

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.048; 004.021; 424.44; 424.272.2

СИНЦОВ
Сергей Викторович

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОПЕРАЦИЙ
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЗНАНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
магистра технических наук
по специальности 1-31 80 10 – Теоретические основы информатики

Научный руководитель
Ивашенко Валерьян Петрович
кандидат технических наук

Минск 2017

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Наличие в информационных системах данных и знаний большого объёма требует эффективных механизмов их обработки. Последние, в сочетании с тенденциями автоматизации задач анализа данных, извлечения и интеграции знаний в единую систему знаний, а также задач информационного поиска, прогнозирования, поддержки принятия решений и управления, всё чаще ориентируются на применение методов, моделей и систем искусственного интеллекта, поддерживающих обработку семантически структурированных данных, что в свою очередь позволяет сократить семантический разрыв между пользователем и распространёнными архитектурами электронных вычислительных машин и снизить затраты на решение перечисленных задач и интерпретацию результатов решения пользователем.

Однако интеллектуальные системы, основанные на знаниях и управляемые знаниями, имеют ряд свойств, в основе которых лежат свойства самих знаний как данных, обладающих внутренней интерпретируемостью, сложноструктурированностью, связностью, активностью и семантической метрикой. При этом от данных систем требуется открытость, обучаемость, работа в режимах реального времени и направленность на автоматизацию решения одновременно широкого класса задач в промышленности и других отраслях народного хозяйства. Характерной чертой развития современных информационных технологий является ориентация на нечисловую обработку больших объёмов сложноструктурированных данных и переход к нелинейным формам представления и организации хранения информации, а также ассоциативным моделям доступа к обрабатываемой информации.

При практическом инженерном анализе и разработке интеллектуальных систем необходимо обеспечить для них определённые характеристики производительности на каждом из информационных уровней их физической и логической архитектуры, что включает в себя количественные оценки затрат времени, памяти, энергии и других ресурсов, необходимые для прогнозирования и планирования интеллектуальной системой процесса решения задач, а также предупреждения нештатных и аварийных ситуаций. Другими словами, интеллектуальная система «должна знать» о том, какие задачи она может решить в настоящий или будущий моменты времени и какие ресурсы, в каком количестве, ей для этого понадобятся.

В разработке интеллектуальных систем, учитывая свойства решаемых ими задач и недостаточную производительность распространённых вычислительных архитектур, можно выделить следующие подходы:

1-ый. Ориентация на средства и модели с теоретико-множественной семантикой. К числу таких моделей относятся семантические сети, активно развивающиеся в настоящее время, и в основе которых лежат графовые информационные структуры. Такие модели представления и обработки знаний

универсальны и позволяют строить унифицированные модели предметных областей;

2-ой. Использование гетерогенных параллельных вычислительных архитектур в качестве аппаратной основы интеллектуальных систем, позволяющее увеличить производительность систем путём разработки таких алгоритмов операций обработки знаний, что их реализация может быть осуществлена на широком классе различных параллельных вычислительных систем.

При этом теоретико-множественные операции являются ключевыми для машин обработки знаний в моделях с теоретико-множественной семантикой и обеспечивают поддержку модельно-теоретической семантики языков представления и обработки знаний, что, в свою очередь приводит к необходимости разработки алгоритмов базовых теоретико-множественных операций обработки знаний, ориентированных на параллельную реализацию.

Диссертационная работа посвящена исследованию, разработке и реализации алгоритмов операций параллельной обработки знаний в моделях с теоретико-множественной семантикой.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям «Промышленные и строительные технологии и производство: робототехника, интеллектуальные системы управления» согласно пункту 3 перечня приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. (указ Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166), а также приоритетным направлениям «Информатика и космические исследования» согласно пункту 5 перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190).

Целью диссертационной работы является разработка и реализация программных средств операций параллельной обработки знаний, представленных моделями с теоретико-множественной семантикой.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Провести аналитический обзор существующих программных средств и алгоритмов операций параллельной обработки знаний.
2. Разработать модель и алгоритмы стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти, используемой для представления знаний.

3. Разработать онтологическую модель теоретико-множественных операций модели обработки знаний в конечной памяти и алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний.

4. Реализовать алгоритмы стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти и алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний.

