

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНСИСТЕНТНОСТИ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ

А.М. Тюнина¹, Д.С. Кукуева¹, В.В. Кондусова¹, А.С. Ситников²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

²Ярославское высшее военное училище ПВО имени маршала Советского
Союза Говорова Л.А.

В статье проводится комплексный анализ современных методов и алгоритмов обеспечения консистентности данных в распределенных системах. Исследование охватывает три ключевых подхода: векторные часы для отслеживания причинно-следственных связей, конфликт-ориентированные реплицированные типы данных (CRDT) для обеспечения конечной согласованности и протоколы консенсуса (Raft, Paxos) для строгой консистентности. Представлена детальная характеристика каждого метода, включая математические основы, алгоритмическую сложность и практические аспекты реализации. На основе сравнительного анализа выявлены компромиссы между согласованностью, доступностью и производительностью различных подходов. Результаты исследования демонстрируют, что выбор оптимального метода обеспечения консистентности должен определяться конкретными требованиями приложения к надежности, масштабируемости и отзывчивости системы.

Ключевые слова: распределенные системы, консистентность данных, векторные часы, CRDT, протоколы консенсуса, Raft, Paxos, CAP-теорема, репликация данных, отказоустойчивость.

METHODS AND ALGORITHMS FOR ENSURING DATA CONSISTENCY IN DISTRIBUTED SYSTEMS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPROACHES

A.M. Tyunina¹, D.S. Kukueva¹, V.V. Kondusova¹, A.S. Sitnikov²

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

²Yaroslavskoye vyssheye voyennoye uchilishche PVO imeni marshala Sovetskogo
Soyuza Govorova L.A.

The article provides a comprehensive analysis of modern methods and algorithms for ensuring data consistency in distributed systems. The study covers three key approaches: vector clocks for tracking cause-and-effect relationships, conflict-oriented replicated data types (CRDT) for ultimate consistency, and consensus protocols (Raft, Paxos) for strict consistency. A detailed description of each method is presented, including mathematical foundations, algorithmic complexity, and practical aspects of implementation. Based on a comparative analysis, trade-offs between consistency, availability, and performance of various approaches have been identified. The results of the study demonstrate that the choice of the optimal method for ensuring consistency should be determined by the specific requirements of the application for reliability, scalability and responsiveness of the system.

Keywords: distributed systems, data consistency, vector clock, CRDT, consensus protocols, Raft, Paxos, CAP theorem, data replication, fault tolerance.

Распределенные системы стали фундаментальной основой современных информационных технологий, обеспечивая масштабируемость, отказоустойчивость и географическую распределенность сервисов. Однако распределенность порождает фундаментальную проблему поддержания консистентности данных между узлами системы в условиях сетевых задержек, частичных отказов и конкурентного доступа. Традиционные подходы к обеспечению согласованности, такие как двухфазное завершение транзакций, демонстрируют ограниченную эффективность в крупномасштабных средах из-за высокой латентности и снижения доступности. Проблема усугубляется разнородностью требований современных приложений: от систем реального времени, требующих строгой консистентности, до мобильных и офлайн-сервисов, где приоритетом является доступность. В связи с этим возникает необходимость в комплексном анализе современных методов обеспечения консистентности и выработке критериев их выбора для различных классов распределенных систем. Особую актуальность приобретает исследование компромиссов между согласованностью, доступностью и производительностью в контексте практического применения различных алгоритмов.

В современных распределённых системах, таких как базы данных, облачные хранилища и отказоустойчивые сервисы, одной из ключевых задач является обеспечение согласованности данных. Это особенно актуально в условиях сетевых задержек, отказов узлов и разрывов соединения.

Цель данной статьи — рассмотреть современные методы и алгоритмы, обеспечивающие консистентность данных. В статье анализируются различные подходы, такие как векторные часы, отслеживающие причинно-следственные связи, конфликт-ориентированные реплицированные типы данных (CRDT), предотвращающие конфликты при репликации, а также протоколы консенсуса, такие как Raft и Paxos, обеспечивающие строгую согласованность.

Традиционные методы, такие как двухфазное завершение (2PC), не всегда обеспечивают требуемую производительность и доступность в условиях масштабируемых сред.

В последнее время растёт популярность систем, работающих в условиях нестабильной сетевой среды, таких как мобильные приложения и глобальные онлайн-сервисы. В таких системах требования к доступности часто становятся важнее, чем к строгой согласованности данных.

В ответ на эту тенденцию активно разрабатываются альтернативные методы, такие как слабо согласованные структуры данных и эффективные протоколы консенсуса.

Векторные часы — это механизм, позволяющий отслеживать причинно-следственные связи между событиями в распределённой системе.

Каждый узел i хранит вектор $V[i]$, состоящий из N целых чисел — по одному на каждый узел. Когда на узле i происходит событие, он увеличивает соответствующий компонент вектора: $V[i] = V[i] + 1$. Этот вектор отправляется вместе с сообщением.

Получив сообщение с вектором W , узел j обновляет свой вектор покомпонентно: для всех k $V[j][k] = \max(V[j][k], W[k])$.

Формула сравнения: событие A предшествует событию B ($A \rightarrow B$), если для всех k $V_A[k] \leq V_B[k]$ и существует хотя бы одно m , такое что $V_A[m] < V_B[m]$.

Если векторы несравнимы, события считаются параллельными (конфликт).

