

На правах рукописи



004606233

Харитонов Василий Юрьевич

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Вас'.

**СЕТЕВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОГЛАСОВАННОСТИ
ДАНЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ
ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Специальность 05.13.15 — Вычислительные машины, комплексы
и компьютерные сети

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

24 ИЮН 2010

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре Вычислительных машин, систем и сетей Московского энергетического института (технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дзегеленок Игорь Игоревич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
Рудельсон Лев Ефимович

кандидат технических наук, с.н.с.
Бурцев Александр Борисович

Ведущая организация: ЗАО «Р.Е.Т. Кронштадт»

Защита состоится 25 июня 2010 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.16 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13 (ауд. М-510).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «*21*» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.16
кандидат технических наук, доцент



Чернов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Общеизвестный факт: большую часть информации об окружающем мире человек получает с помощью зрения. Неудивительно, что компьютерная индустрия, выйдя в массы пользователей, стала интенсивно развиваться в сторону реалистичной визуализации всевозможных процессов. В настоящее время машинной графике уделяется самое пристальное внимание — от разработки эффектных и ресурсоемких оболочек операционных систем до реалистичной динамической 3D-визуализации в научных задачах и поражающих воображение эффектов в новейших компьютерных играх.

Программно-аппаратные средства с каждым годом становятся все более сложными и производительными и позволяют добиваться высокого реализма трехмерных виртуальных миров. Появился отдельный класс интерактивных трехмерных приложений — *системы виртуальной реальности*, которые позволяют пользователю не просто быть наблюдателем событий, происходящих в виртуальных мирах, но и непосредственно принимать в них участие.

Вместе с повышением реалистичности увеличивается и масштаб создаваемых систем. С ростом пропускной способности вычислительных сетей растет интерес к *распределенным системам виртуальной реальности* (РСВР). РСВР представляют собой один из наиболее динамично развивающихся классов распределенных систем. Повышенный интерес к таким системам, в первую очередь, связан с качественно новыми возможностями, которые они обеспечивают для человека. Прежде всего, пользователю предоставляется возможность «погружения» в некоторую *виртуальную среду*, достаточно точно имитирующую реальный мир. Пользователь может взаимодействовать с объектами виртуальной среды, как визуально, так и с помощью различных устройств ввода-вывода. Однако главным свойством РСВР является возможность взаимодействия множества пользователей в общей для них виртуальной среде. РСВР позволяет пользователям работать совместно, невзирая на то, как далеко они друг от друга находятся, что может быть востребовано во многих прикладных областях.

Одна из главных задач при построении РСВР — задача формирования виртуального мира, являющегося интерактивным, единым и *согласованным* (т.е. непротиворечивым, от англ. *consistent*) для всех пользователей системы. Данные свойства виртуального мира зависят как от качества визуализации, так и от заложенных в системе сетевых механизмов обеспечения согласованности данных. Если проблема визуализации в таких системах уже достаточно давно известна и хорошо освещена в научной литературе, то проблема обеспечения согласованности данных пока остается открытой и сравнительно малоисследованной.

Существующие в настоящий момент РСВР в основном разрабатываются за рубежом. По сведениям, доступным в открытой печати, в данной области получены обнадеживающие результаты, однако, конкретные данные по многим ключевым вопросам отсутствуют. Кроме того, даже по имеющейся информации можно судить о наличии многих трудностей на пути создания таких систем, среди них:

– аппаратные ограничения, возникающие в сетях передачи данных, не

позволяют пользователям РСВР получать согласованные виды виртуальной реальности, в результате чего сложно гарантировать непротиворечивость и одновременность протекающих в ней процессов для всех пользователей;

- применяемые для преодоления аппаратных ограничений методы все еще далеки от совершенства и в большинстве своем не предоставляют средств для динамической балансировки загрузки сети;

- фактически отсутствует общий архитектурный подход к созданию РСВР (о чем также косвенно свидетельствует отсутствие в литературе единой терминологии применительно к РСВР).

Для преодоления этих и других трудностей, возникающих при построении РСВР, в данной работе осуществляется разработка и обоснование механизмов обеспечения согласованности данных, направленных на уменьшение влияния сетевых аппаратных ограничений и повышение качества взаимодействия пользователей.

Объектом исследования данной работы являются распределенные системы виртуальной реальности, представляющие собой территориально распределенные программно-аппаратные комплексы, позволяющие множеству удаленных пользователей погружаться в единую для них виртуальную реальность и осуществлять в ней взаимодействие в реальном времени.

Предмет исследования: сетевые механизмы обеспечения согласованности данных в распределенных системах виртуальной реальности.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и обосновании сетевых механизмов обеспечения согласованности данных в распределенных системах виртуальной реальности, позволяющих при использовании современных вычислительных средств снизить общую нагрузку на сеть за счет использования гибких способов управления сетевым трафиком.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- анализ существующих РСВР, выявление основных их типов и архитектурных особенностей;

- формализация распределенных вычислений в РСВР, разработка подходов к определению понятия согласованности в РСВР и её оценке, выделение факторов, влияющих на согласованность;

- анализ базовых технологических принципов построения и разработка общей архитектуры РСВР;

- разработка высокоуровневого протокола взаимодействия процессов и других механизмов обеспечения согласованности данных в РСВР;

- разработка экспериментальной версии программного обеспечения промежуточного уровня, позволяющего создавать РСВР под конкретные области применения, на её основе — программной реализации опытной версии РСВР;

- проведение экспериментальных исследований по оценке эффективности разработанных механизмов на основе разработанной реализации РСВР;

- определение области применения разработанных средств и внедрение полученных результатов.

Методы исследования. Системный анализ, теория множеств, элементы теории графов, теория распределенных систем, теория объектно-ориентированного программирования и натурный эксперимент.

