

УЧЕБНАЯ РАБОЧАЯ ПРОГРАММА по общему курсу "Многопроцессорные системы и параллельное программирование"

для студентов, обучающихся по программе подготовки
бакалавров физико-математических наук по направлению
"Прикладная математика и информатика"

Курс третий
Семестр пятый
Практические и лабораторные занятия 36 часов
Зачет 5 семестр

Программа разработана профессором кафедры математического обеспечения ЭВМ факультета вычислительной математики и кибернетики Нижегородского государственного университета доктором технических наук В.П. Гергелем.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА

1. Цель преподавания курса

Потребность решения сложных прикладных задач с большим объемом вычислений и принципиальная ограниченность максимального быстродействия "классических" - по схеме фон Неймана - ЭВМ привели к появлению многопроцессорных вычислительных систем (МВС). Использование таких средств вычислительной техники позволяет существенно увеличивать производительность ЭВМ при любом существующем уровне развития компьютерного оборудования. При этом, однако, необходимо "параллельное" обобщение традиционной - последовательной - технологии решения задач на ЭВМ. Так, численные методы в случае МВС должны проектироваться как системы параллельных и взаимодействующих между собой процессов, допускающих исполнение на независимых процессорах. Применяемые алгоритмические языки и системное программное обеспечение должны обеспечивать создание параллельных программ, организовывать синхронизацию и взаимоисключение асинхронных процессов и т.п.

Предметом рассмотрения настоящего курса и является изучение перечисленного круга вопросов. Цель курса состоит в изложении математических моделей и методов параллельного программирования для многопроцессорных вычислительных систем.

2. Задачи курса

Использование многопроцессорных вычислительных систем предполагает практическое освоение следующих разделов параллельного программирования:

- Архитектурные принципы реализации параллельной обработки в вычислительных машинах;
- Методы и языковые механизмы конструирования параллельных программ;
- Параллельные вычислительные методы.

Изучение перечисленных тем достигается наличием в настоящем курсе следующего набора разделов:

- Цели и задачи параллельной обработки данных.
- Принципы построения параллельных вычислительных систем.

- Моделирование и анализ параллельных вычислений.
- Принципы разработки параллельных алгоритмов и программ.
- Системы разработки параллельных программ.
- Параллельные численные алгоритмы для решения типовых задач вычислительной математики.

Выполнение практических заданий по разработке параллельных алгоритмов и программ осуществляется на высокопроизводительном вычислительном кластере Нижегородского университета.

3. Дисциплины, изучение которых необходимо при освоении данного курса

Изложение курса опирается на основные курсы "ЭВМ и программирование", "Архитектура ЭВМ". Предполагается наличие у обучаемых общих сведений по курсам "Дискретная математика", "Методы вычислений", "Операционные системы". При выполнении практических и лабораторных заданий обучаемые должны владеть методами программирования на алгоритмическом языке С.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Цели и задачи введения параллельной обработки данных

1.1. Необходимость

Ограничение максимальной производительности однопроцессорных ЭВМ. Постоянная необходимость решения задач, превышающих возможности современных ЭВМ (проблемы "большого вызова"). Необходимость коллективного режима решения задач. Автоматизация управления распределенных технических систем. Технические требования по снижению стоимости и повышению надежности.

1.2. История введения параллелизма (ENIAC, IBM-701, 704, 709, ATLAS, CDC 6600, 7600, ILLIAC IV, Cray-1, Эльбрус)

1.3. Различие многозадачных, параллельных и распределенных вычислений

1.4. Проблемы использования параллелизма

Существование последовательных алгоритмов (закон Амдаля). Повышение производительности последовательных компьютеров (закон Мура). Потери на взаимодействие и передачу данных (гипотеза Минского). Высокая стоимость параллельных систем (закон Гроша). "Последовательность" существующих алгоритмов и программного обеспечения. Зависимость эффективности параллельных вычислений от учета особенностей аппаратуры. Сложность разработки параллельных алгоритмов. Трудоемкость проверки правильности параллельных программ.

