

Принципы программной реализации моделей повышения надежности распределенных вычислений в системе программирования ПАРСЕК*

Ю.С. Затуливетер, А.В. Топорищев, Е.А. Фищенко, И.А. Ходаковский

В рамках системы ПАРСЕК, предназначенной для "бесшовного" программирования структурно сложных распределенных вычислений, разрабатывается концептуальная схема реализации моделей повышения надежности вычислений в общедоступных ресурсах локальных и глобальных сетей. Повышение надежности распределенных вычислений обеспечивается на этапах трансляции и компоновки прикладных программ путем автоматического внесения вычислительной избыточности в исполняемые коды. Требуемый уровень избыточности определяется с применением многопараметрических оценок надежности, функционально связывающих параметры процессов и сетевых ресурсов. Используются оценки, полученные на этапах математического обоснования моделей повышения надежности вычислений программными методами.

1. Введение

Количество универсально программируемых компьютерных устройств, связанных локальными и глобальными сетями, – стационарных, мобильных, встроенных – уже достигло миллиардов и продолжает расти опережающими темпами. На уровне архитектурных решений и форматов представления компьютерной информации (программ и данных) аппаратные и программные средства распределенных ресурсов всей совокупности сетей чрезвычайно разнородны. Это одна из главных причин того, что в отличие от внутренних ресурсов универсальных компьютерных устройств, вся совокупность распределенных сетевых ресурсов не образует детерминированный и универсально программируемый вычислительный агрегат.

В отсутствие системной целостности, функциональной полноты и технологической замкнутости сетевых ресурсов современные средства системного и прикладного программирования не позволяют использовать их совокупный функциональный и вычислительный потенциал в общедоступных режимах универсального программирования распределенных вычислений. Для создания в разнородных ресурсах глобальных и локальных сетей интегрированных систем распределенной обработки данных того или иного корпоративного назначения предлагаются специальные технологии. Примером таких решений являются Grid- технологии [1]. С их помощью производится выделение ограниченных совокупностей связанных сетями компьютеров с установкой на них дополнительных программных систем конфигурирования и поддержки распределенной обработки данных с внутрикорпоративным закреплением выделенных ресурсов для выполнения целевых функций. Следует отметить, что такие подходы не предназначены для общедоступного программирования внекорпоративных сетевых ресурсов.

Для раскрытия совокупного функционального и вычислительного потенциала в общедоступных режимах универсального программирования распределенных вычислений требуются новые подходы. В [2-6] предложен и развивается подход на основе модели структурно сложных распределенных вычислений в математически однородном поле на основе исчисления древовидных структур. Разработанная в рамках этой модели система программирования ПАРСЕК [2], открывает перспективы создания общедоступных средств "бесшовного" программирования свободно конфигурируемых распределенных вычислений в предположении абсолютной надежности распределенной вычислительной среды [3-6]. В данной работе предлагаются пути развития системы программирования ПАРСЕК, направленные на снятие практически нереализуемых предположений об абсолютной надежности вычислительной среды и распространение свойства универсальной программируемости модели исчисления древовидных структур на недетерминированные сетевые ресурсы.

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), проект 08-07-00334.

2. О программировании распределенных вычислений в математически однородном поле исчисления древовидных структур

В основе индустрии компьютеров и программ лежит универсальный логический стандарт вычислений, представленный классической компьютерной аксиоматикой в модели Дж. фон Неймана [7]. Однако изначально её главное системообразующее свойство универсальной программируемости вычислений логически замкнуто во внутренних ресурсах компьютеров [3,4]. Единой модели распределенных вычислений, снимающей ограничения сфер применимости классической аксиоматики локальными вычислительными ресурсами и отвечающей требованиям массового производства/ применения компьютеров и программ, до сих пор не было.

Исчисление древовидных структур представляет математически замкнутую модель универсальных вычислений в математически однородном поле компьютерной информации [3,4]. Отметим, что эта модель строилась минимальной коррекцией классической модели Дж. фон Неймана, устраняющей локализацию свойства универсальной программируемости во внутренних ресурсах компьютеров. В результате наряду с распространением свойства универсальности на сетевые ресурсы компьютеров в новой модели удалось унаследовать базовые достоинства классической, которые позволили ей до сих пор оставаться логической основой компьютеростроения.

