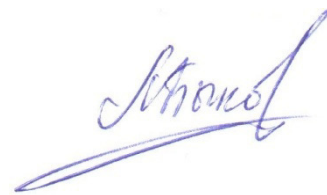


На правах рукописи



БЫКОВА МАРГАРИТА АЛЕКСАНДРОВНА

**МНОГОУРОВНЕВЫЕ МЕТОДЫ АРХИТЕКТУРНО-ЗАВИСИМОЙ
ДЕКОМПОЗИЦИИ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ**

05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации
(в науке и промышленности) по техническим наукам

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НИЖНИЙ НОВГОРОД - 2017г.

Работа выполнена на кафедре «Информатики и автоматизации научных исследований» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Научный руководитель:

Старостин Николай Владимирович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

– **Ульянов Михаил Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, ведущий научный сотрудник, г. Москва.

– **Полозов Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доцент кафедры «Компьютерные технологии в проектировании и производстве» института радиоэлектроники и информационных технологий, г. Нижний Новгород.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»), г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «21» декабря 2017 года в 11:00 часов в ауд. 1315 на заседании диссертационного совета Д 212.165.05 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и на сайте http://www.ntu.ru/sites/default/files/file/dissertacii/2017/bykova_m_a.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.С. Суркова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные вычислительные системы – это разделяемый ресурс, на котором одновременно могут выполняться много процессов, конкурирующих за процессорное время, память, коммуникации. Для их эффективного использования требуется решать разнообразные проблемы, в том числе связанные с планированием и запуском заданий, назначением программ и распределением данных по узлам вычислительной системы. Выполняемые в высокопроизводительной среде процессы могут быть как независимые, так и взаимодействующие. В случае независимых процессов важно добиться сбалансированной работы процессоров, в то же время для взаимодействующих процессов помимо сбалансированности значимость приобретают межпроцессорные коммуникации, издержки на которые необходимо снижать. В ряде случаев, когда распараллеливание программы выполнено заранее и изменению не подлежит, добиться значимого снижения потерь от простоя процессоров и коммуникационных издержек можно за счет перераспределения графа данных параллельной программы по узлам физической топологии участка вычислительной сети, в рамках которого исполняется параллельный код. В результате возникает проблема отображения графа данных параллельной программы на физическую топологию выделенного участка вычислительной сети с целью наибольшего сокращения времени ее работы с учетом издержек на поиск и реализацию такого отображения. Подобные проблемы будем называть задачами архитектурно-зависимой декомпозиции (АЗД).

В работе рассмотрена обобщенная постановка задачи и интересные с практической точки зрения ее частные случаи, которые формулируются в терминах квадратичной задачи о назначениях и задачи сбалансированного разбиения графа.

Несмотря на NP-трудность задачи АЗД и многих ее частных случаев, следует отметить определенные успехи в развитии точных методов, особенно в аспекте их адаптации для высокопроизводительных вычислительных систем. На практике размеры графов данных параллельных задач достигают 10^6 - 10^9 вершин.

NP-трудность и размеры прикладных задач АЗД накладывают ограничения на практическое применение точных и даже ряда приближенных методов. Это явилось стимулом развития эвристических алгоритмов. S. Chen и M.M. Eshaghian предлагают конструктивный рекурсивный алгоритм решения задачи АЗД. В. Hendrickson и Т. Kolda используют спектральные методы для решения задачи декомпозиции графа. Большой интерес вызывают итерационные алгоритмы. Примером могут послужить работы S. Bokhari, J.K. Aggarwal, S.Y. Lee. Для решения квадратичной задачи о назначениях в работах С.А.С. Oliveira, Р.М. Pardalos, М.Г.С. Resende, Y. Li, Т. Stützle, J. Skorin-Kapov, E. Taillard, Т.Р. Gevezes, L.S. Pitsoulis, I.M. Whitley, G.D. Smith, М. Czapiński предложен ряд алгоритмов, которые построены на последовательном улучшении начального решения. Главной проблемой итерационных алгоритмов является отсутствие возможности преодоления локальных экстремумов. Решение этой проблемы состоит в развитии метаэвристик. Среди них можно выделить методы имитации отжига, алгоритмы, работающие с группами решений и имитирующие процессы в биологических системах, и др. В работах M.R. Wilhelm, T.L. Ward, J.C. Wang, D.T. Connolly, M. Hammami, K. Ghédira, B. Robič, J. Šilc, А.Б. Клименко, Р.В. Троценко предлагаются алгоритмы, основанные на методе имитации отжига для решения квадратичной задачи о назначениях, задачи декомпозиции графа, задачи планирования параллельных процессов, задачи назначения параллельных процессов на вычислители, задачи оптимизации ресурсов и планирования вычислений. Среди алгоритмов, имитирующих процессы в биологических системах, наиболее известными являются муравьиные и пчелиные алгоритмы. Эти алгоритмы представлены в работах V. Maniezzo, A. Colomi, L.M. Gambardella, E.G. Talbi, O. Roux, C. Fonlupt, D. Robillard, M. Mirzazadeha, G.H. Shirdelb, B. Masoumic, S. Tsutsui, L. Liu для квадратичной задачи о назначениях, в работах M.S. Soliman, G. Tan, A.E. Langham, P.W. Grant, J.D. McCaffrey для задачи декомпозиции графа, в работах O. Sammoud, C. Solnon, K. Ghédira, S. Fidanova, M. Durchova, T. Davidović, M. Šelmić, D. Teodorović, D. Ramljak, S.S. Kim, J.H. Vyeon, H. Liu для задачи отображения графов и задачи планирования параллельных процессов. В работе Бершадского А.М. для решения задачи балансировки нагрузки предложена неклассическая