Объектом исследования являются модели представления и обработки знаний с теоретико-множественной семантикой.

Предметом исследования являются алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний.

Для решения поставленных задач применялись методы теории множеств, теории графов, теории алгоритмов, теории параллельных вычислений, методы и средства инженерии знаний. Предложенная в работе онтологическая модель теоретико-множественных операций модели обработки знаний разработана на основе модели унифицированного семантического представления знаний.

Новизна полученных результатов:

1. Разработана онтологическая модель теоретико-множественных операций модели обработки знаний, основанная на семантических сетях, и отличающаяся использованием средств модели унифицированного семантического представления знаний.

2. Разработаны модель и алгоритмы стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти на уровнях управления устройствами и данными системы обработки знаний. Разработанные алгоритмы стратегий управления памятью отличаются тем, что сохраняют стратегию выбора первого подходящего свободного участка памяти при перераспределении участков памяти, дают оценку перерасхода памяти по причине внешней фрагментации, не превышающую $O(U * \log_2(U))$ (где U – объём занятой памяти), и позволяют получить приближённое решение задачи оптимального дискретного управления памятью, имея постоянную среднюю амортизационную оценку временной сложности.

3. Разработаны алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний, отличающиеся поддержкой мультимножеств и ориентацией на использование параллелизма потока данных и реализацию на мелко-и среднезернистой параллельной вычислительной архитектуре с произвольным доступом к общей памяти.

Положения, выносимые на защиту:

1. Онтологическая модель теоретико-множественных операций модели обработки знаний, основанная на семантических сетях, и отличающаяся

использованием семейства языков унифицированного семантического кодирования информации. В основу онтологической модели положено понятие онтологии как явной спецификации концептуализации, а сама спецификация построена с использованием средств модели спецификации знаний.

2. Модель и алгоритмы стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти на уровнях управления устройствами и данными системы обработки знаний. Разработанные алгоритмы стратегий позволяют получить приближённое решение задачи оптимального дискретного управления памятью и отличаются тем, что сохраняют стратегию выбора первого подходящего свободного участка памяти при перераспределении участков памяти, дают оценку перерасхода памяти по причине внешней фрагментации, не превышающую $O(U * \log_2(U))$ (где U – объём занятой памяти), имея при этом постоянную среднюю амортизационную оценку времени работы, если время доступа к ячейке памяти в зависимости от размера памяти постоянно, а количество записей данных в ячейки памяти зависит как минимум прямо пропорционально от произведения времени одного перевыделения на количество перевыделений.

3. Алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний, отличающиеся поддержкой мультимножеств и ориентацией на использование параллелизма потока данных и реализацию на мелко-и-среднезернистой параллельной вычислительной архитектуре с произвольным доступом к общей памяти. Теоретическая оценка временной сложности данных алгоритмов при использовании разработанной модели стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти на уровнях управления устройствами и данными системы обработки знаний, не превышает $O(\log(n) * n/p)$, где n – суммарная мощность множеств, p – количество процессоров.

Личный вклад соискателя учёной степени состоит в самостоятельном получении всех основных результатов и положений, выносимых на защиту. Соавтором совместных публикаций является научный руководитель, к-т техн. наук В.П. Ивашенко, принимавший участие в выборе направления исследований, постановке задач, обсуждении теоретических и практических результатов. В публикациях с соавтором вклад соискателя определяется рамками представленных в диссертации результатов.

Апробация результатов диссертации состоит в следующем: материалы работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: 2-ая научно-практическая конференция «BIGDATA and Advanced Analytics» (Минск, 2016); Международный конгресс по информатике «Информационные системы и технологии» CSIST'16 (Минск, 2016);

Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» IST'2016 (Минск, 2016).

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах, из них 1 статья (объёмом 0,5 авторского листа) в научном журнале, включённом в Перечень научных изданий, утверждённый Высшей аттестационной комиссией, 4 статьи в сборниках материалов научных конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана необходимость проведения исследования по данной теме.

Первая глава включает рассмотрение и анализ:

- языков обработки знаний;
- программных средств обработки знаний;
- средств спецификации знаний;
- алгоритмов теоретико-множественных операций обработки знаний.

