможные направления дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм расчета размеров областей памяти на каждом уровне системы хранения для каждого приложения, который позволяет при некоторых ограничениях обеспечить заданную для приложения задержку системы. На рассмотренных сценариях была продемонстрирована эффективность использования алгоритма.
2. Предложенный алгоритм, кроме выполнения своей прямой задачи, мог бы использоваться для расчета общего объема уровней памяти для выполнения требований на задержку и предсказания граничных параметров, при которых система хранения перестанет удовлетворять требованиям на задержку.
3. Предложенный алгоритм имеет ограничения использования. Он основан на допущении, что в работе системы имеются периоды стабильности, в течение которых основные параметры входного потока не меняются. В случае быстрой изменчивости входного потока алгоритм не

будет успевать адаптироваться. С другой стороны, применение алгоритма ограничено минимальными размерами уровней системы, при которых имеется возможность удовлетворять требованиям на задержку системы.

4. Рассмотренные сценарии работы многоуровневой системы хранения, основанные на потоках запросов с реальных систем хранения, продемонстрировали ситуации, когда предложенный адаптивный алгоритм отработал лучше, чем алгоритм, имеющий заранее информацию о потоке и использующий в работе средние характеристики, рассчитанные по всему потоку.
5. Разработаны модели сети с коммутацией пакетов, учитывающие такие эффекты как
 - (a) зависимость маршрутов передачи,
 - (b) ограниченность количества маршрутов передачи,
 - (c) разные длины маршрутов,
 - (d) неравномерность информационных потоков в сети,
 - (e) ограниченное время жизни пакетов,
 - (f) уменьшение емкостей каналов.
6. Разработанные модели позволили получить зависимости выигрыша от кодирования от следующих параметров:
 - (a) длина маршрутов,
 - (b) интенсивность появления состояний, в которых падает емкость каналов,
 - (c) длительность состояний, в которых падает емкость каналов,
 - (d) величина проседания емкости каналов,
 - (e) время жизни пакета.
7. Полученные зависимости для выигрыша могут быть использованы при выборе метода передачи по сети, они позволяют оценить границы применимости транспортного кодирования.
8. Предложен метод кодирования на транспортном уровне с переменной скоростью кода. На разработанных аналитической и имитационной моделях была показана эффективность предложенного метода.

Возможные направления дальнейшей разработки темы.

1. В рассмотренном алгоритме перераспределения памяти каждому приложению выделяется отдельный сегмент памяти. Представляется интересным вопрос группирования потоков различных приложений в один сегмент. Группирование позволило бы расширить границы применения алгоритма перераспределения памяти на большее количество приложений.
2. Исследование эффективности перераспределения памяти в зависимости от соотношения типов памяти и их общих размеров.
3. Исследование эффективности транспортного кодирования в мобильных сетях передачи информации.
4. Алгоритм поиска узлов, в которых целесообразно выполнять перекодирование при использовании предложенного алгоритма кодирования в нерегулярных сетях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Маличенко, Д.* Эвристический алгоритм расчета размеров памяти в многоуровневой системе хранения / Д. Маличенко // *Информационно-управляющие системы*. — СПб.: ГУАП, 2015. — Т. 78, № 5.
2. *Маличенко, Д.А.* Кодирование сообщений на транспортном уровне в неравномерных сетях / Д.А. Маличенко // *Информационно-управляющие системы*. — СПб.: ГУАП, 2014. — Т. 73, № 6.
3. *Крук, Е. А.* Расчет задержки при использовании кодирования на транспортном уровне сети передачи данных / Е. А. Крук, Д. А. Маличенко // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2013. — Т. 56, № 8.
4. *Malichenko, Dmitrii.* Efficiency of transport layer coding in networks with changing capacities / Dmitrii Malichenko // *Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*, 2016 XV International Symposium / IEEE. — 2016. — Pp. 82–86.
5. *Malichenko, Dmitrii.* Estimation of the Mean Message Delay for Transport Coding / Dmitrii Malichenko, Evgenii Krouk // *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services*. — Springer, 2015. — Pp. 239–249.

6. *Malichenko, Dmitry*. Transport layer coding with variable coding rate / Dmitry Malichenko // Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), 2014 XIV International Symposium on / IEEE. — 2014. — Pp. 71–73.
7. *Маличенко, Д.* Моделирование потока адресов в системе хранения данных / Д. Маличенко, Тяпочкин К. // Всероссийская научная конференция по проблемам информатики СПИСОК-2012. — СПб.:ВВМ, 2012. — С. 502–507.
8. *Маличенко, Д.* К вопросу о выборе оптимальной скорости кода для кодирования на транспортном уровне / Д. Маличенко // Всероссийская научная конференция по проблемам информатики СПИСОК-2012. — СПб.:ВВМ, 2012. — С. 211–216.
9. *Malichenko, D.* Optimization of Network Overhead for Transport Layer Coding / D. Malichenko // 9th Conference of Open Innovations Community FRUCT. — 2011.
10. *Маличенко, Д.* Введение времени жизни пакета при использовании транспортного кодирования / Д. Маличенко // *Вопросы передачи и защиты информации: сборник статей*. — СПб.: ГУАП, 2011. — С. 322–327.