

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

УДК 004.021:004.75

Киселёв
Андрей Игоревич

Модели и алгоритмы интерактивной согласованности распределённых систем

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0612-01 «Программная инженерия»

Научный руководитель
Нестеренков С.Н.
к.т.н., доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

Современная цифровая экономика характеризуется стремительным ростом числа интерактивных распределённых приложений. Системы для совместной работы в реальном времени, многопользовательские онлайн-игры, среды для совместного проектирования (CAD/CAM), а также системы промышленного мониторинга и управления (SCADA) стали неотъемлемой частью как профессиональной деятельности, так и повседневной жизни. Ключевой особенностью таких систем является требование к минимальным задержкам (low latency) при взаимодействии пользователя с системой и другими участниками, что напрямую влияет на качество пользовательского опыта (Quality of Experience).

Передовые информационные системы характеризуются непрерывной генерацией и обработкой массивных объёмов данных. Для работы с этими данными в интерактивном режиме требуется разработка инновационных стилей взаимодействия.

Классические алгоритмы консенсуса, такие как Paxos и Raft, хоть и обеспечивают строгие гарантии согласованности, вносят существенные задержки из-за многофазных протоколов подтверждения операций, что делает их малопригодными для приложений, где счёт идёт на миллисекунды. С другой стороны, решения, используемые в игровой индустрии, часто жертвуют строгостью согласованности в пользу отзывчивости, полагаясь на сложные эвристические механизмы предсказания и компенсации задержек, что усложняет разработку и применимо не для всех предметных областей.

Таким образом, возникает научно-практическая проблема, заключающаяся в разрыве между потребностями реального сектора экономики в высокоотзывчивых распределённых системах и ограничениями существующих технологий для их построения. Разработка новых алгоритмов и архитектурных подходов для достижения согласованности в интерактивных системах является актуальным направлением исследований в области информатики и вычислительной техники, направленным на создание фундамента для программных продуктов нового поколения.

Прикладная значимость данного исследования проявляется в возможности как применения разработанной классификации распределённых систем в качестве языка описания и средства для принятия более обоснованных архитектурных решений, так и использования разработанного слоя доступа к распределённой системе в виде программной библиотеки для существенного упрощения и ускорения процесса создания интерактивных распределённых приложений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, в частности, в области информационно-телекоммуникационных систем. Исследование напрямую связано с решением фундаментальных задач в области распределённых вычислений, таких как проблема консенсуса, обеспечение отказоустойчивости и проектирование высокопроизводительных сетевых протоколов.

Целью диссертационного исследования является проектирование моделей и алгоритмов обеспечения интерактивной согласованности для создания слоя доступа к распределённой системе, обеспечивающего согласованность данных с минимальными задержками и предоставляющего архитектурную основу для создания толерантных к отказам и масштабируемых программных продуктов.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Произвести анализ существующих подходов к организации взаимодействия в распределённых системах, включая как классические алгоритмы консенсуса, так и специализированные технологии для интерактивных приложений, выявить их преимущества и недостатки в контексте моделей согласованности и интерактивных приложений.

2. Разработать классификацию распределённых систем на основе концепции владения состоянием (исключительное, разделяемое, полное) для формализации архитектурных различий и обоснования выбора подходов к проектированию.

3. Спроектировать и формально обосновать алгоритм для интерактивной согласованности (алгоритм консенсуса), основанный на динамически формируемой древовидной топологии кластера и допускающий временное разделение кластера для обеспечения непрерывной работы его частей в условиях сбоев.

4. Разработать модульную архитектуру слоя доступа к распределённой системе, включающую модули для базовой коммуникации, управления членством в кластере и переподключения с восстановлением состояния.

5. Спроектировать и реализовать систему удалённого вызова методов (RPC), независимую от технологии взаимодействия и способную функционировать как интерфейс для слоя доступа.

6. Создать программный прототип для верификации разработанных моделей и алгоритмов, провести теоретический анализ временных характеристик разработанного алгоритма.

Объектом исследования являются распределённые системы.

Предметом исследования являются модели и алгоритмы обеспечения согласованности с высокой скоростью отклика.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Формальная классификация распределённых систем по характеру владения состоянием (исключительное, разделяемое, полное), позволяющая систематизировать подходы к проектированию архитектуры и выбору технологий взаимодействия.

2. Алгоритм консенсуса, основанный на динамической древовидной топологии кластера, для объединения интерактивных приложений в распределённую систему, обеспечивающий как строгую модель согласованности, так и сохранение работоспособности изолированных групп узлов.

3. Трёхуровневая модульная архитектура, реализующая алгоритм консенсуса, позволяющая ослабить модель согласованности для обеспечения наилучших характеристик времени отклика и использующая независимую от технологии взаимодействия систему удалённого вызова методов в качестве интерфейса к системе.