прогностическая модель, основанная на синергетическом подходе и использующая фрактальные методы описания динамики нагрузки, и синтетический обобщенный подход к составлению прогнозов изменения нагрузки. Большой класс составляют эволюционно-генетические алгоритмы, представленные в работах Н. Mühlenbein, С. Fleurent, J.A. Ferland, А. Misevicius, U. Tosuna, Т. Dokeroglua, А. Cosara, J. Hines, J.T. Thorpe, F.C. Harris, K.B. Winiecki, R.K. Ahuja, J.B. Orlin, А. Tiwari, L.Y. Tseng, S.C. Liang, T.N. Bui, B.R. Moon, P. Neuhaus, Т. Chockalingam, S. Arunkumar. В нашей стране эти алгоритмы развивали Д.И. Батищев, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, А.В.Пантелеев и др. Многие прикладные задачи характеризуются большими размерами, что затрудняет использование даже эвристических методов их решения. На большеразмерных задачах декомпозиции и архитектурно-зависимой декомпозиции графа хорошо показали себя многоуровневые алгоритмы, которые сводят исходную задачу к задаче меньшей размерности или меньшей сложности, когда становится возможным применить более качественные алгоритмы поиска решения, находят решение упрощенной задачи и восстанавливают его к решению исходной задачи, применяя локальную оптимизацию (ЛО). Впервые идея многоуровневости была предложена В. Hendrickson, кроме него значительный вклад в развитие многоуровневой оптимизации внесли R. Leland, G. Karypis, V. Kumar, С. Walshaw. В нашей стране это направление развивали М.В. Якобовский, Н.В. Старостин, А.В.Филимонов, А.А. Пазников, М.Г. Курносков, М.С. Куприянов, А.А. Гуленок и другие ученые. Существует ряд коммерческих программных библиотек, решающих задачу декомпозиции графа многоуровневыми методами. Самые известные Metis, Chaco, Jostle и Scotch. Многие проекты сконцентрированы на решении классических задач декомпозиции графов, в то же время для практических целей интерес представляют продукты, учитывающие специфику конкретных предметных областей.

В этом аспекте следует отметить, что попытка учета ключевых характеристик и особенностей рассматриваемой предметной области, таких как топология и коммуникационные показатели сети, производительности процессоров, объемы информационных зависимостей в графе данных параллельной программы, вычислительные издержки в процессе исполнения

кода, приводят к осязательному усложнению не только математической модели и алгоритма решения задачи, но и к технологиям сбора и актуализации данных для повышения эффективности высокопроизводительных расчетов.

Научной проблемой, на решение которой направлено диссертационное исследование, является проблема разработки многоуровневых методов решения задач АЗД в области высокопроизводительных вычислений.

Целью работы является создание прикладных методов построения многоуровневых средств решения больших задач АЗД, возникающих в области высокопроизводительных вычислений.

В соответствии с целью работы определены следующие **задачи**:

- Построение и исследование гиперграфовой модели АЗД, учитывающей ключевые особенности предметной области, постановка оптимизационных задач, направленных на сокращение вычислительных издержек в высокопроизводительной среде при выполнении параллельных расчетов;
- Разработка методологии и структуры формирования данных предметной области в терминах модели АЗД;
- Разработка алгоритмических средств и реализация программных инструментов, для решения задач АЗД;
- Апробация разработанных решений в рамках современных высокопроизводительных вычислительных систем.

Объектом исследования являются большие оптимизационные задачи на графах в области высокопроизводительных параллельных систем.

Предметом исследования являются большие задачи АЗД, возникающие в области высокопроизводительных параллельных систем; методология, методы, алгоритмы, обеспечивающие решение рассматриваемых задач.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается строгими математическими доказательствами выдвигаемых

положений, проведением вычислительных экспериментов на тестах производительности (бенчмарках) и сравнением с известными аналогами.