2. Принципы построения параллельных вычислительных систем

2.1. Пути достижения параллелизма

Функциональные вычислительные устройства. Многоуровневая и модульная память. Конвейерные и векторные вычисления. Процессорные матрицы. Многопроцессорные вычислительные системы с общей и распределенной памятью (мультипроцессоры и мультикомпьютеры). Микропроцессорные системы.

2.2. Способы построения многопроцессорных вычислительных систем

Схемы коммутации (полная коммутация - общая память, перекрестные коммутаторы, локальные схемы коммутации - общая шина, решетки, кластеры). Анализ параллельных алгоритмов и типовые топологии схем коммутации – кольцо, линейка, решетки, полный граф, гиперкуб, тор, дерево. Аппаратная реализация и программная эмуляция топологий.

2.3. Виды параллельных вычислительных систем

СуперЭВМ. Многопроцессорные вычислительные комплексы (МВС). Многомашинные вычислительные комплексы. Сети ЭВМ.

Примеры современных высокопроизводительных вычислительных систем (Cray T932, IBM SP2, HP Exemplar, ASCI RED). Суперкомпьютерные вычислительные системы в России.

2.4. Классификация МВС

Систематики Флинна и Шора. Потоки данных (команд). Структурная нотация Хокни и Джесхоупа.

2.5. Оценка производительности МВС

Общее выражение для оценки производительности для разного типа МВС. Максимальная (пиковая) производительность. Степень параллелизма (длина полупроизводительности). Удельная производительность. Значения показателей для ряда МВС.

3. Моделирование и анализ параллельных вычислений

3.1. Модели параллельных вычислительных систем

Компьютер с неограниченным параллелизмом (паракомпьютер). Модели многопроцессорных систем с общей и распределенной памятью. Модель конвейерной системы.

3.2. Модель алгоритма в виде графа "операнд - операции"

Представление алгоритма в виде графа потока данных. Расписание параллельных вычислений. Показатель временной сложности алгоритма. Оценка времени выполнения алгоритма для паракомпьютера (предельное распараллеливание) и для систем с конечным количеством процессоров. Зависимость оценок от топологии графа алгоритма и необходимость оптимизации структуры графа. Способы получения оптимального расписания вычислений.

3.3. Модель параллельных вычислений в виде сети Петри

Основные понятия теории сетей Петри. Использование сетей Петри для описания параллельных вычислений. Демонстрация основных проблем параллельных вычислений: синхронизация, взаимное исключение, блокировка (тупики).

3.4. Модель параллельных вычислений в виде графа "процесс-ресурс"

Понятие процесса. Синхронизация параллельных процессов. Аппарат событий. Пример реализации в операционной системе Unix.

Взаимоисключение параллельных процессов. Концепция ресурса. Механизмы взаимного исключения: алгоритм Деккера, семафоры (Дейкстра), мониторы (Вирт). Примеры решения стандартных задач взаимного исключения: кольцевой буфер, проблема "читатели и писатели".

Взаимодействие параллельных процессов посредством механизма передачи сообщений. Механизмы передачи: очереди, почтовые ящики, порты. Принцип рандеву в языках Ада и ОККАМ.

Проблемы взаимодействия процессов. Понятие тупика и условия его возникновения. Предотвращение тупиков. Алгоритм банкира. Обнаружение тупиков и восстановление состояния процессов.

Многозадачный режим работы ЭВМ как частный случай параллельной обработки.

4. Принципы разработки параллельных алгоритмов и программ

4.1. Оценка эффективности параллельных вычислений

Показатель эффекта распараллеливания (ускорение). Эффективность использования вычислительной системы. Способы оценки показателей. Основные характеристики вычислительной системы, влияющие на величины ускорения и эффективности (архитектура, количество процессоров, топология каналов передачи данных).

4.2. Оценка коммуникационной трудоемкости параллельных алгоритмов

Характеристики топологий сети передачи данных. Алгоритмы маршрутизации. Методы передачи данных.

Анализ трудоемкости основных операций передачи данных. Передача данных между двумя процессорами сети. Одиночная и множественная рассылка сообщений. Операция циклического сдвига.

Методы логического представления топологии коммуникационной среды. Отображение кольцевой топологии и топологии решетки на гиперкуб.