Анализ языков, программных средств и алгоритмов параллельной обработки знаний проводился с ориентацией на средства и модели с теоретико-множественной семантикой, к которым относятся семантические сети. Основываясь на этом факте показано, что распространённые языки программирования, ориентированные на обработку графовых структур практически одинаково хорошо приспособлены для обработки знаний, представленных в виде семантической сети. Исключение составляют языки, не обладающие вычислительной Тьюринг-полнотой, а также языки, не поддерживающие на уровне операторов параллельное и асинхронное исполнение программ.

Кроме этого рассмотренные языки программирования являются языками низкого уровня, тогда как прикладные системы, работающие со знаниями, должны позволять пользователям работать на языке, приближенном к семантике предметной области и оперирующем ее объектами и отношениями. С этой точки зрения рассматриваемые языки программирования, значительно различаются по своим выразительным возможностям и, следовательно, лучшей или худшей приспособленностью для обработки знаний. Наиболее «семантически мощным» языком является язык SCP, так как это подязык абстрактного графового языка SC-код, обладающего, в частности, рефлексивной и модельно-теоретической семантиками и позволяющего создавать на основе себя же целого семейства совместимых между собой подязыков. Другие языки, помимо своей семантической ограниченности, также синтаксически и семантически не совместимы с языками представления знаний, что затрудняет переход от знаний (в том числе процедурных) к их обработке.

В процессе решения задач с использованием рассматриваемых языков программирования, а также в процессе интерпретации программ данных языков, приходится решать вспомогательные задачи на графовых структурах, для большинства из которых, а также для задач формального логического вывода, интеллектуального анализа данных (в частности, в большинстве алгоритмов метода анализа формальных понятий), ключевыми являются базовые теоретико-множественные операции.

Показано, что все платформы, реализующие рассмотренные языки программирования, поддерживают мелкозернистый параллелизм, а большинство из них поддерживает многопоточное исполнение на многоядерных процессорах (ЦПУ) и крупнозернистый параллелизм, являясь распределёнными системами, работающими с неразделяемой памятью, и только одна реализация (Blazegraph) поддерживает среднезернистый параллелизм потока данных, используя возможности вычислительных устройств ГПУ. Однако ни одна из платформ реализации рассматриваемых языков в явном виде формально не специфицирована, из чего следует, что качественные характеристики языковых платформ необходимо извлекать из естественно-языковых документаций, или из исходных кодов, или при устном общении с разработчиками данных платформ.

Известные алгоритмы, ориентированные на параллельную реализацию, основаны на линейных или древовидных структурах данных, однако, либо ориентированы на параллелизм задач, либо на реализацию операции пересечения множеств без кратных элементов, не затрагивая операции объединения и разности.

Во второй главе приведена формальная спецификация теоретико-множественной модели обработки знаний. Разработанная спецификация состоит из трёх частей.

В первой части рассмотрена онтологическая модель теоретико-множественных операций модели обработки знаний в конечной памяти, основанная на модели унифицированного семантического представления знаний и модели спецификации знаний. Онтологическая модель условно разбивается на две части. В первой части специфицируется теоретико-множественная модель обработки информации с конечным множеством состояний. В данной спецификации используются знаки трёх классов: 1) знаки, на которых задаются отношения модели обработки информации и памяти с заданным множеством состояний; 2) знаки, определяющие операции модели обработки информации; 3) знаки, устанавливающие связь между операциями модели обработки информации и знаками микропрограмм, реализующих соответствующие операции. Во второй части специфицируются базовые теоретико-множественные команды языка представления и обработки знаний, оперирующие конечными множествами в

конечной памяти. На этом уровне выделяется два класса знаков: знаки, определяющие схемы отношений теоретико-множественных команд языка обработки знаний, и знаки, определяющие связь между командами языка обработки множеств и операциями модели обработки информации. Используя онтологическую модель система, основанная на знаниях, способна получить рефлексивное знание о самой себе и, в процессе решения теоретико-множественных задач определить такие свойства реализованной модели обработки информации, как доступные реализации операций, соответствующие теоретико-множественным командам языка обработки знаний, объём доступной памяти.