Научная повизна работы. Новыми являются следующие полученные в диссертации результаты:

1) формализован процесс распределенных вычислений в РСВР с использованием событийного подхода, что позволило подойти к формальному определению понятия согласованности в таких системах;

2) предложены два возможных подхода к определению понятия согласованности: модели наблюдательной и видовой согласованности, последний подход позволяет оценить согласованность численно, на основе введенных оценок;

3) обоснованы и разработаны сетевые механизмы обеспечения согласованности данных в РСВР, в их числе:

– высокоуровневый протокол межпроцессного взаимодействия *DVRP* со встроенными механизмами управления репликацией данных на основе принципа «избирательной согласованности»;

– адаптивный метод репликации и предсказания состояний объектов, учитывающий динамику их движения;

– механизм управления совместным доступом многих пользователей к состоянию виртуальной среды;

– метод синхронизации часов процессов РСВР;

4) разработана общая архитектура РСВР для случая взаимодействия по схеме клиент-сервер, позволяющая применить созданные механизмы обеспечения согласованности.

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем:

1) экспериментально подтверждена возможность создания РСВР и определенных вероятные области её применения, в их числе: образование и наука, тренажерные комплексы и другие области, требующие удаленного взаимодействия многих участников (пример — территориально-распределенные ситуационные центры);

2) на базе предложенных механизмов обеспечения согласованности разработана экспериментальная программная библиотека *TerraNet*, представляющая собой ПО промежуточного уровня (*middleware*), которая позволяет создавать РСВР для конкретных областей применения, с возможностью их гибкой настройки. В частности, на её основе на кафедре ВМСиС МЭИ (ТУ) была разработана программная среда для модельного воспроизведения группового пилотажа летательных аппаратов над местностью;

3) предложенные в работе сетевые механизмы нашли применение в опытных версиях комплексных авиационных тренажеров, разрабатываемых ЗАО «Транзас» и ОАО «ОКБ Сухого»;

4) полученные в диссертационном исследовании результаты были использованы на кафедре ВМСиС МЭИ (ТУ) при выполнении госбюджетной НИР (гос. рег. № 01200605949), а также при подготовке курса лекций и лабораторных работ по дисциплине «Компьютерные технологии в науке и образовании»;

5) исследования, проводимые по теме диссертации, поддержаны программой Рособразования «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/6718), федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Государственный контракт

П2227), а также грантом НШ-7239.2010.9 Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- Третья Европейская научно-технической конференция по аэрокосмическим наукам EUCASS-2009 (грант РФФИ 09-07-09229-моб_з). Место проведения: Версаль, Франция. Организаторы: EUCASS и ASTech Paris Region при поддержке Французского национального центра научных исследований (CNRS). 6–9 июля 2009 г.

- Третья Всероссийская научно-техническая конференция «Методы и средства обработки информации». Место проведения: Москва. Организатор: МГУ им. М. В. Ломоносова. 6–8 октября 2009 г.

- Международная конференция по проблемам надежности вычислительных систем DerCoS-RELCOMEX. Место проведения: Польша. Организатор: Вроцлавский Технологический университет при поддержке Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). 2007, 2008, 2009 гг.

- Международная конференция «Параллельные вычисления и проблемы управления» PACO. Место проведения: Москва. Организатор: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2006, 2008 гг.

- Международная научно-техническая конференция «Информационные средства и технологии». Место проведения: Москва. Организатор: МЭИ (ТУ) и МГТУ «СТАНКИН». 2005, 2006, 2007 гг.

- Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Место проведения: Москва. Организатор: МЭИ (ТУ). 2006, 2007, 2008 гг.

Публикации. Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, опубликованы в 13 печатных работах (4 из них — на английском языке), включая 1 работу в издании, рекомендуемом ВАК.

Структура диссертации. Основная часть диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения и содержит 157 страниц машинописного текста, 51 рисунок и 3 таблицы. Список литературы включает 71 наименование. Дополнительная часть содержит 4 приложения. Общий объем диссертации — 187 страниц машинописного текста (51 рисунок, 8 таблиц).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследуемой проблемы, формулируется цель и обозначаются задачи диссертационной работы, определяется область исследований, приводятся полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность и возможные области применения, описывается структура диссертации.

В первой главе уточняются представления о РСВР, формулируются основные предъявляемые к ним требования, приводится обзор и сравнительный анализ существующих решений и производится постановка задачи диссертационного исследования.

В упрощенном виде РСВР можно представить как множество компьюте-

шагающее максимально допустимое время отклика. Поэтому в РСВР необходимо искать компромисс между согласованностью и чувствительностью.

В работе решается задача обеспечения согласованности данных при сохранении требуемого уровня чувствительности, который принимается равным 1/60 секунды, что является современным стандартом, предъявляемым к интерактивным приложениям трехмерной графики.

При сравнении РСВР с классическими распределенными системами, наряду с общими свойствами, такими как *асинхронность вычислений, отсутствие общей для всех процессов памяти, географическая удаленность и неоднородность вычислительных узлов*, можно выделить характерные особенности РСВР:

- *вычисления производятся в реальном времени* — это предъявляет особые требования к вычислительным узлам, которые должны успевать обрабатывать большие объемы информации за малое время, и к каналам связи, которые должны обеспечивать своевременный доступ к наиболее актуальному состоянию виртуальной среды;

- *вычисления носят специфический и итеративный характер* — большая их часть сводится к непрерывному расчету глобального состояния виртуальной среды, которое постоянно меняется, причем не только в ответ на действия пользователей, но и с течением времени;

- *необходимость временной синхронизации процессов* — хотя в системе нет глобальных часов, каждый из процессов имеет свои локальные часы, отсчитывающие модельное время, и эти часы должны быть синхронизированы между собой.

