

На правах рукописи

СИДОРОВ ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**Технология и инструментальные средства организации
распределенных пакетов прикладных программ**

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте динамики систем и теории управления Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Феоктистов Александр Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Легалов Александр Иванович

кандидат технических наук
Федоров Роман Константинович

Ведущая организация: **Вычислительный центр
ДВО РАН**
(г. Хабаровск)

Защита состоится 17 сентября 2009 г. в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.021.01 при Институте динамики систем и теории управления СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДСТУ СО РАН.

Автореферат разослан 14 августа 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.

А.А. Щеглова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные пакеты прикладных программ (ППП) представляют собой сложные программные комплексы, включающие следующие основные компоненты: функциональное (прикладное) наполнение, высокоуровневые языковые средства описания исследуемой предметной области, системное программное обеспечение (ПО) для организации процесса решения исследовательской задачи. Сочетание в ППП разнообразных сложных моделей, алгоритмов и методик их исследования базируется, как правило, на использовании принципа модульной организации функционального наполнения пакета. Модуль оформляется в виде программной единицы на языке программирования высокого уровня (например, в виде исполняемой программы или подпрограммы-функции), обеспечивающей решение отдельной задачи.

Интенсивное развитие сетевых технологий и аппаратных средств, наблюдаемое в последние годы, позволило многократно повысить производительность современных вычислительных систем и обеспечило возможность организации эффективных параллельных вычислений. Естественным образом возникла необходимость создания ППП, способных максимально использовать потенциал высокопроизводительных вычислительных систем.

В области распараллеливания вычислений имеется обширная библиография (см., например, работы В.Н. Абасова, С.М. Абрамова, О.Л. Бандман, В.В. Воеводина, Вл.В. Воеводина, И.Б. Задыхайло, В.Д. Корнеева, В.А. Крюкова, А.О. Лациса, А.И. Легалова, Г.А. Опарина, Т.П. Плакса, В.В. Топоркова, Д. Ивенса, Э. Гейтса, Н. Макдоналда, Д. Гелернтера, Г.Р. Эндрюса, Ф.Г. Энслоу и др.). Качественные требования к реализации процесса параллельной обработки данных в прикладных программах (например, необходимость обеспечения эффективности, масштабируемости, переносимости и т.д.) породили большое многообразие систем для организации параллельных вычислений. Такие системы, как правило, требуют от специалиста-предметника достаточно высокого уровня программистской квалификации и навыков разработки параллельных программ. В процессе проектирования и разработки параллельных программ специалисту-предметнику приходится следовать тем или иным технологиям и моделям параллельного программирования, а также учитывать архитектуру и особенности используемой вычислительной системы.

Поэтому одним из наиболее перспективных и актуальных направлений развития пакетной проблематики является создание инструментальных средств, обеспечивающих разработку и применение ППП для параллельных и распределенных вычислительных систем, в том числе для распределенных вычислительных сред (РВС)¹. Большинство известных на сегодняшний день инструмен-

¹ РВС рассматривается в традиционном понимании (см., например, работы В.Н. Коваленко, Д.А. Корягина и др.) как совокупность вычислительных узлов, объединенных коммуникационной сетью. Вычислительный узел представляет собой программно-аппаратный ресурс, включающий модуль оперативной памяти, один или несколько процессоров, жесткий диск, системное и прикладное программное обеспечение, поддерживающее функционирование узла в РВС. Один из вычислительных узлов назначается главным узлом и наделяется функциями управления заданиями пользователей и ресурсами РВС.

тальных систем не решают всех проблем, связанных с разработкой и применением таких прикладных программных комплексов.

Цель работы состоит в разработке технологии и реализации инструментальных средств, обеспечивающих автоматизацию построения распределенных пакетов прикладных программ (РППП) в разнородных РВС на основе методологии модульного программирования.

Основными задачами исследования являются:

1. Проведение анализа существующих методов и средств организации распределенных вычислений. Разработка технологии организации РППП в разнородных РВС.
2. Создание языковых средств описания предметной области РППП и процедурных постановок задач.
3. Разработка и реализация методов и средств управления процессом решения задач в РППП, основанных на механизмах обработки событий, возникающих при выполнении вычислений.
4. Разработка и реализация инструментальных средств организации системной части РППП, базирующейся на клиент-серверной архитектуре.

Объектом исследования являются теория и практика организации распределенных вычислений.

Предметом исследования являются методы и инструментальные средства создания РППП в разнородных РВС.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы системного и прикладного программирования, характерные для разработки инструментальных программных комплексов; методы объектно-ориентированного и модульного (сборочного) программирования; технологии построения РВС и разработки web-приложений.

Научная новизна. Разработан ИК DISCOMP и предложена технология, ориентированные (в отличие от известных) на автоматизацию разработки и применения РППП в разнородных РВС. Функциональное наполнение таких РППП может включать модули, реализованные на различных языках программирования, нетиражируемые программные комплексы, а также унаследованное ПО². ИК DISCOMP обеспечивает возможность создания как автономных РППП, так и интеграцию данного инструментария с другими программными комплексами для автоматизации этапа проведения распределенных вычислений при решении исследовательских задач. В РППП впервые реализован подход к организации динамического управления распределенными процессами решения взаимосвязанных задач на основе механизмов обработки событий и анализа текущих расчетных данных.