4.3. Уровни распараллеливания вычислений

Распараллеливание вычислений на уровне команд, выражений, программных модулей, отдельно выполняемых заданий.

4.4. Этапы построения параллельных алгоритмов и программ

Выбор параллельного алгоритма. Реализация алгоритма в виде параллельной программы. Построение исполняемой программы для параллельной вычислительной системы. Параллельное исполнение машинной программы. Частные постановки: выбор оптимального алгоритма для конкретной вычислительной системы, нахождение наилучшей топологии вычислительной системы для решения определенной задачи, распараллеливание существующего алгоритма.

4.5. Технологические аспекты распараллеливания

Декомпозиция алгоритма на параллельно исполняемые фрагменты вычислений. Распределение заданий по процессорам и балансировка. Синхронизация и взаимоисключение. Организация взаимодействия.

5. Системы разработки параллельных программ

5.1. Создание специализированных языков программирования

Алгоритмический язык ОККАМ. Общая характеристика транспьютера. Концепция процесса в ОККАМ. Методы конструирования агрегированных процессов. Принципы передачи данных между процессами. Пример программ на алгоритмическом языке ОККАМ.

5.2. Расширение существующих языков программирования

Общая характеристика параллельных расширений алгоритмического языка Фортран. Автоматическая векторизация и распараллеливание. Проблемно-ориентированные компиляторы.

Общая характеристика стандарта OpenMP. Создание параллельных областей. Разделение вычислительной нагрузки между потоками. Работа с данными. Синхронизация. Функции и переменные окружения. Сравнительная характеристика подходов параллельного программирования для систем с распределенной и общей памятью.

5.3. Разработка специализированных библиотек

Система PVM. Концепция параллельной виртуальной вычислительной машины и ее представление в виде распределенной неоднородной системы компьютеров.

Представление программной системы на виртуальной машине. Основные программные примитивы системы PVM. Пример использования.

Система MPI. Общая характеристика. Поддержка модели взаимодействия параллельных вычислителей при помощи передачи сообщений. Основные программные примитивы системы MPI. Пример использования.

Организация вычислений на многопроцессорной системе Parsytec PowerXplorer. Использование технологии кросс эмуляции при разработке параллельных программ. Концепция виртуальных процессоров и каналов передачи данных. Виртуальные топологии системы: кольцо, линейка, звезда, решетка, дерево. Основные программные примитивы. Пример использования.

6. Параллельные численные алгоритмы для решения типовых задач вычислительной математики

6.1. Общие способы распараллеливания алгоритмов

Выявление функциональной независимости отдельных фрагментов алгоритма (параллелизм команд). Геометрическое разделение вычислений (параллелизм данных). Иерархическая декомпозиция обработки данных.

6.2. Организация параллельного исполнения рекурсивных вычислений

Проблема рекурсивной зависимости этапов обработки данных. Каскадная схема. Подход для получения асимптотически ненулевой эффективности. Метод Оутса. Пример для вычисления частичных и общей сумм.

6.3. Параллельные численные алгоритмы линейной алгебры

Способы разбиения матриц (горизонтальная, вертикальная, блочные схемы). Методы вычисления произведения матриц с использованием разных схем разбиения матриц. Обеспечение предельно допустимого параллелизма. Обращение матриц. Параллельные методы решения систем линейных уравнений.

6.4. Параллельные численные алгоритмы решения дифференциальных уравнений в частных производных

Параллельная реализация прямых и итерационных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных. Анализ разностных схем для эффективного разделения области определения решаемых задач.

6.5. Параллельные численные алгоритмы многомерной многоэкстремальной оптимизации

Характеристическая схема представления методов глобального поиска. Общий принцип распараллеливания методов. Оценка эффективности введения параллелизма: эффективность и безызбыточность. Синхронные и асинхронные варианты алгоритмов. Определение наилучших топологий вычислительной системы для реализации методов.

Лабораторный практикум

Часть 1. Методы параллельного программирования для вычислительных систем с распределенной памятью

1. Разработка параллельных программ с использованием интерфейса передачи сообщений MPI - 2 часа

Мини-MPI (старт, финиш, передача и прием сообщений).