В ходе рассмотрения существующих решений в области создания РСВР выявлены три основных их типа, определяемых соответствующими областями применения: *тренажерные РСВР, сетевые виртуальные среды и многопользовательские сетевые компьютерные игры*. Для каждого типа систем рассмотрены примеры наиболее известных и успешных разработок, среди них — такие как *HLA, DIS, NPSNET, DIVE, Half-Life 2: Source*, проведен их сравнительный анализ. Из анализа рассмотренных РСВР видно, что:

- почти все системы разработаны за рубежом, информация по многим ключевым вопросам, связанным с обеспечением согласованности данных отсутствует;

- ни одна система не предоставляет реализации высокоуровневого сетевого протокола для работы с виртуальной средой;

- большинство систем не имеют встроенных механизмов управления репликацией данных;

- почти все системы ориентированы под конкретные области применения и задачи: *отсутствует общий подход и инструментарий для построения РСВР*.

Основной вывод: в настоящее время многие вопросы построения РСВР все еще остаются открытыми и требуют дальнейших исследований. И главным из них является вопрос *обеспечения согласованности данных в РСВР при одновременном поддержании заданной чувствительности системы*.

Во второй главе рассматривается главная задача, решаемая при построении РСВР — задача обеспечения согласованности реплик данных на процессах системы, производится формализация распределенных вычислений на основе

событийной модели обмена сообщениями с учетом специфики РСВР, предлагаются различные подходы к определению понятия согласованности, выявляются основные влияющие на неё факторы и ограничения, производится анализ подходов к их преодолению.

Начало главы посвящено формализации процесса распределенных вычислений в РСВР. Предлагаемая модель является расширением событийной модели распределенных вычислений, применяемой для описания вычислений в классических распределенных системах.

В соответствии с моделью, РСВР рассматривается как множество самостоятельных процессов $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, взаимодействующих между собой по сети (множество P также принято называть *распределенной программой*) на основе обмена сообщениями. Через m_{ij} обозначим сообщение, посылаемое процессом p_i процессу p_j , $m_{ij} \in M$, где M — множество всех сообщений, переданных в системе за время её работы. Выполнение каждого процесса распределенной программы можно представить в виде последовательности действий, моделируемых как три типа *событий*: внутренние события, события отправки данных (*send*) и события приема данных (*recv*). Обозначим через e_i^l l -ое событие в i -ом процессе. Примерами событий в РСВР являются различные действия пользователей, такие как создание объектов виртуальной среды, изменение их состояний и т.п.

Определение 1. *Локальная история h_i процесса p_i во время вычислений есть последовательность событий $h_i = e_i^1 e_i^2 e_i^3 \dots$*

Определение 2. *Глобальная история вычисления представляет собой множество $H = h_1 \cup \dots \cup h_n$, включающее произошедшие во всех n процессах события.*

В асинхронных распределенных системах, где отсутствуют глобальные часы, события могут быть упорядочены только на основе их причинно-следственных связей. Определим над множеством H бинарное *отношение причинности* « \rightarrow », такое, что:

$$\forall e_i^k, \forall e_j^l \in H, e_i^k \rightarrow e_j^l \Leftrightarrow \begin{cases} (i = j) \wedge (k < l), \text{ или} \\ e_i^k = \text{send}_i(m) \wedge e_j^l = \text{recv}_j(m), \text{ или} \\ \exists e_k^m \in H : e_i^k \rightarrow e_k^m \wedge e_k^m \rightarrow e_j^l \end{cases} \quad (1)$$

Формально распределенное вычисление можно представить как частично упорядоченное множество, заданное парой (H, \rightarrow) . На рисунке 2 приведен пример временной диаграммы распределенных вычислений в РСВР для трех процессов.

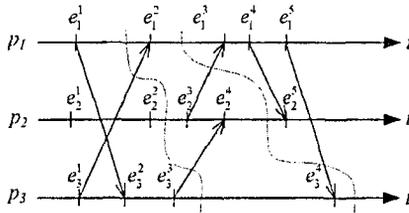


Рисунок 2 – Пространственно-временная диаграмма распределенных вычислений. p_1, p_2, p_3 — процессы распределенной системы, e_i^l — l -ое событие на i -ом процессе.

Определение 3. *Глобальное состояние* РСВР есть множество локальных состояний всех её процессов: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$. При этом под *локальным состоянием* S_i процесса p_i будем понимать значения внутренних переменных процесса, а также последовательности сообщений, находящихся в каналах связи, связанных с процессом.

Определение 4. *Виртуальная среда* VE есть совокупность виртуальных объектов: $VE = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$, где O_i — объект виртуальной среды.

В рамках виртуальной среды небосвод, ландшафт, водные поверхности, транспорт, наземные сооружения — все это объекты, либо их совокупности.

Так как в РСВР распределенные вычисления ориентированы на моделирование и отображение некоторой виртуальной среды VE , то глобальное состояние РСВР должно отражать и хранить её состояние.

Определение 5. *Глобальное состояние виртуальной среды* S_{VE} есть совокупность состояний виртуальных объектов с заданными наборами атрибутов:

$$\bar{S}_{VE} = \{\bar{S}_{O_1}, \bar{S}_{O_2}, \dots, \bar{S}_{O_m}\}, \bar{S}_{VE} \subseteq \bar{S} \quad (2)$$

$$S_{O_j} = \{a_1^{O_j}, a_2^{O_j}, \dots, a_{n_j}^{O_j}\}, j = \{1, \dots, m\}, \quad (3)$$

где $S_{O_1}, S_{O_2}, \dots, S_{O_m}$ — состояния объектов O_1, O_2, \dots, O_m , соответственно; $a_1^{O_j}, a_2^{O_j}, \dots, a_{n_j}^{O_j}$ — атрибуты, n_j — число атрибутов состояния объекта O_j .