Практическая значимость. Разработанное ПО позволяет сократить сроки и повысить эффективность разработки и применения РППП. Созданные программные средства зарегистрированы в Федеральной службе по интеллекту-

² Под унаследованным ПО (legacy systems) понимаются программные системы или комплексы, не соответствующие современным требованиям, но до сих пор используемые ввиду значительных финансовых, организационных, технических и прочих затруднений, связанных с их заменой (см., например, работы Л.В. Массель и др.).

альной собственности, патентам и товарным знакам [15] и применяются для проведения экспериментальных расчетов по плановым научно-исследовательским работам в Институте динамики систем и теории управления (ИДСТУ) СО РАН, а также в учебном процессе в Институте математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета.

Разработка и применение рассматриваемых в диссертации программных средств выполнялись в рамках проекта СО РАН № 6 «Планирование и оптимизация схем решения задач в распределенной мультиагентной вычислительной среде» программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 21 «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID» (2004 г.); проекта СО РАН 3.2.6 «Интегрированные информационно-вычислительные и коммуникационные ресурсы: интеллектуальные методы организации, автоматизации разработки и применения» (2004-2006 гг.); проекта СО РАН «Разработка научных основ распределенной информационно-аналитической системы на основе ГИС и Веб-технологий для междисциплинарных исследований» междисциплинарной программы 4.5.2 (2007-2009 гг.); проекта РФФИ № 06-01-00340 «Разработка и исследование булевых моделей предметной области в задаче планирования при синтезе программ»; проекта РФФИ № 08-07-00163 «Технологии интеллектуального анализа данных и высокопроизводительных информационно-вычислительных ресурсов для поддержки междисциплинарных фундаментальных исследований в области геоэкологии и природопользования» (2008–2010 гг.); проекта № 3 «Концептуальные основы и программные средства разработки проблемно-ориентированных распределенных вычислительных сред» программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 1 «Проблемы создания национальной научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе развития GRID технологий и современных телекоммуникационных сетей» (2009-2011 гг.); проекта «Технология интеллектуальной обработки пространственно-распределенных данных и создания высокопроизводительных информационно-вычислительных ресурсов для поддержки междисциплинарных фундаментальных исследований» программы Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (2009-2011 гг.).

Достоверность и эффективность полученных в работе результатов подтверждается опытом успешной практической эксплуатации разработанного автором диссертации ИК DISCOMP в Суперкомпьютерном центре коллективного пользования ИДСТУ СО РАН при решении ряда ресурсоемких прикладных задач.

Апробация. Основные результаты работы были представлены на V и VIII Школах-семинарах молодых ученых «Математическое моделирование, управление и информационные технологии» (Иркутск, 2004 г., 2006 г.), на V Межрегиональной школе-семинаре «Распределенные и кластерные вычисления» (Красноярск, 2005 г.), на III Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО)» (Москва, 2006 г.), на XI и XII Байкальских всероссийских конференциях «Информационные и математические тех-

нологии в научных исследованиях» (Иркутск, 2006 г., 2007 г.), на II Всероссийской конференции с международным участием «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы» (Улан-Удэ, 2006 г.), на Международных научных конференциях «Параллельные вычислительные технологии (РАУТ)» (Челябинск, 2007 г.; Санкт-Петербург, 2008 г.), на конференции «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 2007 г.), на VIII Международном симпозиуме «Интеллектуальные системы» (Нижний Новгород, 2008 г.), на Всероссийской конференции «Винеровские чтения» (Иркутск, 2009 г.), на Всероссийской конференции «Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях» (Иркутск, 2009 г.), на семинарах ИДСТУ СО РАН.

Публикации. Результаты научных исследований Сидорова И.А. отражены в 15-ти научных работах [1-15], из которых статьи [1, 2] опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертации. В перечисленных публикациях все результаты, связанные с алгоритмизацией, программной реализацией и проведением вычислительных экспериментов в РВС, получены автором лично. Результаты по моделям и методам организации РППП получены совместно с Феоктистовым А.Г. и являются неделимыми. Из совместных работ с Васильевым С.Н., Опариным Г.А, Тятюшкиным А.И., Семеновым А.А., Богдановой В.Г. и Заикиным О.С. в диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат лично автору.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографии из 91-го наименования, глоссария и 7 приложений. Общий объем работы – 140 страниц, из которых 110 страниц основного текста, включающего 13 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведена структура работы.

В первой главе рассмотрены основные понятия, связанные с организацией РППП, формализовано описание предметной области РППП, разработаны языковые средства представления описания предметной области РППП в формате XML и сформулированы требования к инструментальному комплексу, предназначенному для создания и применения РППП в разнородных РВС.

РППП ориентируются на класс задач, характеризующихся следующими свойствами:

- решение задачи требует проведения расчетов на ЭВМ с использованием больших объемов вычислительных ресурсов (процессорного времени, оперативной памяти, дискового пространства и др.);
- возможна декомпозиция общей сложной задачи на более простые (с вычислительной точки зрения) подзадачи;

- процесс решения общей задачи подразумевает распределенное решение набора ее взаимосвязанных подзадач;
- не предполагается интенсивного взаимодействия между параллельными процессами решения подзадач;
- задача допускает декомпозицию данных на блоки и независимую параллельную обработку этих блоков;
- решение задачи выполняется, как правило, по одной слабо меняющейся синхронной схеме.