Пример 1: Начальная параллельная программа (печать идентификаторов процессов) - запуск (локальный, распределенный). Оценка времени выполнения программы, синхронизация, коллективные операции.

Пример 2: Численное интегрирование- создание проекта на основе готового исходного текста программы, настройка опций, компиляция, запуск.

Пример 3: Скалярное произведение векторов (*самостоятельное задание 1*).

2. Практикум по разработке параллельных алгоритмов и программ для решения задач вычислительной математики - 6 часов

Обзор библиотеки MPI: установка, настройка, схема функционирования.

Пример 4: Решение задач распознавания образов (выполнение задания под руководством преподавателя).

Пример 5: Умножение матриц, ленточный алгоритм (*самостоятельное задание 2*).

Пример 6: Умножение матриц, блочные схемы распределения данных (*алгоритмы Фокса и Кеннона*).

3. Практикум по использованию библиотек параллельных методов ParaLib для решения задач вычислительной математики - 4 часа

Обзор библиотеки ParaLib: назначение, классы решаемых задач, принципы разработки.

Пример 7. Функции библиотеки ParaLib для умножения матриц при блочном способе распределения данных" (*алгоритмы Фокса и Кеннона*): схема реализации, теоретическая оценка эффективности, вычислительные эксперименты.

Анализ интенсивности потоков передачи данных, осуществляемых в ходе параллельных вычислений в системах с распределенной памятью, с использованием инструментальной библиотеки ParaScope.

4. Практикум по оценке эффективности параллельных методов для разных топологий многопроцессорных вычислительных систем - 4 часа

Характеристика программной лаборатории ParaLab как интегрированной системы для проведения вычислительных экспериментов с параллельными методами для оценки их эффективности:

- Моделирование многопроцессорных вычислительных систем (выбор топологии, задание количества и производительности процессоров, выбор метода передачи данных и задание коммуникационных характеристик сети),
- Определение класса решаемых задач и задание параметров задачи,
- Выбор параллельного метода решения задачи и настройка значений его параметров,
- Установка графических индикаторов для наблюдения за процессом параллельных вычислений (состояние данных на процессорах системы, передача информации по сети, текущая оценка решения исходной вычислительной задачи),
- Проведение экспериментов в режиме имитации вычислений; пошаговый, последовательный (непрерывный) и циклический (серийный) способы проведения

экспериментов; одновременное выполнение нескольких экспериментов в режиме разделения времени для разных вариантов топологии вычислительной системы, параметров задачи, количества процессоров и т.п.,

- Анализ результатов с использованием сведений из журнала экспериментов; оценка времени решения задач в зависимости от размерности задачи и количества процессоров; построение зависимостей ускорения и эффективности параллельных вычислений,

- Проведение экспериментов в режиме реальных параллельных вычислений; выполнение параллельных программ в виде множества независимых процессов на одном процессоре; удаленный доступ к многопроцессорной вычислительной системе (кластеру); сравнение теоретических оценок и результатов реальных вычислительных экспериментов.

Часть 2. Методы параллельного программирования для вычислительных систем с общей памятью

5. Разработка параллельных программ с использованием технологии OpenMP - 2 часа

Общая характеристика технологии OpenMP: потоки, параллельные области, распределение вычислений между потоками.

Пример 8: Скалярное произведение векторов. Глобальные и локальные данные потоков. Критические секции доступа к разделяемым данным. Синхронизация.

Пример 9. Умножение матриц (*варианты распараллеливания вложенных циклов, самостоятельное задание 3*).

6. Практикум по разработке параллельных алгоритмов и программ для решения задач вычислительной математики - 6 часов

Пример 10. Параллельная сортировка: алгоритмы пузырьковой сортировки, сортировки Шелла и быстрой сортировки (выполнение задания под руководством преподавателя).

Пример 11. Задачи обработки графов: построение минимального охватывающего дерева, поиск кратчайших путей (*самостоятельное задание 4*)

Часть 3. Методы параллельного программирования для решения вычислительно-трудоемких научно-технических задач

7. Практикум по методам параллельных вычислений для решения дифференциальных уравнений в частных производных -4 часа

Общая характеристика *методом конечных разностей (метод сеток)* для численного решения дифференциальных уравнений.

