

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Колганова Александра Сергеевича

### **«Автоматизация распараллеливания Фортран-программ для гетерогенных кластеров»,**

представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

#### **Актуальность темы**

Современные высокопроизводительные системы строятся на базе мощных вычислительных узлов, объединенных в кластерную систему, со своей оперативной памятью, недоступной другим узлам. Задача распараллеливания программ на кластер, трудная сама по себе из-за сложностей распределения данных даже для однородных кластеров, опирающихся на универсальные многоядерные процессоры, дополнительно усложняется для более производительных гибридных кластеров при добавлении в узлы кластера графических ускорителей.

До настоящего времени полностью автоматическое распараллеливание на кластер для подавляющего большинства программ практически невозможно. Программистам для распараллеливания на кластеры приходится вручную дорабатывать программы, используя для этого такие средства как MPI, CUDA, OpenCL, которые являются низкоуровневыми с точки зрения прикладного программиста и требуют от него значительных усилий.

Альтернативные системы распараллеливания, базирующиеся на вставлении в программу специальных директив, – DVM, DVMH, OpenACC – являются менее трудоемкими средствами распараллеливания на кластеры. Упрощение их использования достигается за счет применения дополнительных систем автоматизированного распараллеливания, таких как представленная в диссертационной работе система SAPFOR 2. Достоинством системы SAPFOR 2 является возможность интерактивного автоматизированного (а иногда и полностью автоматического) инкрементального (в пределах ограниченных регионов) преобразования большой программы, представленной на языке Fortran 95, в параллельное

представление для системы DVMH, обеспечивающей распараллеливание на гетерогенные кластеры. Это *подтверждает актуальность* диссертационной работы.

### **Структура работы**

Диссертационная работа Колганова А. С. состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 135 страниц. Список литературы содержит 52 наименования.

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, цель и задачи, определяется научная новизна и место работы на базе краткого анализа средств и систем распараллеливания на кластеры.

**В первой главе** описываются проблемы отображения последовательной программы на кластер и причины возникновения автоматизированных и автоматических систем распараллеливания для кластеров. В ней также описывается архитектура ранней системы автоматизации распараллеливания САПФОР, на базе которой была создана система SAPFOR 2.

**Во второй главе** приводится схема работы и структура организации разрабатываемой в рамках диссертационного исследования системы SAPFOR 2. Новая система призвана устранить основные недостатки предыдущей системы автоматизации распараллеливания САПФОР и расширить класс программ, использующих структурные сетки, к которым можно было бы ее применить. К достоинствам системы SAPFOR 2 следует отнести: многопроходную схему применения алгоритмов анализа и преобразований; поддержку интерактивного взаимодействия с программистом; введение спецкомментариев (подсказок со стороны программиста), необходимых для преодоления ограничений автоматического анализа.

**В третьей главе** описываются основные объекты анализа программы – циклы и функции. Рассматриваются алгоритмы заполнения дерева циклов и графа вызовов функций. Рассматриваются проблемы межпроцедурного анализа, которые возникают в процессе распараллеливания циклов и программы в целом. Представлены методы решения данных проблем в виде

преобразования «подстановка функции» и «дублирование цепочек вызовов функций».

**В четвертой главе** вводится понятие областей распараллеливания, тех частей программы, на базе которых выполняется инкрементальное (частичное) распараллеливание большой программы. Области распараллеливания определяются программистом или системой SAPFOR 2 по результатам динамического анализа (профилирования) как не вложенные друг в друга участки программы, на которые приходится наиболее интенсивная вычислительная нагрузка. Вводится понятие конфликта областей распараллеливания, и описываются алгоритмы разрешения данных конфликтов и объединения областей распараллеливания.

**Пятая глава**, ключевая в диссертационной работе в плане представления *новых научных результатов*, посвящена алгоритмам построения распределения данных и вычислений, а также их отображению на гетерогенный кластер. В разделе 5.1 дается описание способов отображения на кластер и их характеристика. В разделе 5.2 описывается алгоритм связи массивов в программе между собой. В разделе 5.3 описывается алгоритм построения распределения вычислений и доступа к удаленным данным. В разделе 5.4 описывается алгоритм расстановки вычислительных регионов – фрагментов программы, которые целесообразно выполнять на ускорителях. В разделе 5.5 описывается алгоритм выбора эффективных схем распараллеливания программы посредством грубого подсчета характеристик ее параллельного выполнения.

**В шестой главе**, крайне важной с точки зрения оценки возможностей представленной в работе системы SAPFOR 2, приводятся *основные практические результаты* ее применения. На тестовых и прикладных программах убедительно подтверждаются преимущества использования системы SAPFOR 2, как в части сокращения трудозатрат (значительное сокращение добавленного кода по сравнению с явным использованием MPI и CUDA) на распараллеливание, так и в части эффективности использования инкрементального распараллеливания. Последнее особенно ярко продемонстрировано в разделе 6.3.1 на примере распараллеливания программы BT из пакета NAS. Здесь нашли применение все методы автоматизированного распараллеливания, представленные в работе, а после

небольшой ручной доработки последовательной программы в интерактивном режиме работы средствами системы SAPFOR 2 было достигнуто ее ускорение на кластере с четырьмя ГПУ в 220 раз.