Научная новизна.

1. Математическая модель АЗД, в рамках которой поставлены различные оптимизационные задачи на гиперграфах. Предложена гиперграфовая модель вычислительной системы, позволяющая наиболее точно отразить топологию и коммуникационные характеристики вычислительной сети. Предложено ее матричное представление. (Соответствует областям исследований: 2, 3 паспорта специальности);

2. Методология представления данных предметной области в терминах модели АЗД. В отличие от известных представлений структуры вычислительной сети в виде взвешенных графов, предложено иерархическое описание структуры вычислительной сети, что позволяет компактно и в достаточной степени детализации описать вычислительную инфраструктуру. (Соответствует областям исследований: 1, 4 паспорта специальности);

3. Алгоритмические средства решения задач АЗД: предложены многоуровневые методы (метод редукции графа данных программы и метод редукции графа топологии вычислительной системы) и многоуровневый алгоритм решения общей задачи АЗД, которые на разных уровнях иерархии обеспечивают возможность использовать точных, приближенных и эвристических алгоритмов; алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ; генетические алгоритмы, в том числе улучшающий генетический алгоритм на бинарном представлении; создан итерационный алгоритм локальной оптимизации. (Соответствует областям исследований: 5, 9 паспорта специальности).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Гиперграфовая модель АЗД, в рамках которой ставятся оптимизационные задачи распределения графа данных параллельной программы по процессорам высокопроизводительной вычислительной системы;

2. Методология извлечения и представления данных предметной области (структуры вычислительной сети) в терминах модели АЗД;

3. Многоуровневые методы решения оптимизационных задач АЗД, а также генетические алгоритмы решения квадратичной задачи о назначениях, точный и приближенный алгоритмы решения квадратичной задачи о назначениях, алгоритм локальной оптимизации (ЛО) полученного решения задачи АЗД, синтезированные в общий многоуровневый алгоритм поиска решений задачи;

4. Программная библиотека разработанных алгоритмов решения задач АЗД, а также форматы представления исходных данных задачи.

Практическая значимость. Предложен подход, который может быть использован в системах планирования и управления ресурсами высокопроизводительных вычислительных систем.

Результаты работы используются в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлению "Прикладная информатика" в рамках дисциплин «Теория систем и системный анализ» и «Методы и технологии суперкомпьютерных вычислений» кафедры Информатики и автоматизации научных исследований в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского института информационных технологий, математики и механики.

Результаты диссертационной работы апробированы в РФЯЦ-ВНИИЭФ (справка об использовании результатов диссертационной работы). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616817.

Публикация результатов.

Основное теоретическое и практическое содержание диссертации опубликовано в 16 печатных работах, в том числе 4 статьях, 3 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических семинарах и конференциях: V,

VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция "Прикладная информатика и математическое моделирование" (Москва, Московский университет печати им.И.Федорова, 2011, 2012); XII Всероссийская конференция "Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах" (Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2012); XIX, XX, XXI Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013, 2014, 2015); Международная конференция “Numerical Computations: Theory and Algorithms” (Италия, Фалерна, 2013); XII Международная научно-техническая конференция «Будущее технической науки» (Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2013); Всероссийские чтения-конкурс памяти нижегородских ученых (Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2013); Семинар «Методы суперкомпьютерного моделирования» (Таруса, база «Интеркосмос» ИКИ РАН, 2014).

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616817.

Личный вклад автора заключается в разработке основных теоретических положений, выносимых на защиту. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач и разработке алгоритмов. Автором решались задачи проведения экспериментов и разработки компонент программного обеспечения. Все представленные в диссертации положения, выносимые на защиту, получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения из списка использованной литературы из 188 наименований, а также приложения. Объем диссертации составляет 128 страниц машинописного текста, общий объем диссертации составляет 167 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность диссертационной работы. Сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, сведения об апробации, реализации и внедрении результатов работы, сведения о публикациях. Приведены сведения об объеме и структуре работы.

В главе 1 описываются актуальные проблемы управления данными параллельной программы в высокопроизводительной вычислительной сети, показано место задачи АЗД, приводится содержательное описание задачи, рассматриваются ее частные случаи, проводится обзор известных алгоритмов решения рассматриваемой задачи и ее частных случаев.

В Главе 2 формализуется задача АЗД, содержательно описанная в первой главе. Описываются математические объекты, возникающие в результате формализации исходных данных и решения задачи, формулируются ограничения и критерии оптимизационной задачи. Рассматриваются некоторые частные случаи задачи АЗД, сводящиеся к известным задачам комбинаторной оптимизации.