К такому классу относятся задачи, требующие проведения многовариантных расчетов, а также многие переборные задачи.

Ниже приведены характерные отличия среды функционирования, языковых средств, функционального наполнения и системной части РППП от соответствующих составляющих традиционных пакетов.

Среда функционирования. Средой функционирования РППП является РВС с разнородными вычислительными узлами, организованными на основе различных программно-аппаратных платформ и управляемыми разными ОС. Зачастую разнородные РВС имеют низкую степень отказоустойчивости.

Языковые средства. В качестве входного языка пакета используется расширяемый язык разметки XML. Требуются средства описания крупноблочного распределенного алгоритма решения задачи в РВС.

Функциональное наполнение РППП. В качестве модулей используются исполняемые в пакетном режиме программы, которые могут быть написаны на различных языках программирования (например, С, Fortran, Pascal и др.), функционировать под управлением различных ОС (например, MS Windows, Linux, Mac OS X и др.) и быть платформо-зависимыми. Модули размещаются в разных узлах РВС, в одном узле РВС может быть установлено несколько модулей. Допустимо включение в состав функционального наполнения унаследованного ПО, а также нетиражируемых программных комплексов, жестко привязанных к узлам РВС. Обмен данными между модулями осуществляется через файлы.

Системная часть. Требуется организация вычислений на основе удаленного запуска модулей и распределенного обмена данными. Необходим мониторинг узлов РВС.

Большинство инструментальных систем (например, OLYMPUS, ПРИЗ, САФРА, СПОРА и др.) разрабатывались, как правило, для создания традиционных ППП. Применение таких систем для построения РППП является затруднительным. Известные системы организации распределенных вычислений (например, кластерная система Condor, программный комплекс BOINC, инструментарий X-COM и др.) позволяют осуществить в РВС решение не связанных между собой задач, допускающих распараллеливание по данным, но не обладают всеми необходимыми возможностями для реализации перечисленных выше особенностей распределенного пакета взаимосвязанных прикладных программ. В этой связи возникает необходимость разработки инструментария для организации специализированного вида прикладных программных комплексов – РППП.

Свойства класса задач, характерного для РППП (в частности, решение задачи по одной слабо меняющейся схеме), обуславливают выбор процедурного способа постановок задач пакету. Эти же свойства в совокупности с особенностями функционального наполнения РППП (использование в качестве модулей программ, исполняемых в пакетном режиме и размещенных в разных узлах РВС) приводят к необходимости реализации процесса решения задачи по заданной синхронной схеме в режиме интерпретации.

Формализованное описание предметной области РППП относится к классу вычислительных моделей³ и представляет собой совокупность значимых параметров предметной области, а также модулей РППП, реализующих вычислительные операции с этими параметрами. В простейшем случае описание предметной области РППП⁴ можно определить в виде структуры $S = \langle Z, T, M, Y \rangle$, где Z – множество параметров, T – множество допустимых типов параметров, M – множество модулей, Y – множество узлов РВС, в которых размещен тот или иной модуль из M . Связи между элементами множеств Z , T , M и Y заданы отношениями $ZT \subset Z \times T$, $IN \subset Z \times M$, $OUT \subset Z \times M$ и $MU \subset M \times Y$ (в общем случае типа «многие-ко-многим»). Для каждого объекта структуры S (параметра, типа параметра, модуля и узла) определен набор его атрибутов. Множество T включает следующие типы параметров: тип *file*, используемый для описания параметров неопределенной структуры (блоков произвольного текста большого размера); тип *filelist*, предназначенный для поддержки распараллеливания по данным (параллельный список параметров типа *file*); тип *fileconst*, введенный с целью сокращения объемов передачи данных в РВС (значение параметра типа *fileconst* один раз передается узлу РВС и затем может неоднократно использоваться при запуске модулей, размещенных в данном узле). Содержательно модуль $m_i \in M$ реализует возможность вычисления множества параметров $OUT^i \subset Z$ по множеству параметров $IN^i \subset Z$, а множества IN^i и OUT^i называются соответственно множествами входных и выходных параметров для модуля m_i . Поэлементная обработка параметра z_j типа *filelist* модулем m_i выполняется следующим образом: k -й элемент параметра z_{jk} обрабатывается k -м экземпляром модуля m_{ik} . Описание предметной области РППП будем считать целостным, если выполняются следующие условия:

1. Условие наличия описания предметной области
 $(Z \neq \emptyset) \wedge (M \neq \emptyset)$.
2. Условие наличия входных и выходных параметров модулей
 $\forall m_i \in M (IN^i \neq \emptyset) \wedge (OUT^i \neq \emptyset)$.
3. Условие целостности отношений IN и OUT
 $\forall m_i \in M IN^i \cup OUT^i \subset Z$.

³ Тыгу Э.Х. Концептуальное программирование / Э.Х. Тыгу. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

⁴ Опарин Г.А. Булево моделирование планирования действий в распределенных вычислительных системах / Г.А. Опарин, А.П. Новопапин // Теория и системы управления. – 2004. – № 5. – С.105-108.