**В заключении** формулируются основные полученные результаты исследования и направления дальнейшей работы.

### **Оценка научной новизны и достоверности**

В работе получены следующие новые научные результаты:

- Разработаны новые алгоритмы построения распределения данных и построения распределения вычислений с возможностью параллельного исполнения программ на гетерогенных кластерах.
- Спроектирован, разработан и реализован механизм областей распараллеливания.
- Разработана, спроектирована и реализована новая система (SAPFOR 2) автоматизации отображения последовательных программ Fortran 95 на гетерогенный кластер с поддержкой инкрементального распараллеливания.

Проведенные исследования применимости системы SAPFOR 2 для тестов и реальных приложений показали высокую эффективность предложенного подхода, позволяющего значительно упростить и ускорить разработку эффективных параллельных программ для гетерогенных кластеров. Они также показали, что для определенного класса задач можно писать последовательные программы на языке Fortran 95, которые будут автоматизировано (либо автоматически) распараллелены и эффективно выполнены на таких кластерах.

### **Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования**

В рамках данной диссертационной работы был предложен новый инкрементальный подход к автоматизации распараллеливания программ на гетерогенные кластеры. На базе разработанной и спроектированной архитектуры автоматизированного распараллеливания программ была создана новая система SAPFOR 2, включающая в себя множество алгоритмов анализа и преобразования исходного кода программы и средства интерактивного взаимодействия с программистом. Реализованная система

может выполнять инкрементальное автоматизированное распараллеливание класса программ, использующих структурные сетки и написанных на языке Fortran 95 с некоторыми ограничениями входного языка. Структура разработанной системы SAPFOR 2 позволяет расширять ее функционал новыми возможностями благодаря использованию модульной организации алгоритмов анализа и преобразований.

### **Недостатки и замечания по диссертационной работе**

1. При распараллеливании программы в системе SAPFOR 2 *не используются* имеющиеся в языке Fortran-DVMH *средства параллельного ввода-вывода* из-за их ограниченности.
2. Сложно понять все существенные особенности языка Fortran-DVMH применительно к *гетерогенным системам*, т.к. его краткое описание, данное в главе 2, неполно, а самые важные компоненты описаны только в главе 5, т.е. там, где они применяются в системе SAPFOR 2.
3. Для большинства алгоритмов не приводится их алгоритмическая сложность, а *неформализованное описание алгоритмов* затрудняет получение таких оценок просто при чтении работы.
4. Есть разночтение между диссертацией и авторефератом в части определения важного для результатов работы понятия «*инкрементальное распараллеливание*»: «новый метод для анализа и распараллеливания больших программ» в диссертации и «средство выделения областей распараллеливания» в автореферате.
5. Набор ограничений на входной язык Fortran 95, введенный в систему SAPFOR 2, усложнит применение этой системы к программам, написанным на более современных версиях языка Fortran (03, 08, 18).
6. В разделе 6.2.3 говорится, что SAPFOR 2 версия рассмотренной программы моделирования распространения упругих волн на одном ГПУ в 116 раз быстрее, чем MPI-версия на одном ядре K60, а на 32 ГПУ - только в 9 раз быстрее, чем MPI-версия на всех 256 ядрах K60. При этом не очень четко объяснено, что размер задачи растет пропорционально числу ГПУ в кластере (в 32 раза для 32 ГПУ) и не объяснено, почему времена исполнения масштабируемой задачи стабилизируются в соотношении 9:1 для MPI и ГПУ узлов, начиная с 32 MPI и 4 ГПУ.

Отмеченные недостатки не снижают высокий научно-технический уровень работы и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертации.

### **Соответствие содержания автореферата и диссертации**

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертационное исследование Колганова А. С. является законченной научной работой, обладает актуальностью, научной новизной и практической значимостью, проведено на высоком научно-техническом уровне.

Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Колганов Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

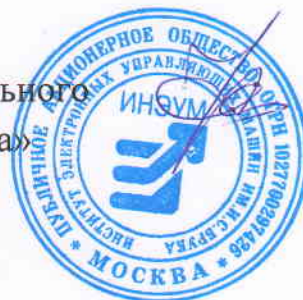
Кандидат технических наук, начальник отделения  
«Системы программирования» Публичного  
акционерного общества «Институт электронных  
управляющих машин им. И. С. Брука», Российская  
федерация, 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24  
тел. +7 (499) 135-89-49, [volkonsky\\_v@ineum.ru](mailto:volkonsky_v@ineum.ru)



В.Ю. Волконский

« 17 » сентября 2020 г.

Подпись кандидата технических наук  
Волконского В.Ю. заверяю, зам. генерального  
директора ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»



В.М. Фельдман