Во второй части рассмотрена задача управления памятью, сформулированная как задача оптимального дискретного управления. Получено приближённое решение поставленной задачи, для которого используется модель стратегий и соответствующие алгоритмы перераспределения участков памяти. Разработанные алгоритмы основаны на системе динамического управления памятью, описанной в [1], и сохраняют стратегию выбора первого подходящего свободного участка памяти при перераспределении участков памяти, в связи с чем оценка перерасхода памяти по причине внешней фрагментации не превышает $O(U * \log_2(U))$, где U – объём занятой памяти. В общем случае временная сложность добавления n элементов данных с учётом возможных удалений как уже имеющихся, так и добавленных данных, в выделенный участок памяти для геометрических стратегий оценивается как $O(f(m) * n + d * \tau)$, где m – объём памяти, d – количество перевыделений, $\tau = \ln^2(m)$ – время одного перевыделения в системе [1], $f(m)$ – время доступа (чтения/записи) к одной ячейке памяти. Исходя из этого, среднее амортизационное время добавления одного экземпляра данных в участок памяти является постоянным, если время доступа к ячейке памяти в зависимости от размера памяти также постоянно, а количество записей данных в ячейки памяти зависит как минимум прямо пропорционально от произведения времени одного перевыделения на количество перевыделений.

В третьей части рассмотрены разработанные алгоритмы теоретико-множественных операций, ориентированные на параллельную реализацию. Данные алгоритмы оперируют множествами, представленными в памяти в виде упорядоченных массивов, и отличаются поддержкой мультимножеств и ориентацией на использование параллелизма потока данных и реализацию на мелко-и среднезернистой параллельной вычислительной архитектуре с произвольным доступом к общей памяти. Алгоритмы основаны на использовании алгоритмов бинарного поиска и вычисления массива префиксных сумм. Теоретическая оценка временной сложности данных

алгоритмов при использовании разработанной модели стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти на уровнях управления устройствами и данными системы, основанной на знаниях, не превышает $O(\log_2(n) * n/p + \ln^2(m) * f(m))$, где n – суммарная мощность множеств, p – количество процессоров, тогда как известные в настоящее время подобные алгоритмы дают оценку не менее, чем $O(n + p * \log_2(n))$, без учёта временных затрат на управление памятью.

В третьей главе рассмотрены реализация и экспериментальная проверка разработанных алгоритмов. Модель и соответствующие алгоритмы стратегий перераспределения участков памяти были реализованы на языке C++ с использованием программной реализации системы динамического управления памятью [1] (em). Для тестирования использовалась компьютерная конфигурация на базе ЦПУ Intel i5-3570, ОЗУ 1x8GB 1333MHz, под управлением ОС x64 Windows 8. В результате тестирования была подтверждена теоретическая оценка среднего амортизационного времени работы одной операции перевыделения участков памяти при использовании геометрических стратегий с гистерезисом. График на рисунке 1 показывает зависимость натурального логарифма пропускной способности s (бит/с) от размера, на который изменяется выделенный участок, для геометрической стратегии с гистерезисом. Тёмная плоскость на графике отмечает нулевую пропускную способность. Значения s на главной диагонали стремятся к минус бесконечности, так как $l=u$.

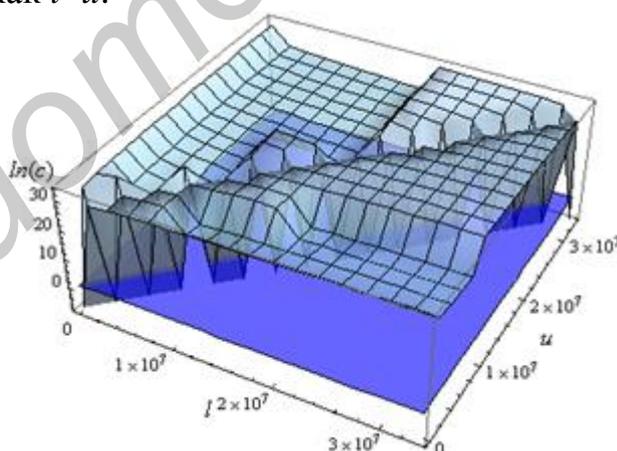


Рисунок 1 – График зависимости натурального логарифма пропускной способности операции перевыделения при использовании геометрической стратегии с гистерезисом от начального и конечного размеров перевыделяемого участка памяти