4. Условие отсутствия в модулях транзитных параметров

$$\forall m_i \in M \quad IN^i \cap OUT^i = \emptyset.$$

5. Условие избыточности множества параметров

$$\forall z_j \in Z \exists m_i \in M : z_j \in IN^i \cup OUT^i.$$

Постановка задачи для структуры S задается в процедурном виде и в общем случае формулируется следующим образом: «зная S выполнить Q », где $Q \subset M$ представляет собой частично упорядоченную последовательность модулей из M , которые необходимо выполнить для решения задачи. При установлении частичного порядка множество Q разбивается на k непустых подмножеств. Упорядочение подмножеств осуществляется в зависимости от того, модули какого подмножества должны быть выполнены раньше. В рамках каждого k -го подмножества входящие в него модули могут выполняться независимо друг от друга в любой последовательности или параллельно.

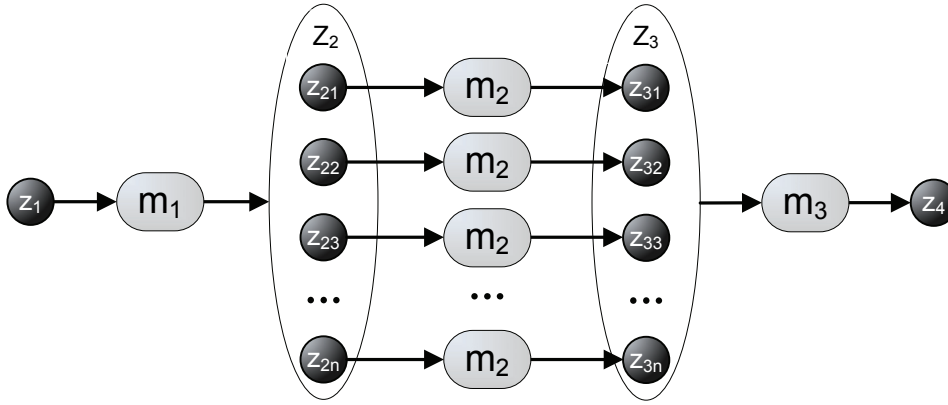
Схемой решения задачи (СРЗ) в ИК DISCOMP будем называть модель крупноблочной программы, отражающей информационно-логическую структуру вычислений в терминах предметной области. СРЗ строится в параллельно-ярусной форме из элементов следующих множеств:

- множества параметров Z ; множества модулей M ;
- множества событий E , возникающих в процессе выполнения СРЗ;
- множества функций F , предназначенных для управления процессом выполнения СРЗ;
- множества специальных операторов $O = \{\text{START, STOP, READ } \langle \text{список параметров} \rangle, \text{WRITE } \langle \text{список параметров} \rangle, \text{CALL } \langle \text{имя модуля} \rangle, \text{FORK, JOIN, TERMINATE } \langle \text{список модулей} \rangle\}$.

Информационно-логические связи между параметрами и модулями СРЗ представляются в виде структуры $H = \langle IN^h, Q, OUT^h \rangle$, где IN^h и OUT^h – множества входных и выходных параметров СРЗ, соответственно. Структура H изображается двудольным ориентированным информационным графом G_I , включающим два непересекающихся множества вершин (рис. 1): вершин-параметров и вершин-модулей. Вершины-параметры, как и вершины-модули, являются попарно несмежными. Частично упорядоченную последовательность модулей Q удобно задавать в виде булевой матрицы размерности $k \times n$, где k – число ярусов СРЗ, а n – число модулей в M . Элемент матрицы $q_{ij} = 1$ означает, что модуль m_j размещен на i -ом ярусе СРЗ.



а) параметры z_1, z_2, z_3 и z_4 типа *file*



б) параметры z_1 и z_4 типа *file*, параметры z_2 и z_3 типа *filelist*

Рис. 1. Примеры графа G_I

Построение СРЗ осуществляется в два этапа: 1) разработчик РППП формирует ярусы СРЗ, размещает на этих ярусах модули из M и определяет события из E , при возникновении которых необходимо выполнить те или иные управляющие функции из F ; 2) транслятор постановки задачи на основе информационно-логических связей между параметрами и модулями структуры S определяет множества входных и выходных параметров СРЗ и дополняет постановку задачи специальными операторами из O . СРЗ будем называть *допустимой*, если она удовлетворяет следующим условиям:

