

УДК 004.4

## СИНХРОНИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДАННЫХ В ПРИЛОЖЕНИЯХ ОПТИМИСТИЧЕСКОЙ РЕПЛИКАЦИИ

Семенов Г.В. (Университет ИТМО, Институт системного программирования РАН)

Научный руководитель – с.н.с., кандидат физико-математических наук Золотов В.А.  
(Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН)

**Введение.** При создании распределенных информационных систем с высокой доступностью данных успешно применяются технологии оптимистической репликации, обеспечивающие возможность одновременной работы приложений со своими репликами данных. Оптимистическое предположение о возможности разрешения возникающих при этом конфликтов и приведения расходящихся реплик к единому согласованному представлению позволяет отказаться от политик блокировок и требований мгновенной согласованности данных, но требует методов их *синхронизации* [1].

Для синхронизации простых структурированных данных, в частности, текстовых документов, могут быть эффективно применены методы *операциональных преобразований* (OT) и *бесконфликтно реплицируемых типов* (CRDT), которые были разработаны для обеспечения коллективной работы в реальном времени. Оба метода предполагают хранение полной истории изменений реплицируемых наборов данных, а также определяют способы устранения конфликтов в них на основе строгого частичного отношения причинности Лампорта happens-before (например, используя векторные часы) или базиса коммутирующих операций (CmRDT), определенных для модели данных.

Для сложно структурированных данных, в частности, объектно-ориентированных данных с большим числом типов, отношений и определенных на них алгебраических ограничений, задача синхронизации становится нетривиальной, поскольку требуется не только консолидировать максимальное количество операций из журналов изменений, но и обеспечить выполнимость всех ограничений для результирующего представления данных. Поскольку задача синхронизации имеет разнообразные приложения в системах на основе NoSQL, системах резервного копирования, системах контроля версий, распределенных файловых системах, системах управления производством и интернетом вещей, представляет интерес обобщенная постановка задачи, не зависящая от особенностей конкретного приложения и лежащей в его основе модели данных.

**Основная часть.** В работе рассматривается задача синхронизации реплицируемых наборов данных, определяемых объектно-ориентированной моделью целевого приложения. Модель представляет собой систему классов с установленными отношениями обобщения/специализации, ассоциации, агрегации и композиции. Предполагается также, что определены ограничения кардинальности для объектных типов и ограничения кратности для коллекций простых типов в дополнение к необходимым условиям ссылочной целостности.

Задача решается в постановке синхронизации основного набора данных с одной из реплик, измененной изолированно, и имеет целью получение согласованного результирующего набора данных, удовлетворяющего ограничениям модели и учитывающего максимальное число изменений реплики. Способ представления и хранения самих объектно-ориентированных данных при этом не фиксируется.

Пусть  $A$  – исходное представление набора данных,  $A' = A \circ \Delta_A$  и  $B = A \circ \Delta_B$  – его реплики, полученные в результате применения CRUD операций и их сохранения в журналах изменений  $\Delta_A$  и  $\Delta_B$  соответственно. Подмножество операций  $\Delta'_B \subseteq \Delta_B$  будем называть *совместимым* с репликой  $A'$ , если оно может быть корректно исполнено и приводит

реплику  $A'$  к согласованному представлению  $A'' = A' \circ \Delta'_B$ , удовлетворяющему ограничениям модели. Несовместимые с репликой  $A'$  операции (например, операция обновления удаленного в  $A'$  объекта, создание ссылки на удаленный в  $A'$  объект или создание дополнительного числа объектов, которые бы нарушили ограничение кардинальности сверху для  $A''$ ), считаются *утратившими силу* или *конфликтными*.

Максимальное подмножество операций  $\Delta_B(A') \subseteq \Delta_B$ , совместимое с репликой  $A'$ , будем называть *максимально совместимым* журналом, а реплику  $A''$  – *синхронизированной* с репликой  $B$ , если она получена на основе максимально совместимого журнала  $A'' = A' \circ \Delta_B(A')$ .

В работе предлагается метод синхронизации реплицированных данных в описанной выше постановке, а также обсуждаются возможности его реализации на языке Java с использованием механизма рефлексии и основанного на нем набора утилит для определения атрибутного состава объектов, построения разностного преобразования, проверки совместимости подмножеств операций и их применения. Реализация разностных преобразований для коллекций простых и объектных типов ранее была рассмотрена в [2].

Метод апробирован в ходе реализации сервиса для управления замечаниями в строительных проектах с использованием международных информационных стандартов IFC (Industry Foundation Classes – ISO 16739) и BCF (BIM Collaboration Format). Стандарт IFC предоставляет спецификацию информационной схемы на языке EXPRESS, предназначенной для цифрового представления проектов в сегментах гражданского, промышленного и инфраструктурного строительства. Стандарт BCF определяет XML схему и RESTful интерфейс для обмена журналами замечаний и управления ими в процессе формирования цифровых моделей, представленных в соответствии с IFC. Использование метода синхронизации позволило поддержать альтернативные режимы работы сервиса, необходимые как для оперативного коллективного доступа к централизованному хранилищу журналов, так и для изолированной работы с ними в условиях отсутствия интернета или подготовки предварительных замечаний.

**Выводы.** Таким образом, рассмотрена задача синхронизации сложных объектно-ориентированных данных, а также предложен метод для ее решения в постановке синхронизации на основе максимально совместимого подмножества изменений. Метод успешно реализован в программном BCF-сервисе управления замечаниями с поддержкой альтернативных режимов работы (онлайн, оффлайн). В дальнейшем предполагается обобщить предложенный метод с учетом разных видов ограничений, предусматриваемых популярными декларативными языками моделирования UML/OCL, OWL, EXPRESS для целевых приложений.

#### **Список использованных источников:**

1. Saito, Y., & Shapiro, M. Replication: Optimistic Approaches // Электронное издание. – [2002].
2. Семенов Г.В. Библиотека C++ шаблонов для сравнения и слияния STL коллекций в приложениях оптимистической репликации данных // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, [2021].
3. Berlo L van, Krijnen T. Using the BIM Collaboration Format in a Server Based Workflow // Procedia Environmental Sciences. – 2014. – №22. – С. 325-332