В основу математической модели исходных данных параллельной программы предлагается положить неориентированный взвешенный граф $G(V, E, c, u)$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ – множество вершин, моделирующее данные параллельной программы, каждая вершина представляет неделимую единицу данных, которую можно передать на любой вычислитель для выполнения расчета, $E \subseteq V^{(2)}$ – множество ребер, моделирующее зависимости по данным между исходными данными программы; веса вершин $c: V \rightarrow N$ моделируют относительные вычислительные издержки на выполнение расчета определенной единицы данных программы; веса ребер $u: E \rightarrow N$ моделируют объем коммуникаций между единицами данных параллельной программы.

Модель вычислительной системы представлена взвешенным гиперграфом $H(Y, A, p, w)$, где $Y = \{y_1, \dots, y_k\}$ – множество вершин, моделирующих вычислители системы; $A \subseteq 2^Y$ – множество гиперребер, моделирующих

коммуникационные связи между вычислителями; веса вершин $p: Y \rightarrow (0,1]$ моделируют относительную производительность вычислителей, где $\sum_{i=1}^k p_i = 1$; веса гиперребер $w: A \rightarrow N$ определяют скорость пересылки данных (в общем случае может быть вектор характеристик коммуникационной среды: способ передачи, время подготовки, скорость передачи данных, время передачи служебной информации и др.).

Структура вычислительной сети детализируется в гиперграфовой модели, из которой можно извлечь информацию о производительности вычислителей, о структуре их соединения, о расположении и характеристиках коммуникационных устройств, о методах передачи данных и алгоритмах маршрутизации, используемых коммуникационными устройствами, о физическом расположении устройств и т.п.

Математическая модель АЗД включает информацию о «стоимости» (скорость, время) передачи данных между вычислителями. Такая информация в явном виде не содержится в гиперграфовой модели, но её можно рассчитать. Стоимость передачи данных между парой вычислителей зависит от методов передачи данных, используемых коммуникационными устройствами, с помощью которых будет транслироваться информация, от характеристик этих устройств, от длины маршрута, что в свою очередь зависит от маршрута, найденного алгоритмом маршрутизации. Это позволяет по гиперграфовой модели вычислительной системы получить её матричное представление $S = (s_{ij})_{k \times k}$, где элементы матрицы $s_{ij} \in N, i, j = \overline{1, k}$ являются коэффициентами линейной аппроксимации (интерполяции) функции зависимости временных затрат на пересылку от объема пересылаемых данных.

Решением задачи АЗД является матрица $X = \{x_{ij}\}_{n \times k}$, где элемент

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } v_i \text{ назначена на процессор } u_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Естественным ограничением на решение является требование, чтобы каждая вершина графа данных программы была назначена ровно на один вычислитель:

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} = 1, i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Равномерность загрузки с технической точки зрения означает, что все процессоры выполняют расчет на распределенных данных параллельно и заканчивают вычисления одновременно в рамках некоторой фазы. В случае, если какие-либо процессоры выполняют расчет дольше, то для синхронной схемы организации параллельного расчета это означает простой остальных процессоров. В этом случае решение поставленной задачи должно отвечать ограничению баланса, чтобы вычислители были загружены равномерно. Рассчитаем вычислительную нагрузку на каждый вычислитель:

$$L_j(X) = \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot c_i, j = \overline{1, k}. \quad (2)$$

Рассчитаем идеальную вычислительную нагрузку, обеспечивающую одновременное завершение работы всех вычислителей:

$$\tilde{L}_j(X) = p_j \sum_{i=1}^n c_i, j = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Введем действительные параметры $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \geq 0$, которые определяют величину допустимого дисбаланса в загрузке вычислителей с учетом их производительности.

Потребуем, чтобы максимальное отклонение загрузки от идеального не превысило заранее заданного порога:

$$\max_{j=1, k} \left| \frac{L_j(X)}{\tilde{L}_j(X)} - 1 \right| \leq \varepsilon_1, \varepsilon_1 \geq 0. \quad (4)$$

Запишем ограничение на среднее отклонение нагрузки от идеального значения:

$$\sum_{j=1}^k \left| \frac{L_j(X)}{\tilde{L}_j(X)} - 1 \right| \leq \varepsilon_2, \varepsilon_2 \geq 0. \quad (5)$$

При $\varepsilon_1 = 0, \varepsilon_2 = 0$ получаем требование идеально сбалансированного разбиения. Далее в работе при упоминании об ограничениях (4) и (5) будем обозначать заранее заданный порог просто ε .

Целесообразно применять ограничение (4) в случае синхронной модели организации коммуникаций, поскольку оно требует, чтобы отличие во времени работы вычислителей было небольшим. Ограничение (5) рекомендуется применять при асинхронной модели организации коммуникаций.

Критерии задачи АЗД связаны с балансировкой загрузки вычислителей и минимизацией межпроцессорных коммуникаций.