1. Условие процедурной постановки задачи

$$(Q \neq \emptyset) \wedge (IN^h \cup OUT^h = \emptyset).$$

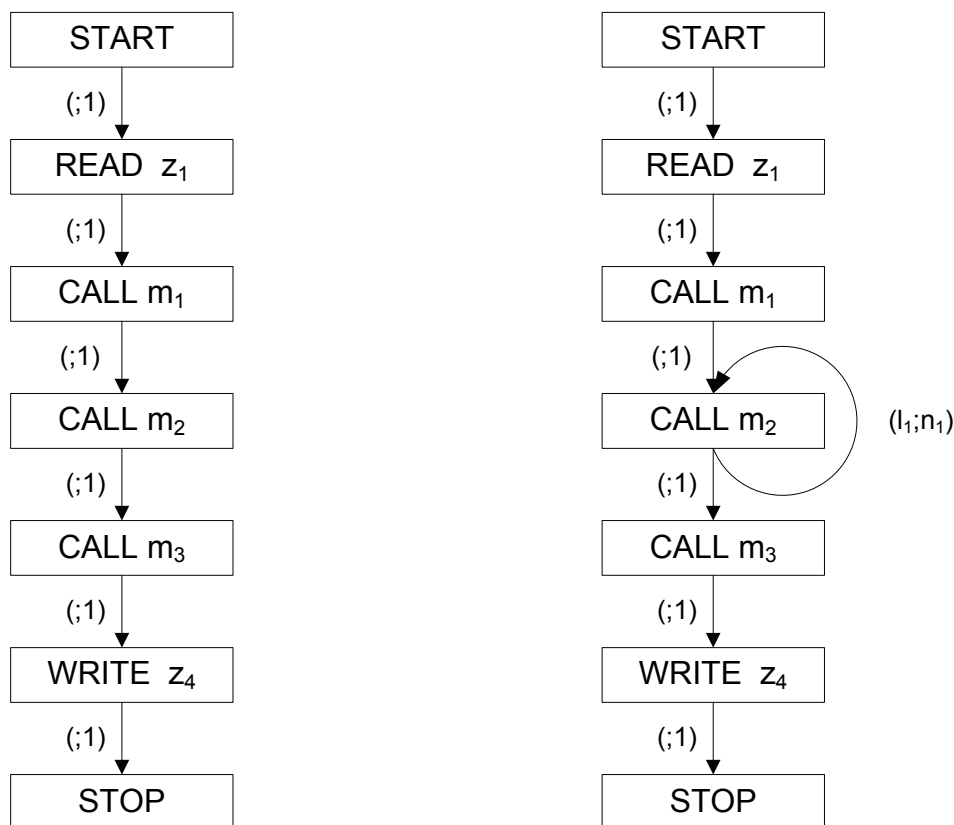
2. Условие допустимости включения модуль в СРЗ

$$\forall m_i \in Q : q_{pi} = 1 \quad IN^i \setminus (IN^h \cup (\bigcup_{j=1}^{p-1} \bigcup_{\substack{l=1 \\ \forall q_{jl}=1}}^n OUT^l)) = \emptyset.$$

3. Условие информационной независимости модулей, расположенных на одном и том же ярусе СРЗ

$$\forall m_i \in Q : q_{pi} = 1 \quad IN^i \cap (\bigcup_{\substack{j=1 \\ (\forall q_{pj}=1) \wedge (j \neq i)}}^n OUT^j) = \emptyset.$$

Управляющим графом СРЗ (рис. 2) будем называть упорядоченный ориентированный граф G_U , вершинами которого являются операторы вызова модулей из M (или их экземпляров), а также специальные операторы.



а) граф G_U соответствует графу G_I на рис. 1а

б) граф G_U соответствует графу G_I на рис. 1б

Рис. 2. Примеры графа G_U

Каждая дуга v_j графа G_U характеризуется парой величин $(l; c)$, где $l \in \{0, 1\}$ – это логический переключатель, определяющий возможность ($l=1$) или невозможность ($l=0$) перехода по дуге v_j , а c – ограничитель числа переходов по дуге v_j . Запись $(; c)$ для дуги v_j означает безусловный переход по данной дуге.

Выполнение СРЗ в режиме интерпретации представляет собой процесс последовательно-параллельного выполнения ее операторов в соответствии с порядком их вхождения в граф G_U . Передача данных (значений параметров) между модулями выполняется в соответствии с графом G_I . Выполнение СРЗ будем считать *корректным*, если оно завершается оператором $STOP$ за конечное число шагов.

Описание предметной области РППП и постановок задач в ИК DISCOMP представляются в формате, разработанном на основе расширяемого метаязыка XML. Функциональные и системные требования к инструментальному комплексу DISCOMP, предназначенному для создания и применения РППП в разнородных РВС, сформулированы на основе анализа известных методов и средств организации распределенных вычислений.

Во второй главе разработаны архитектура и основные принципы реализации ИК DISCOMP, предназначенного для создания и применения РППП в разнородных РВС.

В архитектуре ИК DISCOMP можно выделить следующие составляющие (рис. 3): систему управления РВС (СУРВС), набор вычислительных клиентов РВС, систему хранения данных и средства доступа пользователей к РППП.



Рис. 3. Схема взаимодействия основных компонентов ИК

Процесс выполнения (интерпретации) СРЗ в РВС представляет собой *вычислительный процесс*, включающий трансляцию этой схемы во внутреннее представление и ее пошаговую интерпретацию. Интерпретация операторов вызова модулей требует выполнения соответствующих модулей в узлах РВС.

СУРВС представляет собой комплекс взаимосвязанных подсистем, предназначенных для централизованного управления РВС, выполнения вычислительных процессов, диспетчеризации очереди задач и выполнения ряда других функций. СУРВС включает следующие основные компоненты (рис. 4): системное ядро, менеджер вычислительных процессов, менеджер вычислительных ресурсов, диспетчер очереди задач, подсистему журнализации и исполнительную подсистему.

Вычислительный клиент предназначен для организации процесса выполнения модуля в узле РВС. Вычислительный клиент выполняет следующие функции:

- создание соответствующей среды выполнения модуля (создание временных директорий, файлов входных и выходных параметров модулей, задание значений переменных окружения, перенаправление ввода/вывода и т.д.);
- получение значений входных параметров модуля из управляющего узла;
- запуск модуля;
- контроль процесса его выполнения;
- отсылка значений выходных параметров в управляющий узел после завершения работы модуля.