Методы распараллеливания метода конечных разностей для вычислительных систем с общей памятью (организация взаимоисключения для оценки погрешности решения, избыток синхронизации, проблема сериализации и блокировки, обеспечение тождественности последовательного и параллельного вариантов расчетов, волновые схемы вычислений, блочная схема распределения данных, балансировка, использование очереди заданий).

Методы распараллеливания метода конечных разностей для вычислительных систем с распределенной памятью (ленточная и блочная схемы распределения данных, волновые схемы вычислений, оценка трудоемкости передачи данных).

Практикум по решению дифференциальных уравнений в частных производных с использованием учебно-исследовательской системы ParaGrid (постановка задачи,

выполнение вычислений, визуализация данных, анализ результатов расчетов, изменение параметров и продолжение вычислений).

8. Практикум по использованию библиотек параллельных методов для решения сложных научно-технических задач - 4 часа

Обзор библиотеки PLAPACK: структура, объекты, методы, использование.

Пример 12: Умножение матриц - использование PLAPACK (выполнение задания под руководством преподавателя).

9. Практикум по методам параллельных вычислений для решения задач многомерной многоэкстремальной оптимизации -4 часа

Общая характеристика предметной области (постановка задачи глобальной оптимизации, редукция размерности для сведения многомерных задач к одномерным постановкам, информационно-статистические алгоритмы глобального поиска, примеры).

Использование множественных разверток типа кривой Пеано для построения различных сеток в области решения оптимизационной задачи. Сведение проблемы многомерной оптимизации к семейству одномерных информационно-совместимых задач. Параллельное решение задач порождаемого семейства и схема информационных обменов.

Общность рассмотренного подхода для решения ряда вычислительно-трудоемких научно-технических задач (интегрирование, решение систем нелинейных уравнений, восстановление зависимостей, поиск решений, оптимальных по набору критериев (многокритериальная оптимизация) и т.д.).

Практикум по решению задач многоэкстремальной оптимизации с использованием системы параллельных вычислений Абсолют Эксперт (постановка задачи, выполнение вычислений, визуализация данных, анализ результатов расчетов, изменение параметров и продолжение вычислений).

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Основная литература

1. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. - Н.Новгород, ННГУ, 2001.
2. Богачев К.Ю. Основы параллельного программирования. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
3. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. - СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
4. Немнюгин С., Стесик О. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем — СПб.: БХВ-Петербург, 2002.

Дополнительная литература

5. Березин И.С., Жидков И.П. Методы вычислений. - М.: Наука, 1966.
6. Дейтел Г. Введение в операционные системы. Т.1.- М.: Мир, 1987.
7. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 3. Сортировка и поиск. - М.: Мир, 1981.
8. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. - М.: МЦНТО, 1999.
9. Корнеев В.В.. Параллельные вычислительные системы. - М.: Нолидж, 1999.
10. Корнеев В.В. Параллельное программирование в MPI. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.