Минимаксный критерий (6) и аддитивный критерий (7) нацелены на минимизацию дисбаланса относительной загрузки вычислителей:

$$\max_{j=1,k} \left| \frac{L_j(X)}{\tilde{L}_j(X)} - 1 \right| \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^k \left| \frac{L_j(X)}{\tilde{L}_j(X)} - 1 \right| \rightarrow \min. \quad (7)$$

Помимо требований, связанных с балансом, общее время работы параллельной программы определяется временными затратами на межпроцессорные пересылки. Как правило межпроцессорные коммуникации в параллельной программе возникают между теми процессорами, на которые распределены зависимые между собой данные программы, которые описываются графовой моделью. На практике очень сложно, а зачастую практически невозможно спрогнозировать: точное время каждой коммуникации; возникновение коллизий на уровне сетевых устройств; снижение пропускной способности каналов в связи с повышением интенсивности обменов; маршрутов, по которым происходит передача пакетов. Все это значительно снижает адекватность применения модели в терминах планирования коммуникационных обменов. С практической точки зрения удобнее оперировать оценками затрат на всю совокупность коммуникационных обменов.

В качестве оценок затрат на межпроцессорные коммуникации параллельной программы будем использовать интервальную модель. Случай, когда все обмены происходят одновременно и не конфликтуют, означает, что достигается нижняя оценка времени выполнения программы. Потребуем минимизации этой оценки в критерии (8):

$$F_1(X) = \max_{i,j=1,k} s_{ij} \sum_{l=1}^n \sum_{d=1}^n x_{li} \cdot x_{dj} \cdot u_{ld} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Случай, когда все обмены конфликтуют друг с другом и происходят последовательно, является верхней оценкой. В данном случае имеет место аддитивный критерий (9):

$$F_2(X) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k s_{ij} \sum_{l=1}^n \sum_{d=1}^n x_{li} \cdot x_{dj} \cdot u_{ld} \rightarrow \min. \quad (9)$$

В практической части работы рассматривается задача АЗД с балансными ограничениями (1), (4) и критериями (7) и (9) в лексикографии (9, 7). Приоритет коммуникационного критерия объясняется тем, что предельная нагрузка процессоров отражена в ограничении.

С практической точки зрения представляют интерес два частных случая АЗД, которые могут быть сведены к задаче декомпозиции графа и к квадратичной задаче о назначениях. Первый случай, когда имеет место гомогенная вычислительная система с равномошными процессорами и одинаковыми затратами на передачу данных между любой парой вычислителей, получаем классическую задачу сбалансированного k-разбиения графа (СРГ).

В случае, когда число частей данных параллельной программы и число вычислителей одинаково, при этом вычислители равномошны, вычислительные издержки на обработку данных одинаковы, но затраты на передачу данных между вычислителями и объемы зависимостей по данным между частями программы различаются, получаем квадратичную задачу о назначениях (КЗН).

Обозначенные частные случаи АЗД в общем случае являются NP-трудными, из чего можно сделать вывод о NP-трудности общей задачи АЗД.

В Главе 3 подробно описаны предлагаемые многоуровневые методы решения задачи АЗД. Представлены идеи и общая структура методов. Исходными данными задачи АЗД являются две графовые структуры – граф данных программы и граф топологии ВС. В работе предлагаются два метода – первый основан на редукции графа данных программы и позволяет решать задачу АЗД путем ее сведения к КЗН, второй метод связан с редукцией исходных данных КЗН и ее решением.

На базе представленных методов разработан многоуровневый алгоритм, который последовательно упрощает решаемую задачу посредством редукции исходных данных. Так на первом этапе (рис. 1, этап 1) предлагается отказаться от информации о производительности процессоров и стоимости передачи данных между ними, что позволяет рассматривать задачу в терминах равномерного распределения вершин графа данных по вычислителям. Решение этой частной задачи группирует элементы графа данных параллельной программы по подграфам (рис. 1, этап 2) и позволяет локализовать интенсивные обмены данными в рамках одного вычислительного узла.

После решения задачи разбиения восстанавливается информация о стоимости передачи данных между процессорами, и рассматривается задача назначения подграфов разбиения на процессоры, которая формулируется в виде КЗН (рис. 1, этап 3). Матрица $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ассоциируется с интенсивностью коммуникаций между ветками параллельной программы, матрица $B = (b_{ij})_{n \times n}$ описывает затраты на межпроцессорные коммуникации. Решением задачи является перестановка p , которая ставит в соответствие i -ой части программы процессор $p(i)$. Целью задачи является минимизация суммарных издержек на

пересылку данных:
$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{p(i)p(j)} \rightarrow \min.$$

В случае, когда размеры КЗН велики для применения качественных методов решения, предлагается осуществлять редукцию исходных матриц задачи. Для этого соответствующие матрицам графы сначала разбиваются на одинаковое число частей. Далее происходит переход к новым графам, в которых каждая вершина ассоциируется с подграфом разбиения, а ребро между двумя вершинами-подграфами существует в том случае, если в исходном графе

есть ребра, связывающие соответствующие подграфы, а вес ребра определяется как сумма весов ребер, связывающих соответствующие подграфы. На основе полученных редуцированных графов строится новая КЗН, размер которой позволяет использовать качественные алгоритмы ее решения (рис. 1, этап 4).