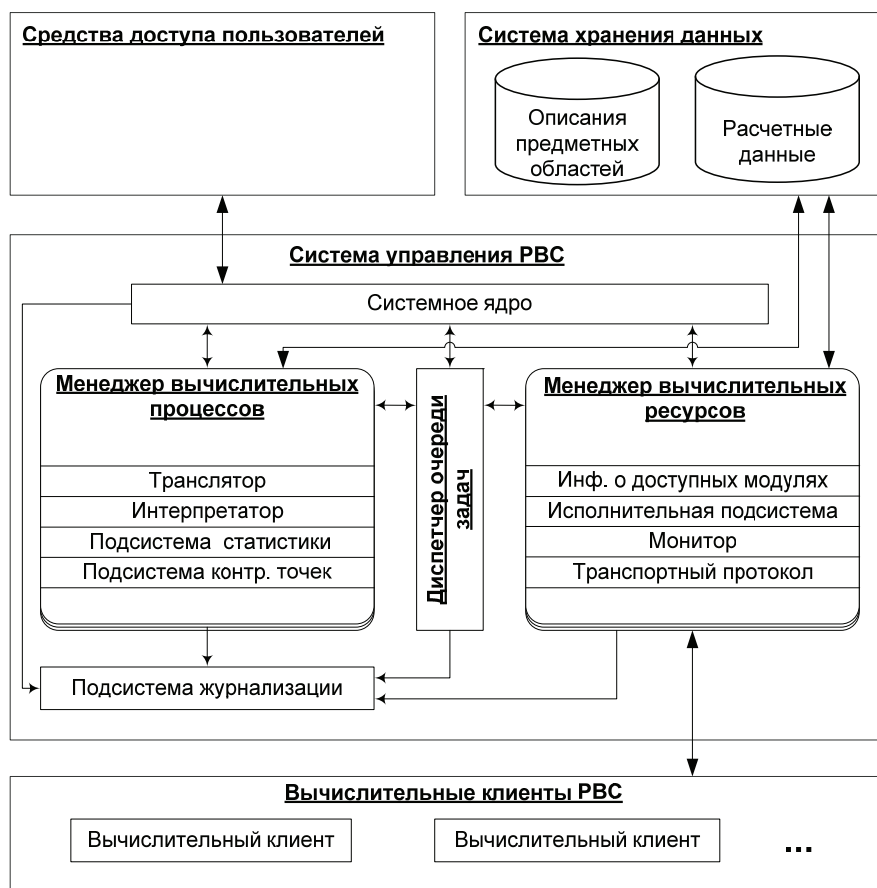


Рис. 4. Система управления РВС

Система хранения данных предназначена для структурированного хранения описаний предметной области и постановок задач в формате XML, а также размещения расчетных данных в виде файлов и предоставления доступа к ним из различных подсистем ИК DISCOMP. Синхронизация процессов чтения/записи данных осуществляется посредством файловых блокировок.

Средства доступа пользователей к РППП предназначены для взаимодействия пользователя с пакетом, размещенным в РВС, управления вычислительными процессами, ввода данных, получения результатов вычислений и пр. ИК DISCOMP предоставляет два способа взаимодействия пользователя с РППП: с помощью набора утилит командной строки и посредством интерактивного пользовательского web-интерфейса.

Связь компонентов ИК DISCOMP между собой реализована на основе специально разработанного *протокола сетевого взаимодействия*. Механизм сетевого взаимодействия узлов с архитектурой «клиент-сервер» реализован с использованием средств, предоставляемых кросс-платформенной библиотекой классов Qt. Обмен данными происходит по TCP-каналу, обеспечивающему доставку сообщений с сохранением порядка пакетов и управление потоком данных. Серверная часть сетевого приложения реализована с поддержкой принципа многопоточности, что позволяет обрабатывать подключения на центральной машине параллельно, без предписанного порядка во времени.

Разработанные во второй главе диссертации архитектура и принципы функционирования ИК DISCOMP, а также способы и средства его реализации обеспечивают широкий спектр функциональных возможностей данного комплекса для организации распределенных вычислений. Компоненты ИК DISCOMP являются кросс-платформенными и позволяют использовать весь потенциал доступных разнородных узлов РВС.

Эффективность решения задач в РППП достигается путем использования многозадачного режима функционирования ИК DISCOMP, выделения ресурсов задачам на основе их приоритетов, динамического управления процессами решения задач, а также посредством обеспечения хорошей производительности взаимодействия распределенных подсистем ИК DISCOMP между собой (такая производительность достигается установлением непрерывного соединения между клиентом и сервером).

ИК DISCOMP обеспечивает необходимый уровень безопасности как для РППП, так и для РВС, являющейся средой функционирования РППП. Соответствующие компоненты ИК DISCOMP реализуют аутентификацию и авторизацию пользователей, ограничение доступа пользователей к серверу и удаленным узлам РВС, разграничение прав пользователей, защиту их программ и данных от несанкционированного использования, должный уровень отказоустойчивости на основе вычислительной избыточности узлов РВС и другие элементы безопасности всей вычислительной системы.