Все исследования, результаты которых изложены в диссертации, получены лично соискателем в процессе научных исследований и экспериментов. Вклад научного руководителя заключается в формулировке целей и задач исследования.

По теме магистерской диссертации опубликовано 2 статьи в сборнике научных статей. Общий объем публикаций составляет 14 страниц.

Основные положения и результаты диссертационного исследования были апробированы на международных научных конференциях:

- Information Technologies and Systems [A.1];
- Исследования молодых ученых [A.2].

Также разработанные программные компоненты прошли практическую апробацию в рамках создания прототипа интерактивного распределённого приложения.

Общий объем работы составляет 113 страниц, из которых основного текста – 60 страниц, 31 рисунок на 26 страницах, 8 таблиц на 6 страницах, список использованных источников из 41 наименования на 4 страницах и 3 приложения на 32 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе закладываются терминологические основы работы. Формулируется определение распределённой системы, вводятся понятия интерактивного приложения и слоя доступа к распределённой системе, который скрывает сложность сетевого взаимодействия и обеспечивает согласованное представление о состоянии для всех узлов.

Во второй главе представляется разработанная формальная классификация распределённых систем по характеру владения состоянием. Выделяются три класса систем: с исключительным, разделяемым и полным владением. Данная классификация позволяет систематизировать подходы к проектированию архитектуры и выбору технологий взаимодействия.

В третьей главе после анализа существующих подходов, таких как Raft и Mirror Networking, проектируется оригинальный алгоритм консенсуса для интерактивной согласованности. Алгоритм основан на динамической древовидной топологии кластера, что обеспечивает упорядочивание операций на корневом узле без механизма выборов и допускает временное разделение кластера (split-brain) для сохранения работоспособности. Представлена трёхуровневая архитектура слоя доступа, включающая модули для базовой коммуникации, управления членством в кластере и переподключения с восстановлением состояния. Также вводится модель логического времени, основанная на линейном упорядочивании событий.

В четвёртой главе проектируется и реализуется система удалённого вызова методов (RPC), служащая интерфейсом для разработанного слоя доступа. Архитектура системы обеспечивает независимость от транспортного протокола и алгоритма сериализации за счёт введения абстракций пакета, а использование прокси-объектов и интерфейсов языка программирования гарантирует строгую типизацию и минимальные накладные расходы при локальных вызовах.

В пятой главе описывается верификация предложенных решений. Для проверки корректности и демонстрации работы алгоритмов был создан программный прототип интерактивного приложения, приводятся сценарии его использования. Также проведён теоретический анализ временных характеристик алгоритма и даны рекомендации по его использованию.

В заключении подводятся итоги работы, формулируются основные научные и практические результаты, а также намечаются направления для дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной магистерской диссертации было проведено исследование моделей и алгоритмов для обеспечения интерактивной согласованности в распределённых системах.

Проведённое исследование позволило разработать комплексное решение, объединяющее теоретические основы распределённых вычислений с практическими требованиями современных интерактивных приложений.

Основным теоретическим результатом работы является разработанная классификация распределённых систем.

Ключевым практическим достижением является спроектированный и реализованный в виде слоя доступа к распределённой системе алгоритм консенсуса.

Поставленные цели и задачи были выполнены в полном объёме. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложена формальная классификация распределённых систем на основе характера владения состоянием, устанавливающая чёткие критерии разделения систем и определяющая соответствующие им модели взаимодействия.

2. Разработан оригинальный алгоритм консенсуса с высокой скоростью отклика, допускающий временное нарушение связности кластера (*split-brain*) для обеспечения непрерывности пользовательского опыта, что отличает его от классических алгоритмов консенсуса, требующих строгого поддержания кворума.

3. Предложена модель логического времени для описания состояния распределённой системы, основанная на линейном упорядочивании событий изменения распределённого состояния.

4. Предложено использование абстракции пакета для отделения механизма взаимодействия (транспортного уровня) от высокоуровневых систем маршрутизации, как, например, система удалённого вызова методов или слой доступа к распределённой системе.

Результаты исследования открывают перспективы для дальнейшего развития в нескольких направлениях:

1. Разработка механизмов автоматического слияния ветвей изменений после восстановления связности кластера.

2. Использование криптографических методов для верификации отправителя пакета.

3. Применение методов машинного обучения для улучшения механизма предсказания пакетов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

- A.1. Киселёв, А. И. Архитектура модульной системы удалённого вызова методов для современных платформ программирования. // Information Technologies and Systems 2024 (ITS 2024) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 20 нояб. / редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – 240 с.
- A.2. Киселёв, А. И. Алгоритм консенсуса для интерактивных распределённых приложений. // Исследования молодых ученых : материалы СIV Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2025 г.) / [под ред. И. Г. Ахметова и др.]. — Казань : Молодой ученый, 2025. — iv, 146 с.