11. П.Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. -М.:Наука, 1977.
12. Хамахер К., Вранешич З., Заки С. Организация ЭВМ. - СПб: Питер, 2003.
13. Шоу А. Логическое проектирование операционных систем. - М.: Мир, 1981.
14. Andrews G.R. Foundations of Multithreading, Parallel and Distributed Programming. Addison-Wesley, 2000 (русский перевод Эндрюс Г.Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2003)
15. Barker, M. (Ed.) (2000). Cluster Computing Whitepaper <http://www.dcs.port.ac.uk/~mab/tfcc/WhitePaper/>.
16. Braeunl T. Parallel Programming. An Introduction.- Prentice Hall, 1996.
17. Chandra, R., Menon, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., McDonald, J. Parallel Programming in OpenMP. - Morgan Kaufmann Publishers, 2000
18. Dimitri P. Bertsekas, John N. Tsitsiklis. Parallel and distributed Computation. Numerical Methods. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
19. Fox G.C. et al. Solving Problems on Concurrent Processors. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.
20. Geist G.A., Beguelin A., Dongarra J., Jiang W., Manchek B., Sunderam V. PVM: Parallel Virtual Machine - A User's Guide and Tutorial for Network Parallel Computing. MIT Press, 1994.
21. Group W, Lusk E, Skjellum A. Using MPI. Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface. - MIT Press, 1994.(<http://www.mcs.anl.gov/mpi/index.html>)
22. Hockney R. W., Jesshope C.R. Parallel Computers 2. Architecture, Programming and Algorithms. - Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1988. (русский перевод 1 издания: Р.Хокни, К.Джессхоуп. Параллельные ЭВМ. Архитектура, программирование и алгоритмы. - М.: Радио и связь, 1986)
23. Kumar V., Grama A., Gupta A., Karypis G. Introduction to Parallel Computing. - The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1994
24. Miller R., Boxer L. A Unified Approach to Sequential and Parallel Algorithms. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2000.
25. Pacheco, S. P. Parallel programming with MPI. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco. 1997.
26. Parallel and Distributed Computing Handbook. / Ed. A.Y. Zomaya. -McGraw-Hill, 1996.
27. Pfister, G. P. In Search of Clusters. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 1995. (2nd edn., 1998).
28. Quinn M. J. Designing Efficient Algorithms for Parallel Computers. - McGraw-Hill, 1987.
29. Rajkumar Buyya. High Performance Cluster Computing. Volume1: Architectures and Systems. Volume 2: Programming and Applications. Prentice Hall PTR, Prentice-Hall Inc., 1999.
30. Roosta, S.H. Parallel Processing and Parallel Algorithms: Theory and Computation. Springer-Verlag, NY. 2000.
31. Xu, Z., Hwang, K. Scalable Parallel Computing Technology, Architecture, Programming. McGraw-Hill, Boston. 1998.
32. Wilkinson B., Allen M. Parallel programming. - Prentice Hall, 1999.

Учебно-методические пособия

33. Афанасьев К.Е. и др. Многопроцессорные вычислительные системы и параллельное программирование. - Кемерово: Кузбассвузиздат, 2003.
34. Головашкин Д.Л. Методы параллельных вычислений. Ч. 1. — Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002.
35. Головашкин Д., С.П. Головашкина С.П. Методы параллельных вычислений. Ч. 2: . - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2003.

36. Деменев А.Г. Параллельные вычислительные системы: основы программирования и компьютерного моделирования. - Пермь: ПГПУ, 2001.
37. Дацюк В.Н. и др. Методическое пособие по курсу "Многопроцессорные системы и параллельное программирование". - Ростов-на-Дону: РГУ, 2000.
38. Дорошенко А.Е. Математические модели и методы организаций высокопроизводительных вычислений. Киев: Наукова думка, 2000.
39. Комолкин А.В., Немнюгин С.А. Программирование для высокопроизводительных ЭВМ. - СПб: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 1998.
40. Сергеев Я.Д., Стронгин Р.Г., Гришагин В.А. Введение в параллельную глобальную оптимизацию. - Н. Новгород: ННГУ, 1998.
41. Старченко А.В., Есаулов А.О., Параллельные вычисления на многопроцессорных вычислительных системах. - Томск: ТГУ, 2002.
42. Шпаковский Г.И., Серикова Н.В. Программирование для многопроцессорных систем в стандарте MPI: Пособие - Мн.: БГУ, 2002.
43. Фурсов В.А. и др. Введение в программирование для параллельных ЭВМ и кластеров. - Самара: СНЦ РАН, СГАУ, 2000.
44. Яковлевский М.В. Распределенные системы и сети. - М.: МГТУ "Станкин", 2000.

Информационные ресурсы сети Интернет

45. Информационно-аналитические материалы по параллельным вычислениям (<http://www.parallel.ru>)
46. Информационные материалы Центра компьютерного моделирования Нижегородского университета (<http://www.software.unn.ac.ru/ccam>)
47. Информационные материалы рабочей группы IEEE по кластерным вычислениям (<http://www.ieeetfcc.org>)
48. Introduction to Parallel Computing (Teaching Course) (<http://www.ece.nwu.edu/~choudhar/C58/>)
49. Foster I. Designing and Building Parallel Programs. — Addison Wesley, 1994. (<http://www.mcs.anl.gov/dbpp>)