Дистрибутив ИК DISCOMP включает все необходимые средства для установки ИК в узлах с типовой конфигурацией⁵. Такая комплектность дистрибутива исключает необходимость установки какого-либо дополнительного ПО и обеспечивает быструю установку и настройку ИК (в том числе и пользователями, не владеющими навыками системного администрирования). Работоспособность ИК DISCOMP протестирована в РВС с узлами, функционирующими под управлением следующих ОС: MS Windows 2000, MS Windows XP, MS Windows Vista, Gentoo Linux 2008.0, ASP Linux 9.2, Fedora Core Linux 6.0, Mac OS X 10.4.

Разработка архитектуры и программная реализация ИК DISCOMP выполнены лично автором.

В третьей главе разработана технология организации РППП, в общем случае включающая следующие основные этапы:

1. *Проектирование*: проведение структурного анализа исследуемой предметной области с целью выявления ее основных объектов и их взаимосвязей; определение класса задач, решаемых в рамках предметной области; проведение декомпозиции сложных задач на более простые в вычислительном смысле подзадачи.
2. *Разработка функционального наполнения*: создание или выбор из унаследованного ПО модулей, реализующих процессы решения задач или отдельных подзадач.
3. *Создание системной части*: установка компонентов ИК DISCOMP в узлах

⁵ Под типовой конфигурацией здесь понимается минимальный набор системного ПО, установленного в узле и необходимого для функционирования сетевых приложений.

РВС; конфигурирование РВС, определение политик безопасности и правил доступа, регистрация пользователей и т.д.

4. *Описание предметной области*: описание параметров и модулей предметной области; формирование процедурных постановок задач.
5. *Размещение модулей*: размещение модулей и их спецификаций в узлах РВС (выполняется в ручном либо автоматическом режимах).
6. *Отладка и тестирование*: выполнение серии тестов на различных наборах данных, выявление и исправление ошибок.
7. *Применение*: выбор нужной постановки задачи; подготовка исходных данных (значений входных параметров задачи); задание требований к ресурсам РВС, необходимых для решения задачи; запуск задачи на счет; контроль над выполнением вычислительного процесса (анализ промежуточных результатов, файлов журнала, статистики по использованию ресурсов и пр.); анализ результатов вычислений.
8. *Сопровождение*: включение в состав РППП новых модулей; формирование новых постановок задач; консультирование пользователей и т.д.

Разработанная технология апробирована при решении ряда задач из разных предметных областей: исследования биоресурсов озера Байкал, моделирования складского логистического комплекса, решения систем булевых уравнений и задач оптимального управления.

Использование ИК DISCOMP позволило реализовать технологию крупноблочного распараллеливания SAT-задач в виде РППП D-SAT⁶. С помощью данного пакета был успешно выполнен распределенный криптоанализ генераторов Гиффорда, суммирующего и порогового. Вычислительные эксперименты проводились в РВС, включающей 20 двухпроцессорных узлов (каждый процессор имеет по 4 ядра, всего 160 ядер). В табл. 1 приведены сравнительные результаты криптоанализа на одном ядре и в РВС с применением механизмов устранения вычислительной избыточности (реализованных в ИК DISCOMP) и без них.

Таблица 1. Время решения SAT-задач

Описание КНФ в SAT-задаче	Время решения на одном вычислительном ядре	Время решения в РВС (160 ядер)	Время решения в РВС (160 ядер) с устранением вычислительной избыточности
Генератор Гиффорда	14 – 30 ч.	1 – 2 ч.	30 – 60 мин.
Суммирующий генератор	20 мин. – 2 ч.	10 – 30 мин.	2 – 6 мин.
Пороговый генератор	≥ 3 суток	30 – 120 мин.	6 – 10 мин.

Примеры использования унаследованного ПО, реализации на его основе распределенных вычислений и включения в вычислительный процесс модулей, жестко привязанных к определенным ОС, продемонстрированы при разработке

⁶ Заикин О.С. Технология крупноблочного параллелизма в SAT-задачах / О.С. Заикин, А.А. Семенов // Проблемы управления. – 2008. – №1. – С. 43-50.

РППП [5] для расчета оптимального управления и построения множеств достижимости для летательных объектов. Основу функционального наполнения РППП составляет диалоговый пакет КОНУС⁷, реализованный для работы под управлением ОС DOS. Для пакета КОНУС была реализована программная оболочка, эмулирующая ввод данных в режиме диалога и обеспечивающая запуск пакета под управлением ОС Windows XP. Остальные модули РППП реализованы для ОС ASP Linux. Использование ИК DISCOMP позволило автоматизировать процесс многовариантных расчетов для пакета КОНУС, а также объединить в одном РППП платформозависимые модули, реализованные для различных ОС.

Возможность интеграции ИК DISCOMP с другими инструментальными комплексами с целью предоставления им средств проведения распределенных вычислений продемонстрирована на примере взаимодействия с ИК РЕБУС⁸, предназначенного для решения больших систем булевых уравнений. Взаимодействие двух ИК было осуществлено с помощью утилит доступа пользователя к ИК DISCOMP.