Рассмотрим теперь, как осуществляется хранение состояния виртуальной среды на процессах РСВР. Для этого введем понятие *реплики состояния объекта*.

Определение 6. *Реплика* $R_{O_k}^i$ *состояния объекта* O_k есть копия его состояния S_{O_k} , хранящаяся на процессе p_i , причем $R_{O_k}^i \subseteq S_i$.

Будем говорить, что процесс *реплицирует* объект, если реплика данного объекта существует в локальной памяти процесса. Реплика называется *активной*, если процесс, на котором она хранится, транслирует изменения в состоянии соответствующего объекта другим процессам. В противном случае, реплика называется *пассивной*.

При рассмотрении распределенных вычислений и обменов данными в РСВР один из важнейших теоретических вопросов — что понимать под согласованностью и как её можно формализовать. В настоящее время отсутствует единый подход к определению понятия согласованности. В основном применяются подходы из теории классических распределенных систем, такие, например, как модель причинно-следственной согласованности. В работе предложены следующие два подхода к определению понятия согласованности — модели *наблюдательной* и *видовой согласованности*.

Модель наблюдательной согласованности основана на понятии *наблюдения*.

Определение 7. *Наблюдением* W_i за распределенным вычислением назовем упорядоченную последовательность событий, которая поступает в ходе работы распределенной системы на вход некоторого *процесса-монитора* p_m — особого типа процесса, способного записывать историю вычислений.

Для обеспечения наблюдательной согласованности необходимо, чтобы последовательности событий, соответствующие наблюдениям W_1, W_2, \dots, W_n производимым на сторонах процессов-мониторов p_1, p_2, \dots, p_n были идентичны

друг другу и согласованы с историей вычислений H .

В работе предлагается критерий выполнения наблюдательной согласованности (см. рисунок 3). Пусть $H_{Send} \subseteq H$ — подмножество глобальной истории, включающее все события отправки данных. Пусть e_i — событие отправки некоторого сообщения m с процесса p_i , т.е. $e_i = send(m)$. Обозначим момент времени отправки сообщения m как $t(e_i)$, а время, затраченное на передачу сообщения m , как $t_L(m) = t(recv(m)) - t(send(m))$. Тогда, для обеспечения наблюдательной согласованности, необходимо выполнение следующего условия:

$$T_{Send}^{\min} > t_{L\max}, \quad (4)$$

где $T_{Send}^{\min} = \min(t(e_i) - t(e_j), \forall e_i, e_j \in H_{Send}, i \neq j)$ — минимальное время (период) между последовательными посылками данных в системе,

$t_{L\max} = \max(t_L(m), \forall m \in M)$ — максимальная латентность при передаче сообщений в системе.

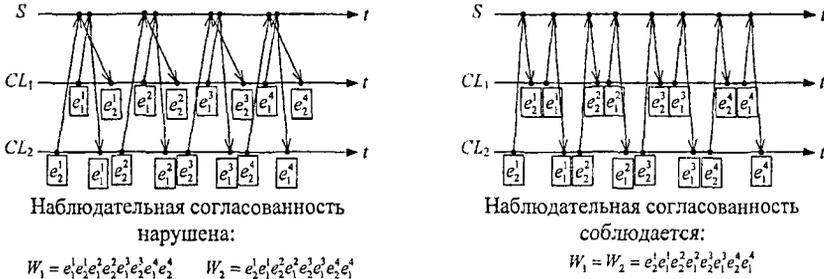


Рисунок 3 – Примеры нарушения и соблюдения условия наблюдательной согласованности.

S — серверный процесс, CL_1, CL_2 — клиентские процессы

Модель видовой согласованности основана на оценке степени соответствия друг другу локальных копий состояния (реplik) виртуальной среды на процессах РСВР, с учетом особенностей конкретной РСВР и восприятия пользователя. Для характеристики состояния виртуальной среды используется понятие *вид*.

Определение 8. Вид виртуальной среды V_{p_i} , наблюдаемый на некотором процессе p_i , есть совокупность релик R^i состояний объектов виртуальной среды VE , хранящихся на этом процессе:

$$V_{p_i} = \bigcup_{\forall R_{O_k}^i \subseteq S_i} R_{O_k}^i. \quad (5)$$

Пусть событие e_j^i на некотором процессе p_j возникает в некоторый момент времени t_k , тогда будем называть $S_j^i(t_k) = S_j^i$ локальным состоянием этого процесса в момент времени t_k . Глобальное состояние системы в некий произвольный момент времени t есть множество $S(t) = \{S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)\}$.

Определение 9. РСВР является *видово согласованной* в момент времени t , если виды на всех её процессах идентичны друг другу в момент времени t :

$$\forall p_i, p_j \in P, i \neq j: V_{p_i}(t) = V_{p_j}(t) \quad (6)$$

Видовая согласованность подразумевает введение метрики, позволяющей непосредственно измерить разницу между репликами состояний объектов. Поскольку наиболее значимыми атрибутами объекта в виртуальной среде являются его пространственные характеристики (положение, скорость, ускорение, ориентация), то большая часть метрик ориентирована именно на них. В работе предлагаются две метрики видовой согласованности: *средняя ошибка в определении расстояния между двумя объектами ξ* и *средняя ошибка в определении изменения ускорения объекта γ* . Рассмотрим выражение для первой метрики.