В результате решения этой задачи связанные друг с другом подграфы назначаются на «близкие» вычислители в рамках физической топологии вычислительной сети, тем самым снижая обобщенные издержки на межпроцессорные коммуникации (рис. 1, этап 5).

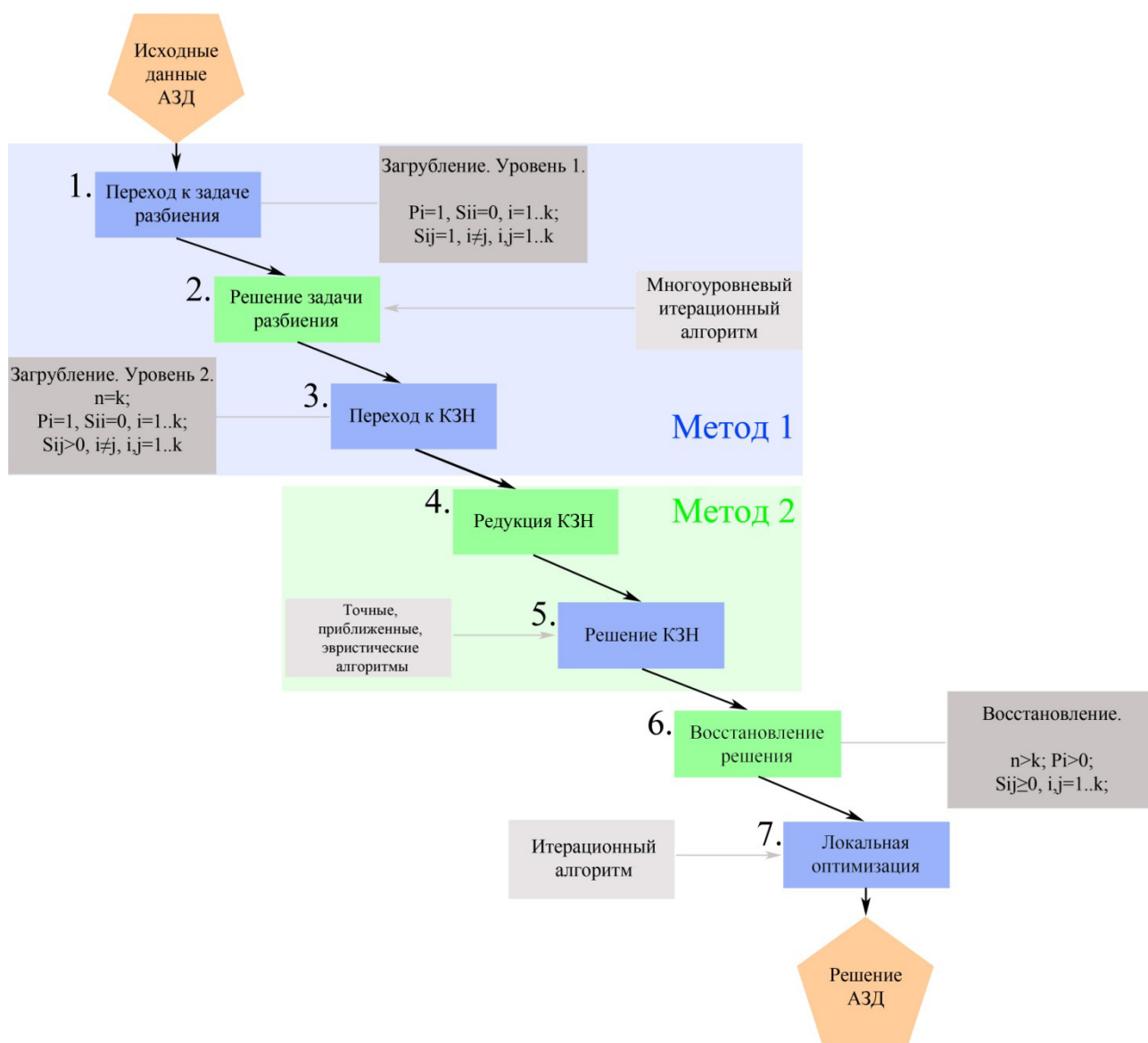


Рисунок 1. Многоуровневая схема решения задачи AZD

Следует отметить, что на ранее обозначенных этапах не учитывался такой аспект вычислительных систем, как различная производительность

процессоров. В результате синтезированное решение задачи отображения графа в общем случае может не удовлетворять ограничению (4). Для преодоления этой проблемы на последних этапах происходит полное восстановление информации о характеристиках вычислительной системы (рис. 1, этап 6), и выполняется локальная оптимизация найденного решения с точки зрения требования задачи АЗД (рис. 1, этап 7).