Для организации простых многовариантных расчетов (одна программа и много вариантов данных) в ИК DISCOMP автором реализован специализированный РППП, функциональное наполнение которого включает один базовый модуль *solver.exe*, размещенный во всех узлах РВС. На вход этого модуля передается имя исполняемой программы пользователя, шаблон имен файлов с вариантами исходных данных (например, *input%.txt*) и шаблон имен файлов с результатами счета (например, *output%.txt*). Данный РППП успешно использован для решения задач моделирования складского комплекса, исследования филогенетических отношений сиговых рыб Байкала, а также сравнительно-геномного анализа диатомовой водоросли *Synedra Acus*.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Приложения содержат описания пользовательского web-интерфейса, подсистемы журнализации вычислительного процесса, протокола сетевого взаимодействия и API документации ИК DISCOMP, а также дополнительные материалы, отражающие аспекты программной реализации различных РППП.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Разработана технология организации РППП* в разнородных РВС, основанная на методах модульного программирования и автоматизации построения ППП и обеспечивающая использование модулей, реализованных на различных языках программирования, нетиражируемых программных комплексов, а также унаследованного ПО.

⁷ Тятюшкин А.И. Численное исследование свойств оптимального управления в одной задаче преследования / А.И. Тятюшкин, Б.Е. Федун // Теория и системы управления. – 2005. – № 3. – С. 104-113.

⁸ Опарин Г.А. Распределенный решатель булевых уравнений большой размерности: методы и средства управления вычислениями / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, А.П. Новопашин, В.Г. Богданова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды VII Международной конференции. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2005. – С. 113-116.

2. Разработаны программные средства организации динамического управления процессом решения задач в РППП, базирующиеся на специализированных языковых конструкциях процедурной постановки задачи, обеспечивающих возможность определения, анализа и обработки событий вычислительного процесса.

3. Разработана архитектура и выполнена программная реализация инструментального комплекса DISCOMP, которые обеспечивают функционирование прикладного и системного ПО РППП на различных аппаратных платформах и под управлением разных ОС.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сидоров И.А. Технология организации распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 2. – С. 175-180.
2. Васильев С.Н. Интеллектуальные технологии и инструментальные средства создания вычислительной инфраструктуры в сети Интернет / С.Н. Васильев, Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Вычислительные технологии. Специальный выпуск. – 2006. – Т. 11. – С. 34-44.
3. Сидоров И.А. Визуальный пользовательский интерфейс распределенных пакетов знаний / И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов // Математическое моделирование и информационные технологии: Материалы V школы-семинара молодых ученых. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2004. – С. 43-44.
4. Васильев С.Н. Интеллектуализация инструментальных средств организации распределенных систем модульного программирования / С.Н. Васильев, Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Оптимизация, управление, интеллект. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2005. – № 10. – С. 255-265.
5. Сидоров И.А. Распределенная информационно-вычислительная среда модульного программирования / И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов, А.И. Тятюшкин // Параллельные вычисления и задачи управления: Тр. III Международ. конф. – М.: ИПУ РАН, 2006. – С. 505-521.
6. Сидоров И.А. Распределенная информационно-вычислительная среда модульного программирования / И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов // Математическое моделирование и информационные технологии: Материалы VIII школы-семинара молодых ученых. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2006. – С. 161-164.
7. Феоктистов А.Г. Реализация программных комплексов типа SIMD на вычислительном кластере / А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Информационные и математические технологии в научных исследованиях: Тр. XI Байкальской междунар. конф.: в 2-х ч. – Иркутск: Изд-во ИСЭМ РАН, 2006. – Ч. 2. – С. 38-44.
8. Заикин О.С. Технология крупноблочного распараллеливания в криптоанализе некоторых генераторов двоичных последовательностей / О.С. Заикин,

- И.А. Сидоров // Тр. Междунар. науч. конф. – Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – Т. 1. – С. 158-169.
9. Заикин О.С. Параллельная технология решения SAT-задач с применением пакета прикладных программ D-SAT / О.С. Заикин, А.А. Семенов, И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов // Вестник ТГУ. Приложение. – 2007. – № 23. – С. 83-95.
 10. Опарин Г.А. Интеллектуальный решатель задач в булевых ограничениях в распределенной вычислительной среде / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, И.А. Сидоров // Тр. XII Байкальской Всерос. конф.: в 2-х ч. – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2007. – Ч. 2. – С. 12-19.
 11. Сидоров И.А. Описание вычислительного процесса в инструментальном комплексе DISCOMP / И.А. Сидоров // Ляпуновские чтения: Материалы конф. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2007. – С. 31.
 12. Феоктистов А.Г. Языковые средства описания распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP / А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Параллельные вычислительные технологии: Тр. Междунар. науч. конф. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2008. – С. 488-493.
 13. Опарин Г.А. Инструментальные средства управления выполнением абстрактной программы на вычислительном кластере / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Интеллектуальные системы: Тр. XIII Междунар. симпоз. – Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 213-215.
 14. Опарин Г.А. Организация распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Винеровские чтения: Материалы II Всерос. конф. – Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2009. – 4 с.
 15. Сидоров И.А., Феоктистов А.Г. Инструментальный комплекс DISCOMP: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008615180. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2008.

Редакционно-издательский отдел
Института динамики систем и теории управления СО РАН
664033, Иркутск, Лермонтова, 134
Подписано к печати 11.08.2009 г.
Формат бумаги 60×84 1/16, объем 1 п.л.
Заказ №3. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИДСТУ СО РАН