Проведённое сравнение реализации предложенных алгоритмов с аналогичной системой TCMalloc показало (рисунок 2), что, в случае нефрагментированной памяти, для максимального размера перевыделяемого участка 512 ячеек суммарное время работы всех операций перевыделения в системе TCMalloc в 1.3 раза меньше. Для максимальных размеров перевыделяемого участка 4114 и 2^{25} ячеек суммарное время, наоборот, в 1.46 и

7030 раз выше. В случае фрагментированной памяти для максимальных размеров перевыделяемого участка 512 и 4114 ячеек суммарное время работы всех операций перевыделения в системе TCMalloc в 4.7 и 1.96 раза меньше, однако для максимального размера перевыделяемого участка 2^{25} ячеек суммарное время, наоборот, в 2.38 раза выше.

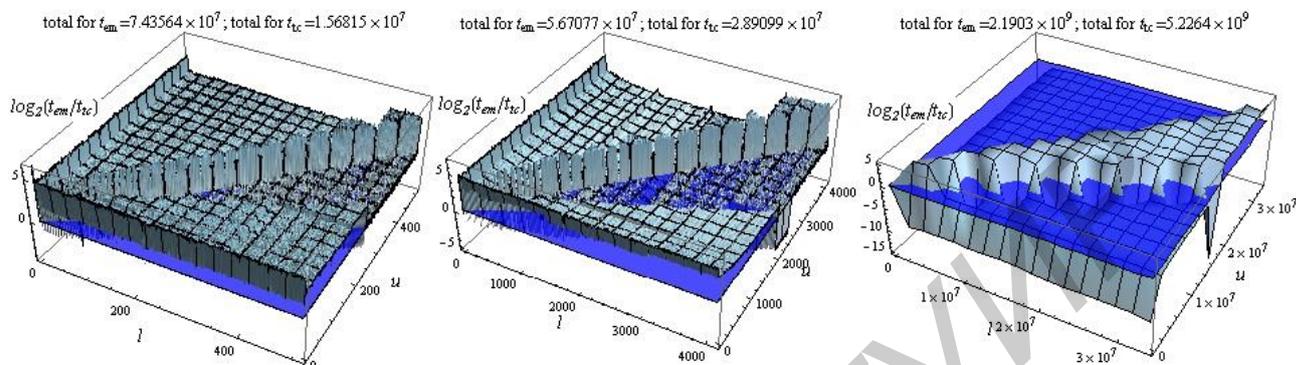


Рисунок 2 – Графики зависимости двоичного логарифма отношения времён исполнения (в нс) операций перевыделения в системах em (t_{em}) и TCMalloc (t_{tc}) для максимальных размеров перевыделяемого участка (слева направо) 512 ячеек, 4114 ячеек и 2^{25} ячеек в случае, когда память фрагментирована

Алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний были реализованы на языке C++ с использованием средств платформы параллельного программирования OpenCL. Для тестирования использовались вычислительные архитектуры ЦПУ (Intel Core i7 3520M CPU) и ГПУ (Intel HD Graphics 4000) и тесты шести видов, описанные в таблице 1. В каждом из тестов мощность мультимножеств равнялась 2^k , где $k = 1, \dots, 22$.

Таблица 1 – Входные данные для тестирования теоретико-множественных операций

Наименование теста	Характеристика входных массивов A и B , кодирующих мультимножества
тест 1	Массивы A и B изначально не упорядочены и каждый $A[i]$ и $B[j]$ есть случайная величина, равномерно распределённая на отрезке $[0, \max(A , B)/2]$
тест 2	$A=\{1,3,5,\dots\}$, $B=\{0,2,4,\dots\}$
тест 3	A и B не содержат кратных элементов и любой $A[i]$ больше любого $B[j]$
тест 4	$A=\{0,1,4,5,8,9,\dots\}$, $B=\{2,3,6,7,10,11,\dots\}$
тест 5	$A=\{1,2,3,\dots\}$, $B=\{1,2,3,\dots\}$
тест 6	$A=\{0,0,0,\dots\}$, $B=\{0,0,0,\dots\}$