Обозначим расстояние между объектами O_A и O_B в некоторый момент времени t_i на стороне пользователя U_A , как $\Delta s_{(A)}(t_i)$, а на стороне пользователя U_B , как $\Delta s_{(B)}(t_i)$, тогда

$$\xi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta s_{(A)}(t_i) - \Delta s_{(B)}(t_i)|, \quad (7)$$

где $|\Delta s_{(A)}(t_i) - \Delta s_{(B)}(t_i)|$ — ошибка в определении расстояния между объектами O_A и O_B в момент времени t_i , n — общее число проведенных измерений для заданных траекторий движения объектов O_A и O_B . Ошибка ξ может измеряться как в абсолютных единицах измерения (в метрах), так и в относительных (как это делается в работе) — например, в корпусах объектов, — такие единицы измерения являются инвариантными по отношению к длине самого объекта.

Как известно из теории классических распределенных систем, основным способом поддержания согласованности данных является *репликация* — механизм синхронизации содержимого нескольких копий объекта (например, содержимого базы данных), под которым понимается копирование данных из одного источника на множество других и наоборот. То, как быстро осуществляется репликация, напрямую влияет на согласованность данных в системе.

Одним из главных препятствий на пути обеспечения высокой согласованности в РСВР являются аппаратные ограничения, налагаемые линиями связи и конечным оборудованием узлов пользователей: латентность и пропускная способность каналов передачи данных, джиттер (колебание латентности), вычислительная мощность узла. Эти ограничения приводят к увеличению времени доставки данных, а также к росту времени их обработки.

Время репликации, связанное с передачей и обработкой одного сообщения с данными, может быть выражено как сумма трех составляющих:

$$t_{total} = \sum_{i=1}^N t_p^i + \sum_{i=1}^{N-1} \Delta t_i^{i+1} + V \left(\sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{B_i^{i+1}} \right), \quad (8)$$

где N — число узлов, участвующих в передаче данных, включая узел-источник и узел-получатель данных; V — размер сообщения в байтах; t_p^i — время обработки сообщения на i -ом узле (в секундах); Δt_i^{i+1} — время передачи первого бита информации между узлами i и $i+1$ (сетевая латентность — в секундах); B_i^{i+1} — пропускная способность канала между узлами i и $i+1$ (байт/с).

Из выражения (8) следует, что основной способ ослабления влияния сетевых ограничений при невозможности совершенствования аппаратных средств

— сокращение объемов передаваемых данных (уменьшение V) при одновременном совершенствовании архитектуры программного обеспечения на узлах (уменьшение t_p^1). На этом принципе основано большинство применяемых в настоящее время подходов повышения согласованности, среди них:

- 1) оптимизация протокола взаимодействия пользователей;
- 2) предсказание состояний объектов (англ. название *dead reckoning*);
- 3) фильтрация данных в соответствии с их значимостью (англ. названия: *relevance filtering, interest management*);
- 4) динамическое распределение состояния виртуальной среды между несколькими серверами.

Рассмотренные во второй главе вопросы обеспечения согласованности данных позволяют перейти к непосредственной разработке соответствующих сетевых механизмов и архитектуры РСВР.

Третья глава посвящена разработке архитектуры РСВР, а также созданию и обоснованию сетевых механизмов, обеспечивающих согласованность данных в РСВР.

Процесс построения распределенной виртуальной среды будем рассматривать на трех уровнях абстракции: *аппаратном, программном и пользовательском*. Такой подход позволяет разделить процесс разработки на несколько отдельных этапов, как то: разработка аппаратной составляющей, разработка программного обеспечения и, наконец, разработка интерфейса пользователя. Причем пользовательский уровень абстракции является целевым в данной иерархии, поскольку сама по себе виртуальная реальность, в конечном итоге, формируется в сознании пользователя.

В процессе анализа существующих систем выявлено, что при разработке РСВР необходимо принимать во внимание следующие архитектурные принципы:

— *архитектуру взаимодействия процессов* — определяет топологию взаимодействия процессов между собой; основные типы: *одноранговая, клиент-серверная, мультисерверная*;

— *способ рассылки данных* — определяет, как происходит передача данных между несколькими процессами; основные типы рассылок: *однонаправленная, групповая, широковещательная*;

— *модель управления данными* — определяет способ хранения данных, доступа к ним, и обмена ими между процессами; основные модели: *централизованная, реплицируемая, распределенная*; в работе введена *гибридная модель управления данными*, сочетающая в себе свойства трех основных моделей и позволяющая повысить масштабируемость РСВР;

— *формат внутреннего представления состояния виртуальной среды* — в качестве такого формата в работе предложена иерархическая структура данных, распределяемая между процессами РСВР — *распределенный граф сцены*.

С применением сформулированных принципов в диссертации разработана общая архитектура программного обеспечения РСВР для случая взаимодействия по схеме клиент-сервер (см. рисунок 4).

Основу предлагаемой архитектуры составляет *блок обеспечения согласованности*, объединяющий различные разработанные механизмы обеспечения

согласованности в РСВР:

М1. *высокоуровневый протокол межпроцессного взаимодействия DVRP (Distributed Virtual Reality Protocol)*, позволяющий организовать взаимодействие между процессами РСВР на более высоком логическом уровне (см. рисунок 5), при меньшей загрузке сети за счет поддержки сообщений переменной длины и встроенных механизмов управления репликацией данных на основе *принципа «избирательной согласованности»*;

М2. *адаптивный метод репликации и предсказания состояния объекта*, позволяющий за счет учета динамики движения объекта уменьшить нагрузку на сеть при сохранении требуемой точности расчета состояний объектов (см. рисунок 6);

М3. *механизм управления совместным доступом к состоянию виртуальной среды*, позволяющий корректно обрабатывать одновременные обращения нескольких процессов к одному объекту и разрешать связанные с этим ситуации нарушения согласованности;

М4. *метод синхронизации часов* процессов РСВР, основанный на алгоритме Кристиана и позволяющий достигнуть большей точности синхронизации процессов, за счет учета статистики изменения латентности при коррекции показаний часов.