Расширение сфер универсальной программируемости структурно сложных вычислений на сетевые ресурсы [3-6] в предположении их надежности, осуществлено в системе программирования ПАРСЕК [2]. Язык системы ПАРСЕК является простейшей процедурной реализацией исчисления древовидных структур – математически замкнутой модели вычислений на множестве структурированной информации. Программирование осуществляется посредством функционально полного набора операций с древовидными и только древовидными структурами. В ходе решения задач, программист формирует необходимые деревья и функции их преобразования, придает им смысловую нагрузку, соответствующую требованиям задачи. При этом в значительной мере упрощается параметризация программ. Этот язык уникален по ряду свойств. Математическая замкнутость исчисления древовидных структур позволила построить простые и эффективные алгоритмы автоматического управления вычислительными ресурсами компьютера, что делает программирование в математически однородном поле компьютерной информации машиннезависимым. Система изолирует программиста от сложностей управления вычислительной средой и позволяет ему решать задачи в формальных математических конструкциях, не связанных с особенностями машинной среды.

Для организации распределенных вычислений, обеспечения их координированного взаимодействия и синхронизации вычислительных процессов в язык ПАРСЕК введены функции [5,6], с помощью которых задается распределенная обработка компонентов деревьев посредством одновременного исполнения на разных компьютерах многих асинхронно взаимодействующих процессов. Основными компонентами распределенных вычислений являются как перемещаемые exe-модули, так и подпрограммы (функции) с параметрами отдаленного запуска и согласованными интерфейсами межкомпонентного сетевого взаимодействия по событиям и данным.

Расширение сфер программирования на сетевые ресурсы осуществляется посредством встраивания в систему ПАРСЕК механизмов отдаленного запуска процедур RPC (Remote Procedure Calls). Встраиваемые механизмы логически и технологически прозрачны для программистов и не требуют сложного системно-сетевого конфигурирования и сопровождения. Это открывает перспективы общедоступного программирования распределенных структурно сложных вычислений в сколь угодно большой совокупности связанных компьютеров.

Как известно, концепция RPC расширила сферы программирования с внутренних ресурсов компьютеров на распределенные вычислительные ресурсы сетей [8, 9]. Механизмы RPC в реализации существенно сложнее и медленнее вызова локальных процедур, т.к. задействуют инерционные системно-сетевые механизмы. Существенный недостаток известных реализаций RPC состоит в том, что взаимодействие процессов, протекающих в оперативной памяти на отдаленных компьютерах, осуществляется в различных адресных пространствах. Поэтому в принципе отсутствуют возможности работы с глобальными переменными и передачи адресных

указателей в качестве параметров процедур. Неустраненные логические и технологические различия в вызове локальных и отдаленных процедур препятствуют их идентичности, что приносит дополнительные проблемы программирования, которые трудно решаются в условиях разработки современных распределенных систем, которые должны гибко и оперативно реагировать на структурные изменения информационного контекста глобального информационного пространства.

Причины таких ограничений не в существующих способах реализации RPC, а в принципиальных ограничениях сфер действия классической компьютерной аксиоматики, которая замыкает свойство универсальной программируемости на внутренних ресурсах изолированных компьютеров. В таких ограничениях адресное пространство изначально локализовано ячейками внутренней памяти. Поэтому, в существующих языках и системах программирования, наследующих это ограничение, простые и структурированные данные, способы их представления в памяти и обработки изначально ориентированы на размещение в локальной памяти. Механизмы RPC в отсутствие универсальной структурно целостной и функционально полной модели распределенных вычислений вынужденно реализуются на уровне частных способов стыковки разнородных адресных пространств, что является существенным препятствием на пути к технологиям "бесшовного" программирования распределенных вычислений в сетевых ресурсах. Массовое распространение сетей требует формирования единого адресного пространства, охватывающего ресурсы оперативной памяти связанных компьютеров. В нем становится возможным кардинальное снижение трудоемкости программирования распределенных систем.

В развитие нового подхода к программированию структурно сложных вычислений, основанном на математически замкнутом формализме исчисления древовидных структур, в [6] предложены принципы воплощения RPC в системе программирования ПАРСЕК. Абстрактное представление данных и программ посредством древовидных структур позволяет программисту работать с ними на логическом уровне с высоким уровнем независимости от машинной среды. Реализация свойства машино-независимости распределенных древовидных структур и вычислений на них требует формирования единого адресного пространства оперативной памяти связанных сетями компьютеров. Важно отметить, что были найдены простые программные способы реализации такого пространства с использованием стандартных библиотек функций работы с протоколом TCP/IP.