Показано (рисунок 3), что пропускная способность параллельной реализации операции пересечения (разности) сильно зависит от характера входных мультимножеств. В лучшем случае на архитектуре ГПУ ускорение составляет от 5 до 32 раз, однако в худшем случае, например, когда операция пересечения не совершает полезной работы (результат пересечения много меньше размеров входных мультимножеств), но на её исполнение затрачивается значительное процессорное время, параллельная реализация

проигрывает последовательной в 1.3–7 раз. Пропускная способность параллельной реализации операции объединения мультимножеств может быть ускорена 5–15 раз по сравнению с последовательной реализацией для размеров объединяемых множеств более 64 элементов на архитектуре ГПУ (рисунок 4). Идеальная теоретическая оценка их временной сложности не подтверждена, что связано с небольшим, по сравнению с мощностями обрабатываемых множеств, количеством процессоров и принципами организации коллективной работы процессоров с памятью.

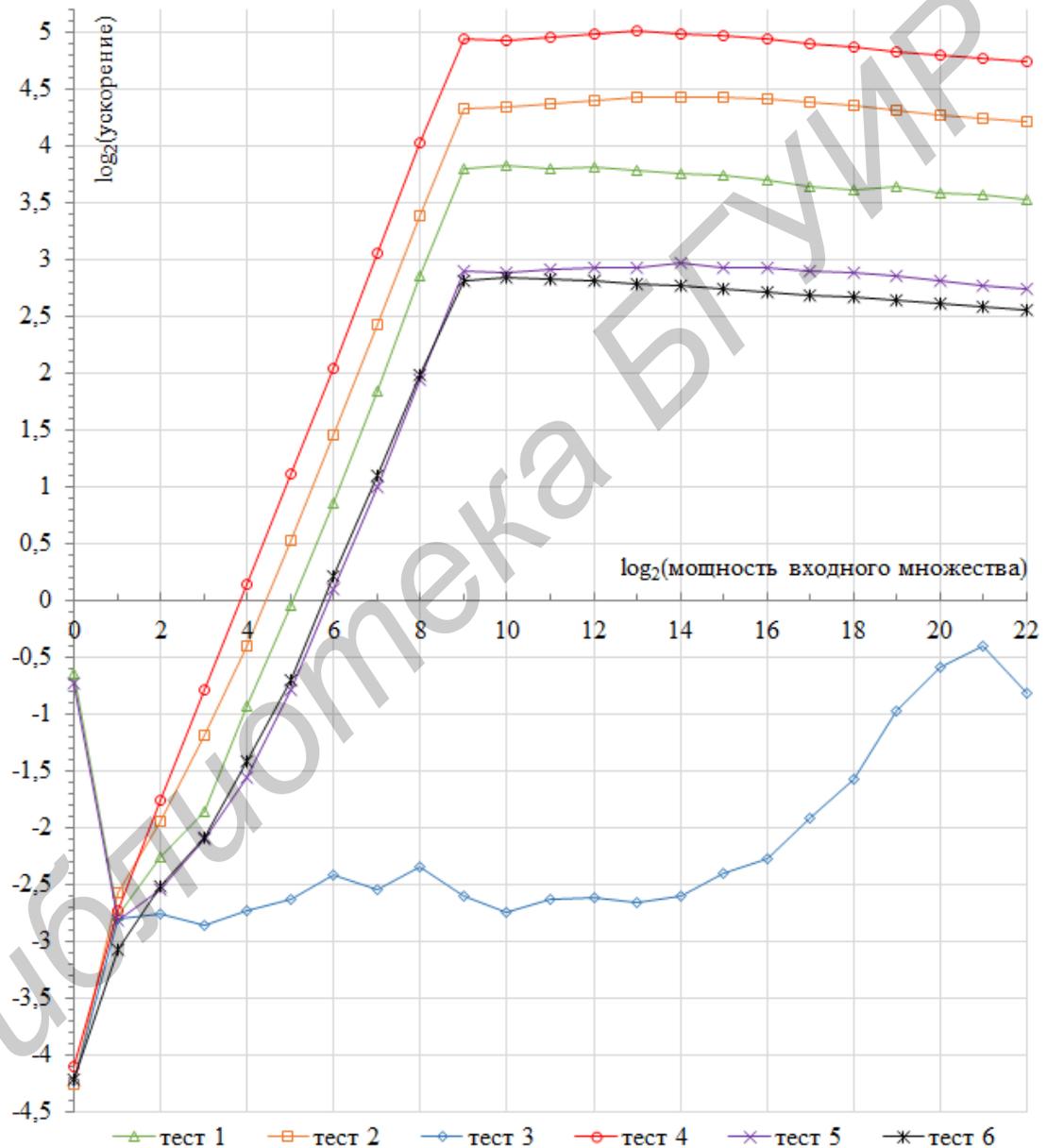


Рисунок 3 – Графики зависимости двоичного логарифма коэффициента ускорения параллельной реализации операции пересечения по сравнению с последовательной реализацией (на устройстве ГПУ) от двоичного логарифма мощности пересекаемых множеств