Из представленной схемы видно, что на разных некоторых этапах многоуровневой схемы возникают разные задачи, для которых используются собственные методы их решения. Так, на этапах 2 и 4 требуется решать задачи СРГ, на этапе 5 – КЗН, для решения которой в работе предложены точный, приближенный и эвристические методы, выбор которых зависит от размера КЗН. На этапах 6 и 7 используются разные стратегии восстановления и локальной оптимизации решений. В результате вариация методов решения задач на разных этапах, порождает конкретный многоуровневый алгоритм решения исходной задачи АЗД.

В качестве метода решения КЗН был использован метод ветвей и границ, при этом предложен способ вычисления нижней оценки, который сводился к решению трех задач о назначениях с линейным критерием. Предлагается модификация точного алгоритма для поиска приближенного решения и предложены генетические алгоритмы на порядковом и бинарном представлении решений, позволяющие решать задачи средних размеров, а также эксплуатироваться для вычисления верхних оценок в методе ветвей и границ. Для решения задач больших порядков предлагается осуществлять дополнительный этап редукции, основанный на разбиении обоих графов на одинаковое число частей. Это позволяет перейти к графам приемлемых порядков – в новых редуцированных графах каждая вершина ассоциируется с подграфом разбиения, а ребро между двумя вершинами-подграфами существует в том случае, если в исходном графе есть ребра, связывающие соответствующие подграфы, вес ребра определяется как сумма весов ребер, связывающих соответствующие подграфы.

В классическом генетическом алгоритме на порядковом представлении каждая особь является перестановкой, моделирующей решение задачи. В

отличии от классической схемы генетический алгоритм на бинарном представлении является улучшающим – он на вход получает начальное решение, а хромосомы кодируют переход от начального решения к новому решению. В результате генетический поиск сконцентрирован на исследовании окрестности начального решения. Замена начального решения происходит при обнаружении лучшего решения.

Глава 4 посвящена программной реализации и апробации предложенного алгоритма. Приводится описание основных аспектов ее реализации, описана структура хранения данных, контракты основных функций, параметры и режимы запуска системы.

Для оценки предложенных алгоритмов решения квадратичной задачи о назначениях использовались стандартные тестовые примеры из публичной библиотеки QAPLIB и графы из известных публичных коллекций университетов Флориды и Гринвича. В качестве моделей вычислительных сетей использованы архитектуры FatTree и гибридной архитектуры с различными производительностями вычислителей.

С помощью тестового эксперимента были подобраны параметры разработанного алгоритма, и было проведено сравнение реализованного алгоритма с коммерческим аналогом (Scotch, версия 6.0.1). Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что в среднем выигрыш по качеству найденных решений предложенных многоуровневых методов составил порядка 12,6%.

В четвертой главе также сформулированы особенности практической эксплуатации созданных программных решений. Ключевые проблемы внедрения подобных систем в реальную практику лежат в плоскости сбора исходных данных. Например, современные инструменты инженерного анализа, как правило, хранят данные, нуждающиеся в декомпозиции в известных форматах. Однако, извлечение и описание характеристик вычислительной сети сопряжено с большими трудностями, и для их преодоления предложены и описаны простые способы вычисления показателей, а также предложено компактное иерархическое представление топологии и характеристик вычислительной сети. Кроме этого создан инструмент, позволяющий

автоматически сформировать коммуникационную матрицу и вектор производительностей.

В заключении сформулированы основные результаты работы. В диссертационном исследовании рассмотрена актуальная задача архитектурно-зависимой декомпозиции, относящаяся к классу оптимизационных задач на графах. Благодаря проведенному исследованию получены основные результаты:

1. Построена математическая модель задачи архитектурно-зависимой декомпозиции, в рамках которой поставлены различные оптимизационные задачи на гиперграфах. Предложена гиперграфовая модель вычислительной системы, позволяющая наиболее точно отразить топологию и коммуникационные характеристики вычислительной сети. Предложено ее матричное представление.

2. Разработана методология извлечения и представления данных предметной области в терминах модели АЗД. В отличие от известных представлений структуры вычислительной сети в виде взвешенных графов, предложено иерархическое описание структуры вычислительной сети, что позволяет компактно и в достаточной степени детализации описать вычислительную инфраструктуру.