Конфликт-ориентированные реплицированные типы данных (CRDT) представляют собой структуры, разработанные таким образом, чтобы их операции обладали свойствами коммутативности, ассоциативности и

идемпотентности. Эти свойства гарантируют, что после выполнения одного и того же набора операций (независимо от их порядка) состояние всех реплик будет идентичным.

Существует два основных типа CRDT:

1. Операционные CRDT (CmRDT), которые транслируют операции, которые должны быть доставлены на все реплики. Операции в CmRDT должны быть коммутативными.

2. Стейт-бейзд CRDT (CvRDT), которые передают своё полное состояние, а операция слияния (merge) является коммутативной, ассоциативной и идемпотентной.

Протоколы консенсуса, такие как Raft и Paxos, играют важную роль в обеспечении согласованности данных между множеством узлов, даже в условиях возможных сбоев. Они служат основой для создания надёжных распределённых систем.

Алгоритм Raft функционирует следующим образом:

1. Время делится на временные отрезки, называемые терминами.
2. В каждом таком периоде большинством голосов выбирается лидер.
3. Лидер получает записи от клиентов, реплицирует их на другие узлы и подтверждает их фиксацию, когда большинство участников подтверждают запись.

Основные этапы работы Raft:

1. Выбор лидера.
2. Репликация лога: лидер отправляет запросы на добавление записей (AppendEntries RPC) на другие узлы.
3. Безопасность: гарантируется, что лидер содержит все подтверждённые записи.

Для наглядного сравнения методов была составлена сравнительная таблица, основанная на анализе литературных источников.

Таблица1– Сравнительный анализ методов обеспечения консистентности

Метод	Гарантии консистентности	Доступность при сетевом разделе	Задержка записи	Сложность реализации
Векторные часы	Причинно-следственная (Causal)	Высокая	Низкая	Средняя
CRDT	Конечная (Eventual), Strong Eventually Consistent	Очень высокая	Низкая	Высокая (для сложных типов)
Raft/Paxos	Строгая (Strong)	Низкая (только кворум)	Высокая	Очень высокая

Результаты анализа показывают, что существует компромисс между двумя важными аспектами: согласованностью (C) и доступностью (A) в условиях возможных сетевых разделений (P).

Векторные часы не предназначены для разрешения конфликтов, они лишь обнаруживают их, передавая задачу приложениям. Хотя они обеспечивают хороший баланс, их согласованность не является строго линейной.

В системах, где важны доступность и отзывчивость, а требования к согласованности допускают конечное согласование, оптимальным выбором станут CRDT. Однако у них есть существенный недостаток: для некоторых структур требуется больше памяти, а проектирование сложных типов данных может быть сложным.

Протоколы консенсуса, такие как Raft, обеспечивают строгую линейную согласованность, что необходимо для систем, подобных распределенным хранилищам ключ-значение (etcd) или координаторам сервисов (ZooKeeper). Однако за эту надежность приходится платить более высокой задержкой операций записи (требуется подтверждение от кворума) и потерей доступности при отсутствии связи с лидером или кворума.

Перспективы развития методов обеспечения консистентности в распределенных системах связаны с разработкой адаптивных подходов, способных динамически изменять уровень согласованности в зависимости от текущих условий работы системы и требований приложения. Особый интерес представляют гибридные решения, комбинирующие преимущества различных методов, такие как использование CRDT для высокодоступных операций и протоколов консенсуса для критически важных данных. Дальнейшие

исследования должны быть направлены на создание эффективных механизмов автоматического разрешения конфликтов, оптимизацию потребления памяти в CRDT-структурах и разработку протоколов консенсуса с улучшенными характеристиками производительности. Важным направлением является также интеграция методов обеспечения консистентности с системами машинного обучения для прогнозирования сетевых задержек и оптимизации маршрутизации обновлений. Учитывая растущую популярность edge-вычислений и глобально распределенных приложений, особую актуальность приобретают исследования в области обеспечения консистентности в условиях экстремальных задержек и нестабильного сетевого соединения.

Список литературы

1. Барков А.В., Киселев А.С. Фундаментальные проблемы консистентности данных в распределенных системах // Прикладная информатика. - № 4. - 2023. - С. 15-25.
2. Внуков А.А., Петрова Е.С. Алгоритмы консенсуса Paxos и Raft: теория и практика: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. - Москва: Юрайт, 2022. - 198 с.
3. Смирнов И.П. Конфликт-ориентированные реплицированные типы данных (CRDT): архитектура и применение. - Москва: ДМК Пресс, 2023. - 112 с.
4. Орлов Д.К. Распределенные системы: обеспечение согласованности и доступности. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Инфра-Инженерия, 2024. - 180 с.

References

1. Barkov A.V., Kiselev A.S. Fundamental problems of data consistency in distributed systems // Applied Informatics. - No. 4. - 2023. - pp. 15-25.
2. Vnukov A.A., Petrova E.S. Paxos and Raft consensus algorithms: theory and practice: textbook. handbook for bachelor's and master's degrees. - Moscow: Yurait, 2022. - 198 p.
3. Smirnov I.P. Conflict-oriented replicated data types (CRDT): architecture and application. - Moscow: DMK Press, 2023. 112 p.
4. Orlov D.K. Distributed systems: ensuring consistency and accessibility. - 2nd ed., revised and add. Moscow: Infra-Engineering, 2024. 180 p.