

В диссертационный совет Д 801.02.06
при ФГАУ ВО «Южный федеральный
университет»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Воеводина Владимира Валентиновича,
доктора физико-математических наук, профессора,
члена-корреспондента РАН,

директора Научно-исследовательского вычислительного центра
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
на диссертационную работу Дордопуло Алексея Игоревича на тему
«Теоретические основы технологии ресурснезависимого
программирования гибридных вычислительных систем»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических
наук по специальности 2.3.5 - Математическое и программное
обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных
сетей, технические науки

1. Актуальность темы исследования

Высокопроизводительные вычислительные системы сегодня востребованы исключительно широко, что определяется растущим потенциалом предсказательного моделирования и технологий искусственного интеллекта для решения приоритетных задач науки и промышленности. Постоянно возрастающая сложность решаемых задач требует непрерывного роста производительности суперкомпьютеров, который обеспечивается увеличением количества вычислительных узлов и других аппаратных ресурсов системы. В настоящее время для увеличения реальной производительности суперкомпьютеров на широком классе задач компании и научные группы предлагают множество вариантов построения многопроцессорных вычислительных систем с использованием тех или иных особенностей архитектуры вычислительных узлов. Объединение графических ускорителей и программируемых логических интегральных схем с универсальными процессорами в гибридной вычислительной системе (ГВС) позволяет для каждой решаемой задачи выбрать наиболее эффективную архитектуру, но оставшиеся узлы системы, число которых достаточно велико, остаются незадействованными. Использование для решения задачи всех вычислительных узлов затрудняется существенными отличиями в архитектуре и технологиях их программирования, что требует от разработчика обширных знаний различных парадигм и языков программирования, а также увеличивает время и стоимость преобразования параллельных программ для различных архитектур и

конфигураций ГВС. В настоящее время отсутствуют научные принципы, теоретические методы и инструментальные средства программирования гибридных вычислительных систем, обеспечивающие сбалансированное решение задач для заранее неопределенного аппаратного ресурса ГВС из различного числа узлов разных архитектур, объединенных в единый вычислительный ресурс.

Поэтому создание теоретических основ программирования гибридных вычислительных систем, обеспечивающих сокращение времени преобразования прикладных задач между различными архитектурами и конфигурациями ГВС, является актуальной научной проблемой. Практическое применение предложенной автором технологии программирования гибридных вычислительных систем позволит повысить производительность ГВС при решении прикладных задач различных классов, сократить временные и финансовые затраты на их решение, повысить технико-экономические показатели при эксплуатации ГВС.

2. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке новых научных понятий, методологических принципов, положений и выявленных закономерностей, позволяющих сократить время преобразования прикладных программ к сбалансированному решению задачи для заранее неопределенной конфигурации аппаратного ресурса гибридной вычислительной системы. Для решения поставленной в диссертационной работе научной проблемы соискателем проведен комплекс теоретических и технологических исследований, при выполнении которых получены следующие обладающие научной новизной результаты:

1. Модель параллельных вычислений для гибридных вычислительных систем на основе информационного графа задачи, отличающаяся от известных единой для различных вычислительных архитектур формой описания вычислений в виде кадровой структуры.
2. Новое представление кадровой структуры с использованием вычислительного ресурса как параметра параллельно-конвейерной реализации задачи на заранее неопределенном ресурсе гибридной вычислительной системы.
3. Новые принципы преобразования параметризованной аппаратным ресурсом кадровой структуры к архитектуре и конфигурации гибридной вычислительной системы с помощью редукции производительности.

4. Теоремы о применении методов редукции производительности для преобразования кадровой структуры к архитектуре и конфигурации гибридной вычислительной системы.

5. Метод преобразования кадровой структуры и сокращения аппаратных затрат с помощью редукции производительности, отличающийся использованием доступного аппаратного ресурса гибридной вычислительной системы как параметра портации.

6. Новый метод преобразования и сокращения аппаратных затрат кадровой структуры на основе синтеза последовательности микро-кадров, выполняющих вычисления структурно с сокращенной степенью параллелизма на ограниченном доступном ресурсе (меньшем ресурса аппаратной реализации базового подграфа).

7. Метод преобразования задач, содержащих связанные информационной зависимостью подзадачи с разной степенью параллелизма, отличающийся от известных согласованной редукцией производительности различных по вычислительной трудоемкости кадровых структур с синтезом сбалансированного по интервалу обработки данных решения.

