

МЕТОД СИНХРОНИЗАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ И ПОДДЕРЖКОЙ СЕМАНТИЧЕСКИХ КОНФЛИКТОВ

Семенов Г. В.¹

Научный руководитель – PhD, доцент Аксенов В. Е.¹

¹Университет ИТМО

georgii.v.semenov@gmail.com

Введение

Метод оптимистической репликации широко применяется в системах с разделяемым состоянием, включая геораспределенные системы, сервисы сетевой инфраструктуры и цифровые коллаборативные среды. Примерами таких систем являются серверы доменных имен и календарных данных, сервисы управления метаданными облачной инфраструктуры, системы контроля версий, файловые хранилища и многопользовательские приложения. Высокая доступность таких систем достигается за счет выполнения локальных обновлений без согласования с другими репликами, что приводит к необходимости последующей реконсильции параллельных версий для получения единого согласованного состояния.

В общем случае асинхронная реконсильция с гарантией общего прогресса невозможна по теореме FLP, что стимулировало развитие теории бесконфликтных реплицируемых типов (CRDT) [1], обладающих свойством строгой конечной согласованности. Экземпляры CRDT достигают согласованного состояния с помощью встроенных в них стратегий разрешения конфликтов, однако это ограничивает применимость CRDT в системах со сложной объектной или реляционной моделью данных, где конфликты могут быть семантически значимыми и требовать явного разрешения. При этом технологии программирования оптимистической репликации для объектов с ограничениями целостности остаются недостаточно исследованными.

В работе рассматривается метод синхронизации композитных объектов — сущностей со слабой ссылочной целостностью, поля которых являются литералами (примитивными значениями или ссылками), либо коллекциями литералов. Подход поддерживает эволюцию схем и алгебраические ограничения. Для идентификации и разрешения конфликтов применяется эпистемическая модель, допускающая как ручные, так и бесконфликтные стратегии реконсильции.

Основная часть

В качестве модели системы рассматривается множество узлов с локальными репликами общей памяти, представленной как монотонно расширяемое пространство объектов (object store) как экземпляров сущностей. Модификации объектов, порождаемые на узлах, применяются к локальным репликам и в конечном счете доставляются на все узлы системы. В качестве свойства согласованности используется строгая конечная согласованность [1]: реплики, получившие одну и ту же историю обновлений, находятся в эквивалентных состояниях. Объект моделируется как ассоциативный массив идентификаторов полей (fields) и соответствующих им значений.

Для управления схемой объекта используются *стереотипы* – интерфейсы, определяющие требования к наличию полей и ограничения на допустимые значения. Стереотипы представлены как специальные объекты с фиксированной служебной схемой данных. Они поддерживают задание произвольных алгебраических ограничений (constraints), а также объявление производных методов (derived methods), задающих функционально чистые выражения на основе полей объекта. Поскольку

объявления стереотипов могут изменяться, каждому их состоянию сопоставляется версия. Типовая сигнатура объекта определяется как теоретико-типовое пересечение версий множества стереотипов, ассоциированных с текущей версией объекта. Объект считается согласованным тогда и только тогда, когда выполняются ограничения всех его стереотипов.

Синхронизация стереотипов осуществляется бесконфликтно за счет использования уникальных глобальных идентификаторов совместно с символьными именами для *элементов* стереотипа – полей, ограничений и производных методов. Таким образом, множество элементов представляется в виде структуры Unique Set с монотонным флагом удаления. Поскольку для соответствия объекта его типовой сигнатуре необходимо наличие всех требуемых его стереотипами полей, соответствующий полиморфизм может быть достигнут либо наличием в объекте в точности одного поля, символьное имя которого соответствует требуемому символьному имени поля стереотипа, либо аннотацией поля с помощью меток, соответствующих глобальному идентификатору поля в стереотипе. При наличии полей, которые неоднозначно отображаются на стереотипы, объект считается несогласованным.

Для описания допустимых модификаций на полях объекта используется эпистемическая семантическая модель конфликта [2], определяющая коллаборативную работу с множеством регистров, а также алгоритмы идентификации и разрешения конфликтов. Объект рассматривается как монотонно расширяемое множество регистров, соответствующих полям, с семантикой Observed-Remove Set. В рамках данной модели вводится понятие конфликта значений (value conflict): объект находится в таком конфликте, если хотя бы одно из его полей находится в семантическом конфликте и текущее значение объекта не может быть однозначно сериализовано. Дополнительно рассматриваются конфликты схемы (type conflict), возникающие при несоответствии объекта заявленной типовой сигнатуре, что проявляется при синхронизации как нарушение ограничений, определенных стереотипами объекта. Для управления обоими видами конфликтов предлагается использование алгоритма разрешения конфликта в [2].

Выводы

Предложен подход к синхронизации композитных объектов как наиболее простого случая объектно-ориентированной сущности. Подход основан на использовании типовых стереотипов, синхронизируемых бесконфликтно, для обеспечения согласованности объектов. К направлениям дальнейших исследований относятся разработка программного фреймворка, реализующего предложенный метод, а также создание демонстрационных приложений оптимистической репликации с синхронизацией композитных объектов в эпистемической модели конфликта.

Литература

1. Shapiro M., Preguiça N., Baquero C., Zawirski M. A comprehensive study of Convergent and Commutative Replicated Data Types : research report RR-7506. — Paris : Inria — Centre Paris-Rocquencourt, 2011. — 50 p. — URL: <https://inria.hal.science/inria-00555588> (дата обращения: 19.02.2026).
2. Semenov G., Aksenov V. Semantic Conflict Model for Collaborative Data Structures [Электронный ресурс]. — 2026. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2602.19231> (дата обращения: 28.02.2026).