3. Разработаны алгоритмические средства решения задач АЗД: предложены многоуровневые методы (метод редукции графа данных программы и метод редукции графа топологии вычислительной системы) и многоуровневый алгоритм решения общей задачи АЗД, которые на разных уровнях иерархии обеспечивают возможность использовать точных, приближенных и эвристических алгоритмов; алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ; генетические алгоритмы, в том числе улучшающий генетический алгоритм на бинарном представлении; создан итерационный алгоритм локальной оптимизации.

4. Создана программная библиотека разработанных алгоритмов решения задач АЗД, а также форматы представления исходных данных задачи.

В приложении приводятся свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, справка о внедрении результатов диссертационной работы в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пример XML-документа, описывающего топологию вычислительной сети, тестовые задачи.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Старостин, Н.В. Генетические алгоритмы решения задачи отображения графа [Текст] / Н.В. Старостин, *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 5 (1), 2013. – с. 204-209
2. Панкратова (Быкова), М.А. Гибридные схемы решения задачи отображения параллельной программы на вычислительную сеть [Текст] / *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Системы управления и информационные технологии, №3(61), 2015. – с. 64-70
3. Старостин, Н.В. Метод ветвей и границ решения квадратичной задачи о назначениях с приложениями в области высокопроизводительных вычислений [Текст] / Н.В. Старостин, *М.А. Быкова*. – Системы управления и информационные технологии, №1(67), 2017. – с. 13-18

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Программа решения задачи архитектурно-зависимой декомпозиции / Старостин Н.В., *Быкова М.А.* (Россия); правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (Нижегород) – №2017616817; дата поступления 25.04.2017; дата регистрации 15.06.2017

Публикации в других научных изданиях:

5. Панкратова (Быкова), М.А. Трассировка соединений интегральных схем на основе матричных кристаллов [Текст] / *М.А. Панкратова (Быкова)*. – V Межвузовский сборник научных трудов «Прикладная информатика и математическое моделирование», Москва, 2011. – с. 70-75
6. Панкратова (Быкова), М.А. Отображение виртуальной топологии параллельной задачи на физическую топологию процессоров суперкомпьютера [Текст] / *М.А. Панкратова (Быкова)*. – VI Межвузовский сборник научных

трудов «Прикладная информатика и математическое моделирование», Москва, 2012. – с. 128-133

7. Старостин, Н.В. Отображение графа параллельной программы на граф вычислительной сети [Текст] / Н.В. Старостин, *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах. Материалы XII Всероссийской конференции, Н. Новгород, 2012. – с.397-398

8. Панкратова (Быкова), М.А. Отображение параллельной задачи на вычислительную систему методом рекурсивной бисекции графа [Текст] / *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции «Будущее технической науки». Нижний Новгород, 2013. – с. 46-47

9. Панкратова (Быкова), М.А. Генетические алгоритмы назначения параллельной программы на узлы вычислительной сети [Текст] / *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Российские чтения-конкурс памяти нижегородских ученых, 2013. – с.146-149

10. Старостин, Н.В. Отображение графа параллельной программы на граф вычислительной сети [Текст] / Н.В. Старостин, *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», 2013. – с. 316-317

11. Starostin, N.V. Mapping of the Graph of a Parallel Program to the Graph of a Computing System [Text] / N.V. Starostin, *М.А. Pankratova (Bykova)*. – Proceedings of the international conference “Numerical Computations: Theory and Algorithms”, Italy, Falerna, 2013. – P.107

12. Панкратова (Быкова), М.А. Метод ветвей и границ для решения задачи отображения графа [Текст] / *М.А. Панкратова (Быкова)*. – Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», 2014. – с. 305-306

13. Старостин, Н.В. Технология планирования вычислительных ресурсов в параллельной среде [Текст] / Н.В. Старостин, *М.А. Панкратова (Быкова)*, Д.В. Седаков – Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах, Материалы XIV Международной конференции,

Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2014. – с. 407-414

14. Старостин, Н.В. Архитектурно-зависимая декомпозиция в методиках суперкомпьютерного моделирования [Текст] / Н.В. Старостин, М.А. Панкратова (Быкова). – Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. Под ред. Р.Р. Назирова, Л.Н.Щура. 2014. – с.146-153

15. Панкратова (Быкова), М.А. Многоуровневый алгоритм решения задачи архитектурно-зависимой декомпозиции [Текст] / М.А. Панкратова (Быкова). – Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», 2015. – с. 280-281

16. Старостин, Н.В. Многоуровневые алгоритмы декомпозиции графа данных для параллельных вычислений на гетерогенной вычислительной системе [Текст] / Н.В. Старостин, М.А. Панкратова (Быкова). – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. Т. 1, 2016. – с. 60-68.