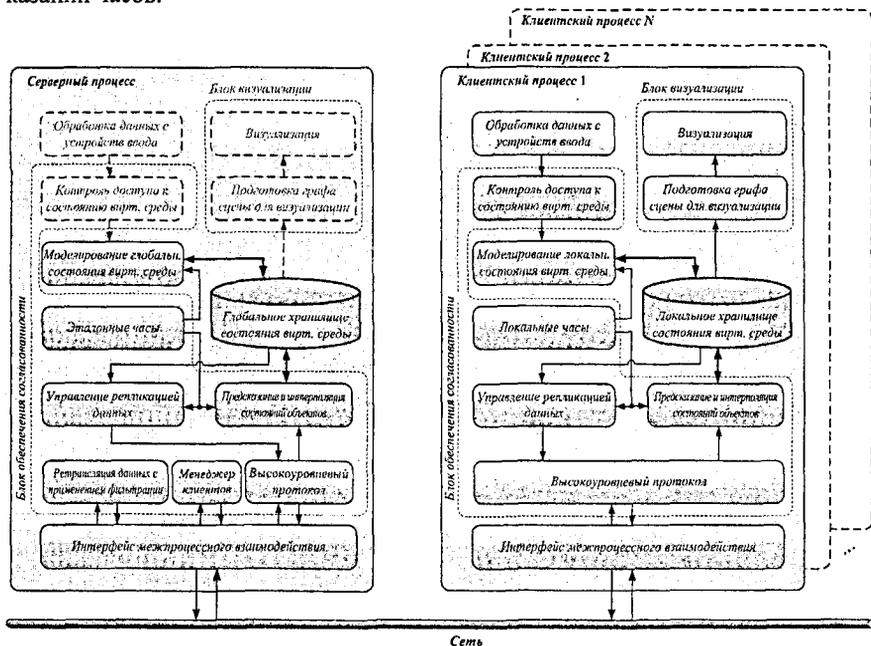


Рисунок 4 – Предлагаемая программная архитектура РСВР

Разработанные в третьей главе общая архитектура РСВР и механизмы обеспечения согласованности сделали возможным разработку программного обеспечения промежуточного уровня (*middleware*) для создания РСВР.

В четвертой главе рассматриваются подробности реализации созданного на базе разработанных архитектуры и механизмов программного обеспечения

промежуточного уровня для построения РСВР — библиотеки *TerraNet*, после чего на основе созданного программного инструментария и предложенной методики производится оценка эффективности разработанных средств.

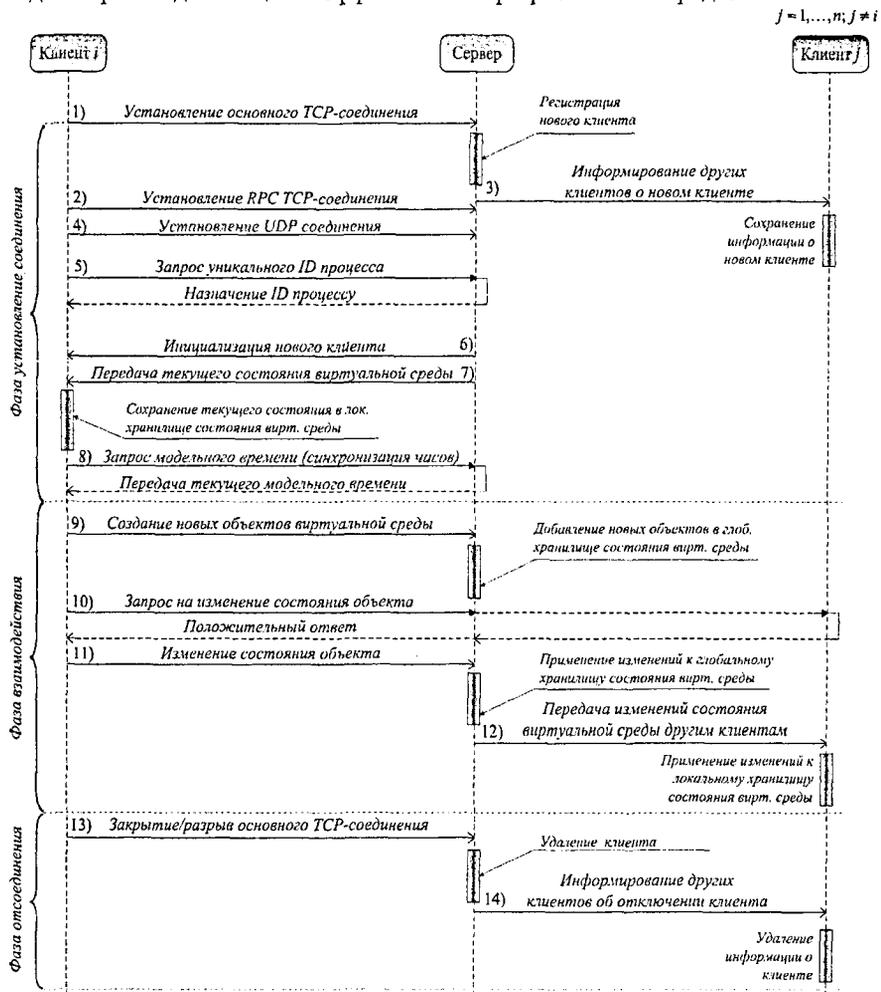


Рисунок 5 — Основные фазы взаимодействия процессов по протоколу *DVRP*

Основной целью при разработке библиотеки *TerraNet* было создать мощный инструмент, предоставляющий разработчику возможность взаимодействия с РСВР на пользовательском уровне абстракции, т. е. на уровне отдельных объектов виртуальной среды, при этом скрыв от него все низкоуровневые сетевые механизмы. Интерфейс библиотеки практически полностью лишен сетевых функций, а включает лишь прототипы основных сущностей, из которых, как из конструктора, можно синтезировать требуемую конфигурацию виртуального мира.