8. Теоретические основы технологии ресурсонезависимого программирования гибридных вычислительных систем, объединяющие совокупность предложенных научных понятий и положений, выявленных закономерностей и принципов, разработанных методов и алгоритмов портации в достаточную для синтеза рационального решения задачи методику.

9. Новые алгоритмы функционирования инструментальных программных средств технологии ресурсонезависимого программирования гибридных вычислительных систем: алгоритм преобразования параметризованной ресурсом кадровой структуры прикладной задачи к целевой архитектуре ГВС программой «Прокруст» и алгоритм редукции производительности выделенного фрагмента задачи в заданное коэффициентом редукции число раз при нехватке аппаратного ресурса программой «Щелкунчик».

Новизна разработанных методов и программного обеспечения подтверждается свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Сформулированная в диссертации проблема была исследована и решена с использованием известных и апробированных методов. Основные положения, выводы и рекомендации в достаточной степени аргументированы и обоснованы. Достоверность полученных результатов

подтверждается теоретическим обоснованием, основанным на использовании классического математического аппарата, репрезентативностью экспериментальных данных, полученных в ходе апробации на ряде вычислительных систем, положительными результатами внедрения практических результатов диссертации в учреждениях науки и на предприятиях промышленности.

4. Значимость результатов диссертации для науки и практики

В диссертационной работе внесен вклад в развитие теории программирования высокопроизводительных вычислительных систем. С использованием методов параллельного программирования и структурно-процедурной организации вычислений, предложены теоретические основы, методы преобразования, алгоритмы и программные средства портации, которые позволяют создать технологию ресурснезависимого программирования гибридных вычислительных систем. Программные средства технологии ресурснезависимого программирования апробированы при решении ряда прикладных задач, содержащих связанные информационной зависимостью подзадачи с разной степенью параллелизма. Применение разработанных инструментальных средств технологии ресурснезависимого программирования для портации прикладных задач математической физики, символьной и цифровой обработки сигналов с различными видами информационной зависимости позволяет в 3–6 раз сократить время портации ресурснезависимых программ на различные архитектуры и конфигурации гибридных вычислительных систем с обеспечением реальной производительности не ниже заданного уровня. Полученные результаты эффективности портации ресурснезависимых программ подтверждаются актами внедрения результатов в академических, научно-исследовательских и промышленных организациях. Практическая значимость разработанной технологии ресурснезависимого программирования гибридных вычислительных систем состоит в возможности создания автоматического распараллеливающего компилятора для систем с распределенной памятью, позволяющего сократить время портации программ на процедурных языках программирования в ресурснезависимые параллельно-конвейерные решения для гибридных вычислительных систем.

5. Оценка содержания диссертации

Диссертация имеет традиционную структуру, состоит из введения, пяти глав, в которых изложены решения поставленных частных научных задач, заключения, библиографического списка и приложений. Содержание работы

изложено на 348 страницах, работа содержит 87 рисунков и 17 таблиц, список использованной литературы из 248 наименований. В приложении представлены документы, подтверждающие практическое использование результатов исследований.

Во введении обоснована актуальность работы, дана ее общая характеристика, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены вычислительные архитектуры и технологии программирования современных высокопроизводительных систем, выполнена постановка задачи исследования, предложены принципы разработки теоретических основ ресурснезависимого программирования гибридных вычислительных систем.

Во второй главе приведены способы представления вычислений, принципы и правила их преобразования к целевым архитектурам гибридной вычислительной системы. Для ресурснезависимого представления вычислений предложен переход от информационного графа к параметризуемой ресурсом кадровой структуре. Портация вычислений к целевым архитектурам гибридной вычислительной системы представлена преобразованием параметров параллелизма кадровой структуры, зависящим от доступного аппаратного ресурса. Сформулированы локальная и глобальная цели портации, предложены способы их достижения с помощью расчета критического ресурса в точках выбора альтернатив.

В третьей главе описаны методы и механизмы преобразования параметризуемой ресурсом кадровой структуры к целевым архитектурам гибридной вычислительной системы с помощью редуccionных преобразований по числу подграфов, устройств, разрядности, интервалу обработки данных и частоте. Сформулированы и доказаны теоремы о комплексном применении редуccionных преобразований. Оценено максимальное количество редуccionных преобразований кадровой структуры для достижения локальной и глобальной целей портации.

В четвертой главе представлены методы и алгоритмы преобразования прикладных задач с информационно-зависимыми подзадачами с различной степенью параллелизма. Разработаны методы и алгоритмы согласованного преобразования информационно-зависимых подзадач для различных типов информационной зависимости.