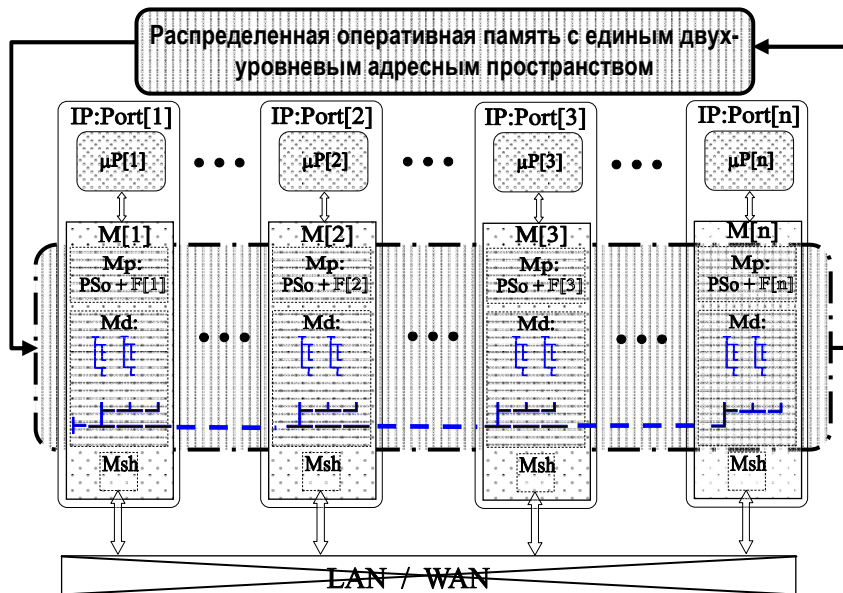


Рис.1. Виртуальная Парсек- машина для распределенных вычислений

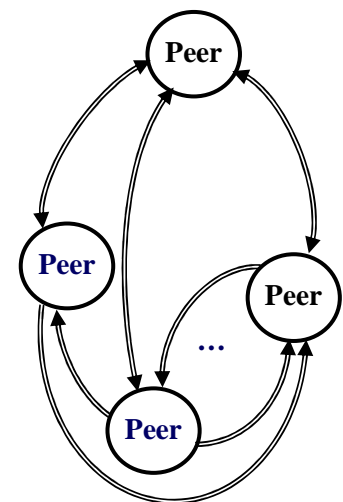


Рис.2. Вычисления в сетевой архитектуре P2P

Внесение встроенных, логически и технологически прозрачных для программиста, механизмов RPC в систему ПАРСЕК позволяет формировать в интегрированных в единое адресное

пространство ресурсов глобальных сетей математически однородное поле компьютерной информации. Свойство универсальной программируемости в нем распространяется с внутренних ресурсов компьютеров на любую совокупность компьютеров связанных сетями. Тем самым становится возможным "бесшовное" программирование распределенных структурно-сложных распределенных вычислений.

На рис.1 показана структурная схема виртуальной ПАРСЕК- машины, которая служит основой реализации математически однородного поля компьютерной информации в едином адресном пространстве распределенной памяти, в котором становится возможным "бесшовное" программирование распределенных структурно сложных вычислений в свободно конфигурируемых сетевых архитектурах Peer-to-Peer (см. рис.2).

Особенность данного подхода в том, что он позволяет только программными средствами реализовать единое адресное пространство, охватывающее оперативную память всех доступных компьютеров, связанных сетями. Интеграция ресурсов отдаленных компьютеров в единое адресное пространства открыла принципиально новые возможности совершенствования RPC. Оно позволяет программисту в одном логическом базисе работать с распределенными древовидными структурами, размещаемыми как в локальной оперативной памяти, так и в памяти отдаленных компьютеров (см. рис.1), а также снять прежние ограничения на передачу адресных указателей через параметры процедур и использование глобальных переменных. Тем самым, и на уровне данных, и на уровне команд обеспечивается практическая идентичность вызова локальных и отдаленных процедур. При исполнении RPC передача сообщений между отдаленными компьютерами реализуется посредством функций сокетов и использованием сетевого протокола TCP/IP. При запуске с помощью RPC процедур на своем компьютере обмен информацией реализуется в ускоренном режиме.