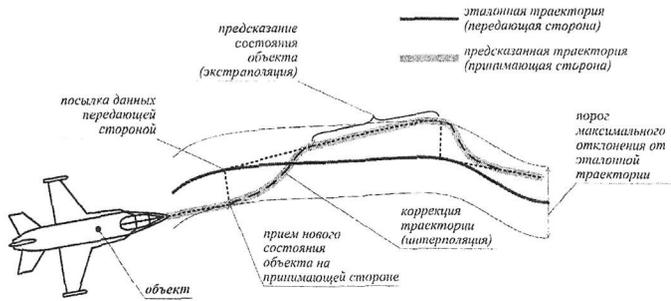


Рисунок 6 – Иллюстрация работы адаптивного метода репликации и предсказания состояния объекта

В состав библиотеки (см. рисунок 7) входит несколько модулей, реализованных в виде динамически связываемых библиотек (*Dynamic Link Library, DLL*), каждый модуль реализует один или несколько блоков архитектуры, представленной на рисунке 4:

- *terranet_core.dll* — ядро библиотеки, включающее в себя весь функционал, необходимый для развертывания сетевой инфраструктуры РСВР (реализует блок обеспечения согласованности);
- *terranet_osg.dll* — графическая компонента, включающая встроенную оконную систему и систему визуализации на основе графа сцены (реализует блок визуализации и блок обработки данных с устройств ввода);
- *network.dll* — компонента, реализующая базовые сетевые функции, необходимые для функционирования ядра (обеспечивает интерфейс межпроцессного взаимодействия).

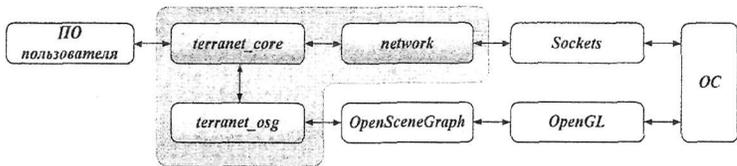


Рисунок 7 – Структура библиотеки TerraNet и взаимосвязь её модулей между собой, приложением пользователя и компонентами операционной системы

На базе библиотеки TerraNet было разработано несколько экспериментальных версий РСВР:

- программный комплекс *FFSystem (Formation Flight System)*, обеспечивающий модельное воспроизведение группового пилотажа нескольких летательных аппаратов над местностью (см. рисунок 8).
- система распределенного моделирования виртуальных трехмерных сцен *ShareEdit*, позволяющая нескольким пользователям производить совместное геометрическое моделирование произвольных трехмерных сцен в реальном времени.

В диссертационном исследовании предложена методика качественной оценки разработанных сетевых механизмов, позволяющая установить взаимосвязь между согласованностью состояний объектов (рассчитываемой на основе введенных метрик) на процессах РСВР и количеством потребляемых сетевых ресурсов.

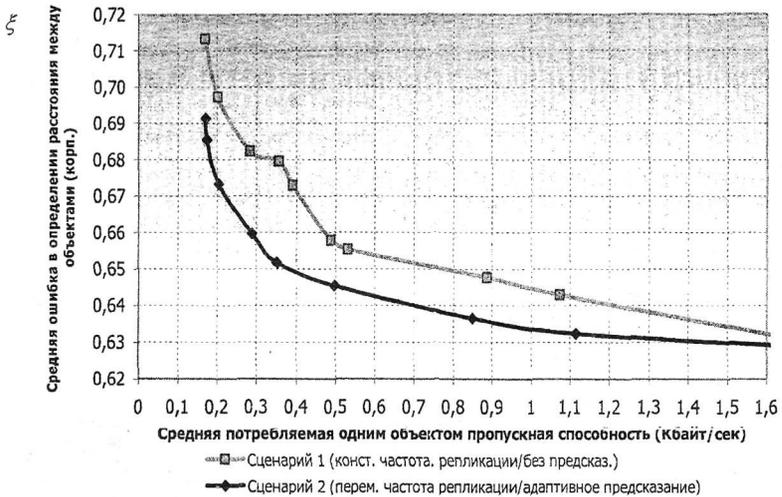


Рисунок 9 – Графики зависимости метрики ξ от значений средней потребляемой одним объектом пропускной способности для двух сценариев экспериментов

Полученные в данной работе результаты нашли отражение в курсе лекций и лабораторных работ по дисциплине «Компьютерные технологии в науке и образовании». В ходе лекционных занятий студенты изучили архитектурные принципы построения РСВР, узнали о проблеме согласованности и способах её поддержания в таких системах. Использование библиотеки *TerraNet* и системы распределенного моделирования виртуальных трехмерных сцен *ShareEdit* в лабораторных работах позволило познакомить студентов с процессом проектирования виртуальных миров и продемонстрировать им идею совместной работы в рамках единой виртуальной среды.

В заключении диссертации приводятся основные теоретические и практические результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Формализован процесс распределенных вычислений в РСВР с применением событийной модели обмена сообщениями. Предложены подходы к определению понятия согласованности на основе моделей наблюдательной и видовой согласованности, учитывающие особенности РСВР. Введены метрики для оценки видовой согласованности, позволяющие непосредственно измерить разницу между репликами состояний виртуальной среды на процессах системы.