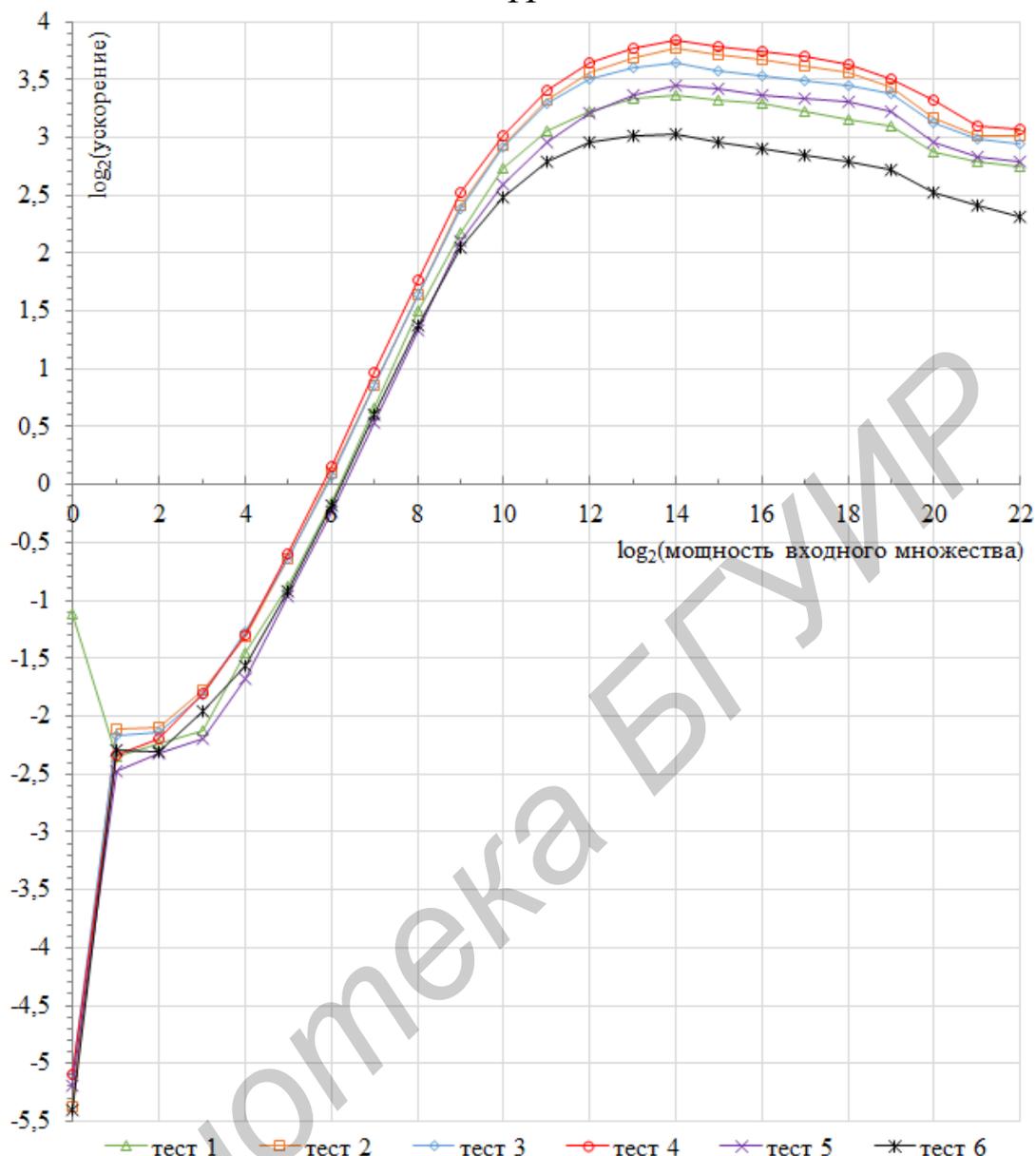


Рисунок 4 – Графики зависимости двоичного логарифма коэффициента ускорения параллельной реализации операции объединения по сравнению с последовательной реализацией (на устройстве ГПУ) от двоичного логарифма мощности пересекаемых множеств

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён анализ формальных моделей, основанных на семантических сетях. Рассмотрены языки и операции распространённых графовых моделей обработки информации. Показано, что для всех данных моделей теоретико-множественные операции являются ключевыми. Проведён анализ средств формальной спецификации знаний. Проведён анализ известных алгоритмов теоретико-множественных операций, ориентированных на параллельную реализацию.

2. На основе модели унифицированного семантического представления знаний и модели спецификации знаний, разработана онтологическая модель теоретико-множественных операций модели обработки знаний.

3. Получено приближённое решение обобщённой задачи дискретного управления памятью с конечным числом состояний на уровне управления устройствами и данными системы обработки информации. Решение заключается в использовании разработанной модели и алгоритмов стратегий перераспределения участков линейно адресуемой битовой памяти [1]. При этом среднее амортизационное время добавления одного экземпляра данных в участок памяти является постоянным, если время доступа к ячейке памяти в зависимости от размера памяти также постоянно, а количество записей данных в ячейки памяти зависит как минимум прямо пропорционально от произведения времени одного перевыделения на количество перевыделений.

4. На основе модели и алгоритмов стратегий перераспределения участков памяти разработаны алгоритмы теоретико-множественных операций параллельной обработки знаний, отличающиеся поддержкой мультимножеств и ориентацией на использование параллелизма потока данных [2, 3, 4, 5].