3. Принципы реализации моделей повышения надежности распределенных вычислений

Универсальная программируемость математически однородного поля исчисления древовидных структур открывает возможности повышения надежности распределенных вычислений за счет автоматического внесения на общедоступном уровне прикладных программ (на этапах их трансляции или интерпретации) структурной (аппаратной) вычислительной избыточности [10]. В нашем случае она реализуется посредством привлечения к вычислениям дополнительных (из списка доступных через сети) компьютеров.

Повышение надежности обеспечивается путем одновременного выполнения многих копий программы с идентичными начальными состояниями и входными данными на разных, изначально ненадежных компьютерных устройствах. На рис.3 показана общая схема, которая иллюстрирует принципы осуществления избыточных вычислений на основе программно осуществляемого мажорирования. Использование r компьютеров для одновременного выполнения идентичных вычислений обеспечивает их взаимное резервирование. Каждый компьютер выполняет идентичные вычисления с взаимным обменом промежуточными результатами, их сравнением и последующим мажорированием. Достоверность результатов определяется по задаваемому порогу числа совпадений.

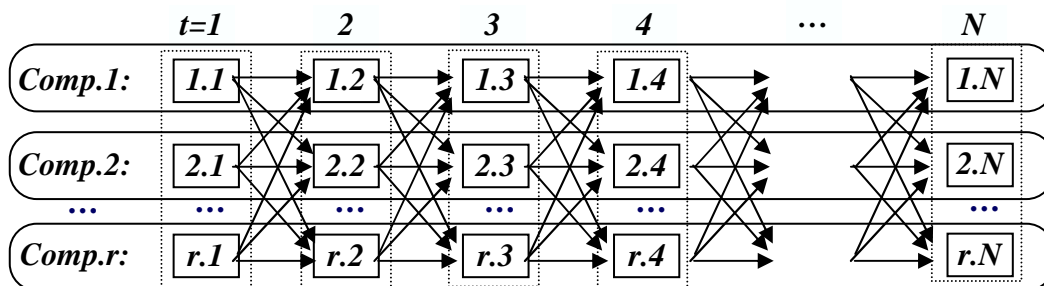


Рис.3. Проведение идентичных вычислений на группе из r компьютеров

На каждом вычислительном этапе $t=1, 2, \dots, N$ производится обмен вычисляемыми значениями контрольных слов. Определяется максимальное количество совпавших значений. Кри-

терий достоверности – максимальное число совпавших слов должно быть не меньше задаваемого порога. Компьютеры, от которых пришли недостоверные контрольные слова, считаются отказавшими.

В данной работе используются следующие модели повышения надежности предложенные и исследованные в [11-13]:

- резервирование с заменой выбывающих компьютеров (отказавшие заменяются на работоспособные с передачей через сеть текущего состояния процесса);
- резервирование без замены выбывающих (процесс продолжается до тех пор, пока число работоспособных компьютеров остается большим заданного порога).

Модели связывают следующие параметры метода резервирования и среды: N – количество вычислительных этапов $t=1, 2, \dots, N$; r – число компьютеров задействованных, определяющих кратность резервирования; m – разрядность контрольного слова ($m>1$); d – порог достоверности ($1<d<r$); p – вероятность безотказной работы компьютера (отказ $q=1-p$); $1-\varepsilon$ – требуемая вероятность успешного завершения процесса из N этапов.

При этом, как показали исследования [11-13], посредством внесения относительно малой вычислительной избыточности открываются перспективы осуществления сколь угодно надежного исполнения распределенных вычислений в ненадежной компьютерной среде.

4. Концептуальная схема реализации моделей повышения надежности вычислений в системе программирования ПАРСЕК

В настоящее время система трансляции языка ПАРСЕК генерирует безизбыточные исполняемые коды прикладных программ. Структура прикладной исполняемой программы составляется из множества равноправных программных компонентов, запускаемых на различных компьютерах для одновременного исполнения.

Программные компоненты генерируются транслятором по исходной программе, в которой программист с помощью команд запуска и синхронизации параллельных действий указывает параллельно (в асинхронных режимах) работающие программы и подпрограммы. Параллельное исполнение подпрограмм на различных компьютерах осуществляется в едином адресном пространстве распределенной оперативной памяти всех задействованных компьютеров. Межкомпьютерный обмен данными между ними производится через сеть автоматически либо по адресным ссылкам, либо посредством передачи значений.