2) Разработана общая архитектура РСВР для случая взаимодействия по схеме клиент-сервер. В рамках данной архитектуры обоснованы и разработаны следующие механизмы обеспечения согласованности данных в РСВР:

М1. *высокоуровневый протокол межпроцессного взаимодействия DVRR*, позволяющий организовать взаимодействие между процессами РСВР на более высоком логическом уровне, при меньшей загрузке сети за счет поддержки сообщений переменной длины и встроенных механизмов управления репликаци-

ей данных на основе принципа «избирательной согласованности»;

М2. адаптивный метод репликации и предсказания состояния объекта, позволяющий за счет учета динамики движения объекта уменьшить нагрузку на сеть при сохранении требуемой точности расчета состояний объектов;

М3. механизм управления совместным доступом к состоянию виртуальной среды, позволяющий корректно обрабатывать одновременные обращения нескольких процессов к одному объекту и разрешать связанные с этим ситуации нарушения согласованности;

М4. метод синхронизации часов процессов РСВР, основанный на алгоритме Кристиана, и позволяющий достигнуть большей точности синхронизации процессов, за счет учета статистики изменения латентности при коррекции показаний часов.

3) С применением разработанных архитектуры и сетевых механизмов обеспечения согласованности данных разработана программная библиотека *TerraNet*, представляющая собой программное обеспечение промежуточного уровня для построения РСВР.

4) Разработана методика качественной оценки разработанных сетевых механизмов, позволяющая установить взаимосвязь между согласованностью состояний объектов на различных процессах РСВР и количеством потребляемых сетевых ресурсов. С помощью созданной методики экспериментально подтверждена эффективность и обоснованность разработанных сетевых механизмов, произведено исследование возможностей масштабируемости вычислительной среды.

5) Разработанные средства доказали свою эффективность на практике в авиационных тренажерных комплексах, а также нашли применение в учебном процессе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Харитонов, В.Ю. Вычислительные аспекты построения распределенных систем виртуальной реальности / В.Ю. Харитонов, И.И. Дзегеленок, Д.А. Орлов // Вестник Московского Энергетического института, №5, 2008 г. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – С. 27–32.

2. Kharitonov, V.Y. A Software Architecture of Distributed Virtual Reality System for Formation Flight Visualization [Electronic resource] / V.Y. Kharitonov // Proceedings of 3rd European Conference for Aero-Space Sciences. Versailles, France. July 6–9th, 2009. – Electronic data. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – ISBN 978-2-930389-47-8.

3. Kharitonov, V.Y. A Consistency Model for Distributed Virtual Reality Systems / V.Y. Kharitonov // Proceedings of 4th International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX 2009. Brunow Palace, Poland. June 30 – July 2, 2009. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 2009. – P. 271–278.

4. Харитонов, В.Ю. Модели согласованности для распределенных систем виртуальной реальности / В.Ю. Харитонов // Труды третьей всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства обработки информации», Москва, 6–8 октября 2009 г., МГУ им. М. В. Ломоносова / Под ред. Л.Н. Королева. – М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ имени М.В. Ломо-

носова; МАКС Пресс, 2009. – С. 64–70.

5. **Kharitonov, V. Y.** An Approach to Consistent Displaying of Virtual Reality Moving Objects / V.Y. Kharitonov // Proceedings of 3rd International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX 2008. Szklarska Poręba, Poland. 25-29 June, 2008. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 2008. – P. 390–397.

6. **Харитонов, В.Ю.** Подход к организации распределенных вычислений для согласованной визуализации движущихся объектов под управлением удаленных пользователей / В.Ю. Харитонов, И.И. Дзегеленок, Д.А. Орлов // Труды четвертой Международной конференции «Параллельные вычисления и проблемы управления» PACO'2008. Москва, 27-29 октября 2008 г. — М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. – С. 867–883.

7. **Харитонов, В.Ю.** Технология согласованного сетевого взаимодействия удаленных пользователей виртуальной реальности / В.Ю. Харитонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Четырнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – Т.1. – С. 347–349.

8. **Kharitonov, V. Y.** Methods of efficiency enhancement of network interaction in distributed systems of virtual reality / V.Y. Kharitonov // Proceedings of 2nd International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX 2007. Szklarska Poręba, Poland. 14-16 June, 2007. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 2007. – P. 305–308.

9. **Харитонов, В.Ю.** Исследование принципов согласованного сетевого взаимодействия в распределенных системах виртуальной реальности / В.Ю. Харитонов // Труды международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». 16-18 октября 2007 г., в 3-х т. – М.: МЭИ, 2007. – Т.2. – С. 214–217.

10. **Харитонов, В.Ю.** Особенности согласованного сетевого взаимодействия удаленных пользователей в распределенных системах виртуальной реальности / В.Ю. Харитонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тринадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – Т.1. – С. 423–424.

11. **Харитонов, В.Ю.** Проект распределенной системы воспроизведения группового полета над местностью / В.Ю. Харитонов, Д.А. Орлов // Труды III Международной конференции «Параллельные вычисления и проблемы управления» PACO'2006. Москва, 2-4 октября 2006 г. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. – С. 990–998.

12. **Харитонов, В.Ю.** Многопользовательская виртуальная среда для воспроизведения группового полета над местностью / В.Ю. Харитонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двенадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. – Т.1. С. 469–470.

13. **Харитонов, В.Ю.** Сетевая модель воспроизведения группового полета над местностью / В.Ю. Харитонов // Труды международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». 18-20 октября 2005 г., в 3-х т. – М.: Янус-К, 2005. – Т.3. – С. 138–141.

Подписано в печать 17.05.10 г. Зак. №9 Тир. 100 П.л. 1,25
 Полиграфический центр МЭИ(ТУ)
 Красноказарменная ул., д.13