В пятой главе описаны инструментальные программные средства технологии ресурснезависимого программирования, реализующие разработанные в диссертации методы и алгоритмы, и результаты их апробации при портации прикладных задач с различными типами информационной зависимости. Представлены результаты портации ряда прикладных задач,

содержащих связанные информационной зависимостью подзадачи с разной степенью параллелизма, на различные архитектуры и конфигурации реконфигурируемых и гибридных вычислительных систем.

В заключении диссертации приведены основные выводы, полученные при решении поставленной научной проблемы и ее частных задач. Сформулирован вывод о достижении цели, а также даны рекомендации по возможным направлениям дальнейших исследований.

6. Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений, результатов, выводов и заключения диссертации

Основные результаты диссертационной работы были представлены на 80 международных и всероссийских тематических конференциях. По теме работы опубликовано более 170 работ, из которых 29 индексируется в международных базах наукометрических данных Web of Science и Scopus, 36 работ из списка ВАК РФ, получено 15 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертационных исследований были использованы более чем в 25 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах.

7. Соответствие диссертации критериям, установленным в разделе 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в ЮФУ в редакции от 30.11.2021 №260-ОД

Результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе, оригинальны. Проведенные исследования позволили соискателю обосновать применение разработанных теоретических основ, методов и инструментальных программных средств технологии ресурснезависимого программирования для сокращения времени портации прикладных задач для гибридных вычислительных систем различных архитектур и конфигураций при заданном уровне реальной производительности.

Научные результаты диссертационной работы соискателя соответствуют требованиям п. 1 («Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем») в части «Модели, методы и алгоритмы проектирования и трансформации программ» и п.8 («Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования») в части «моделей и методов создания программ для параллельной обработки данных», а также «инструментальных средств параллельного программирования» паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и

программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Диссертация соответствует критериям, установленным в разделе 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в ЮФУ в редакции от 30.11.2021 №260-ОД.

8. Замечания

Вместе с тем имеется ряд замечаний по содержанию работы:

1. В предложенных методах преобразования кадровой структуры к целевым архитектурам отсутствуют оценки влияния топологии коммуникационных связей ГВС и протоколов межпроцессорного обмена данными на реальную производительность системы.

2. При описании разработанных инструментальных программных средств технологии ресурсонезависимого программирования основной акцент сделан на ПЛИС, а для процессоров и графических ускорителей не представлена форма, в которую будет преобразована параллельная программа на языке COLAMO, и не указаны способы учета параметров CPU и GPU (количество процессорных ядер, объем памяти, количество каналов и т.д.)

3. Апробация разработанных программных средств выполнялась для ГВС с сравнительно небольшим числом ПЛИС и процессоров (не более восьми ПЛИС для ГВС «Тайгета», «Терциус» и «Терциус-3» и 2-4 ПЛИС и 2 процессора для ГВС «Атлант-Д» и «Атлант-10»). Результаты портации задач для ГВС, содержащих большое количество узлов всех целевых архитектур (сотни процессоров, ПЛИС, графических ускорителей), не представлены.

4. Не рассмотрена портация задач на ГВС, использующую графические ускорители в качестве основного вычислительного узла.

Перечисленные замечания не влияют на полученные теоретические и практические результаты, не снижают уровень и значимость проведённого автором научного исследования.

Заключение

Диссертация Дордопуло Алексея Игоревича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное научное и хозяйственное значение. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Научные труды и автореферат соответствуют основному содержанию диссертации. Диссертация соответствует критериям, установленным в разделе 2 Положения

о порядке присуждения ученых степеней в ЮФУ в редакции от 30.11.2021 №260-ОД.

По уровню проведенных исследований, актуальности, новизне и практической ценности полученных результатов диссертационная работа Дордопуло А.И. удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, соответствует пунктам 1 («Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем») в части «Модели, методы и алгоритмы проектирования и трансформации программ» и п.8 («Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования») в части «моделей и методов создания программ для параллельной обработки данных», а также «инструментальных средств параллельного программирования» паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Считаю, что автор диссертационной работы, Дордопуло Алексей Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 - Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей, технические науки.

Официальный оппонент,
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского
вычислительного центра Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова _____ Воеводин Владимир Валентинович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»,

119234, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 4, :НИВЦ МГУ Телефон:
+7 (495)939-54-24

E-mail: vovodin@paralle.ru

Подпись официального оппонента Воеводина Владимира Валентиновича
заверяю.

Проректор МГУ им. М.В. Ломоносова

А.А. Федянин

« ____ » _____ 2023 г.