Распределенный вычислительный процесс начинается после загрузки всех исполняемых компонентов на отдаленные компьютеры. В ходе распределенных вычислений все компоненты могут взаимодействовать друг с другом в режиме P2P с динамическим вычислением адресов взаимных обменов.

Суть концепции реализации моделей повышения надежности распределенных вычислений за счет внесения вычислительной избыточности на уровне прикладных программ основывается на общей схеме, представляющей принципы осуществления избыточных вычислений на основе программно осуществляемого мажорирования (рис.3), и состоит в следующем:

- разработка расширенной структуры исполняемых программных компонентов, включающей встроенные фрагменты кодов, осуществляющие взаимодействие идентичных процессов в режимах взаимного резервирования (в соответствии с рис.3);
- разработка алгоритмов оценки требуемой степени избыточности вычислений в соответствии с оценками надежности, полученными в моделях повышения надежности с заменой [12] и без замены [13] отказавших компьютеров;
- разработка команд расширения языка ПАРСЕК, обеспечивающих установление контрольных точек для синхронизации в ходе взаимного резервирования обменов промежуточными данными;
- разработка дополнительных средств трансляции исходных программ и генерации исполняемых программных компонентов.

Предлагаемая схема расширения системы трансляции и автоматической компоновки надежных прикладных программ открывает перспективы построения общедоступных средств "бесшовного" программирования свободно конфигурируемых распределенных вычислений в

существенно недетерминированных вычислительных ресурсах глобальных сетей, функционирующих в режиме "as is" (на основе протоколов TCP/IP) без необходимости использования дополнительных промежуточных программных слоев.

Литература

1. Фостер Я, Кессельман К., Тьюке С. Анатомия грид (Создание масштабируемых виртуальных организаций). [http://www.gridclub.ru/library/publication.2004-11-29.7104738919/publ_file/], 14.12.08.
2. Затуливетер Ю.С., Халатян Т.Г. ПАРСЕК - язык компьютерного исчисления древовидных структур с открытой интерпретацией. Стендовый вариант системы программирования. -М.: Институт проблем управления РАН, 1997. -71с.
3. Затуливетер Ю.С. К новой компьютерной аксиоматике // Труды Третьей международной конференции "Идентификация систем и задачи управления", SICPRO`04, 28-30 января 2004 года, г. Москва. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2004. -С.2187-2193.
4. Затуливетер Ю. На пути к глобальному программированию // Открытые системы. -2003. -№3. [<http://www.osp.ru/os/2003/03/182704/>], 14.12.08.
5. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Организация распределенных вычислений в системе программирования ПАРСЕК на примере сжатия цифрового видео.// Проблемы управления, 2003. -№4. -С.6-10.
6. Затуливетер Ю.С., Топорищев А.В. Язык Парсек: программирование глобально распределенных вычислений в модели исчисления древовидных структур // Проблемы управления, 2005. -№4. -С. 12-20.
7. Беркс А., Голдстейн Г., Нейман Дж. Предварительное рассмотрение логической конструкции электронного вычислительного устройства / Кибернетический сборник. М.: Мир. -1964. -Вып.9. -С. 7-67.
8. Birrel A.D., Nelson B.J. Implementing Remote Procedure Calls // ACM Trans. Comp. Systems. -1984. -Vol.2.№1. -P.39-59.
9. Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. -Спб.: Питер. -2003. -877 с.
10. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. М.: Изд-во стандартов. -1989. -37с.
11. Затуливетер Ю.С., Топорищев А.В., Фищенко Е.А., Ходаковский И.А. Разработка и исследование программных методов повышения надежности распределенных вычислений в модели исчисления древовидных структур // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2008): Труды международной научной конференции (Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008 г.). – Челябинск: Изд. ЮурГУ. -2008. -С. 391- 394.
12. Затуливетер Ю.С., Ходаковский И.А. Пороговый метод повышения надежности распределенных вычислений в ненадежной компьютерной среде (Резервирование с заменой выходящих) // Труды IV Международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления", РАСО'2008, 27-29 октября 2008 г. Москва. -М.: Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. -2008. -С. 307-322.
13. Затуливетер Ю.С., Ходаковский И.А. Пороговый метод повышения надежности распределенных вычислений в ненадежной компьютерной среде (Резервирование без замены выходящих) // Труды IV Международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления", РАСО'2008, 27-29 октября 2008 г. Москва. -М.: Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. -2008. -С. 322-342.