5. Осуществлено тестирование разработанных алгоритмов. Для разработанных модели и алгоритмов перераспределения участков памяти получено подтверждение их теоретической средней амортизационной оценки временной сложности. Для алгоритмов теоретико-множественных операций показано, что их параллельные реализации масштабируются с ростом количества процессоров и, в большинстве случаев, обеспечивают меньшее время исполнения, чем их последовательные аналоги, при использовании современных распространённых графических процессорных устройств.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Ивашенко, В. П. Операции управления массивами данных в линейно адресуемой памяти / В. П. Ивашенко, С. В. Синцов // Докл. БГУИР. – 2016. – № 6. – С. 86–93.

Статьи в сборниках и материалах конференций

2. Ивашенко, В. П. Алгоритмы параллельной реализации анализа формальных понятий для приближенных множеств в однородных семантических сетях / В. П. Ивашенко, С. В. Синцов // BIGDATA and Advanced Analytics : материалы 2-ой науч.-практ. конф., Минск, 15–17 июня 2016 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2016. – С. 110–118.

3. Ивашенко, В. П. Параллельная реализация операций над приближенными множествами для анализа формальных понятий в однородных семантических сетях / В. П. Ивашенко, С. В. Синцов // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016 : Смоленск, 3–7 окт. 2016 г. : тр. конф. : в 3 т. / Рос. ассоц. искусств. интеллекта, Федер. исслед. центр «Информатика и управление» Рос. акад. наук. – Смоленск, 2016. – Т. 1. – С. 343–351.
4. Синцов, С. В. Параллельная реализация операции пересечения множеств для решения задачи анализа формальных понятий / С. В. Синцов // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии (CSIST'16) : материалы междунар. науч. конгр., Минск, 24–27 окт. 2016 г. / Евраз. ассоц. ун-тов [и др.]. – Минск, 2016. – С. 913–918.
5. Синцов, С. В. Параллельная реализация операции пересечения множеств для решения задачи анализа формальных понятий / С. В. Синцов // Информационные технологии и системы 2016 (ИТС 2016) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 26 окт. 2016 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2016. – С. 132–133.