

# **УЧЕБНАЯ РАБОЧАЯ ПРОГРАММА по общему курсу "Алгоритмические языки и библиотеки параллельного программирования"**

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

Курс третий  
Семестр шестой  
Практические и лабораторные занятия 36 часов  
Зачет 6 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***

Использование параллельных вычислительных систем для решения вычислительно-трудоемких задач предполагает наряду со знанием математических проблем параллельных вычислений практическое освоение средств разработки параллельных программ. Эти средства обеспечивает целый спектр возможных подходов к области параллельных вычислений от использования новых специализированных языков параллельного программирования (например, языка ОККАМ) до применения "обычных" последовательных языков С и Фортран, в которых возможность разработки параллельных программ обеспечивается за счет использования технологических (инструментальных) библиотек типа MPI и PVM. Наличие такого широкого набора средств параллельного программирования обуславливается прежде всего характерными особенностями вычислительно-трудоемких задач, с учетом которых разработка программ может быть проведена более эффективно, и разнообразием существующих параллельных вычислительных систем (прежде всего многопроцессорных систем с общей и распределенной памятью).

Как результат, изучение разных средств параллельного программирования в рамках единого курса позволит получить знания по каждой конкретной технологии программирования в отдельности, сопоставить единство и различие всех рассматриваемых подходов и получить, тем самым, понимание общих принципов разработки параллельных программ.

### ***2. Задачи курса***

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

- Общая характеристика параллельных вычислительных систем,
- Принципы разработки параллельных алгоритмов и программ,
- Алгоритмический язык параллельного программирования ОККАМ,
- Алгоритмический язык Фортран HPF для параллельного программирования,

- Технология OpenMP для разработки параллельных программ для систем с общей памятью,
- Разработка параллельных программ для систем с распределенной памятью с использованием библиотеки MPI,
- Параллельные численные алгоритмы для решения вычислительно-трудоемких задач.

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" и "Многопроцессорные вычислительные системы и параллельное программирование". Предполагается наличие у обучаемых общих сведений по курсам "Архитектура ЭВМ", "Методы вычислений", "Операционные системы". При выполнении практических и лабораторных заданий обучаемые должны владеть методами программирования на алгоритмическом языке С.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **1. Общая характеристика параллельных вычислительных систем**

#### **1.1. Архитектура высокопроизводительных ЭВМ**

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.

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.

#### **1.2. Классификация многопроцессорных вычислительных систем**

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

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

Систематика Флинна. Потoki данных (команд). Конкретизация видов многопроцессорных систем: векторные компьютеры, симметричные мультипроцессоры (SMP), массивно-параллельные компьютерные системы (MPP), кластеры.

### **2. Принципы разработки параллельных алгоритмов и программ**

#### **2.1. 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).

## **2.2. 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.

## **2.3. Общие принципы построения параллельных алгоритмов и программ**

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

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.

Декомпозиция алгоритма на параллельно исполняемые блоки вычислений. Распределение заданий по процессорам и балансировка. Организация взаимодействия. Синхронизация и взаимоисключение. Передача данных между процессорами.

## **2.6. Средства разработки параллельных программ**

Использование специализированных языков параллельного программирования (ОККАМ). Применение параллельных расширений существующих алгоритмических языков (HPF). Построение параллельного программного обеспечения на основе существующих последовательных программ с использованием средств предкомпиляции (технология OpenMP). Использование технологических (инструментальных) библиотек параллельного программирования (библиотеки MPI И PVM).

Общая характеристика проблемы тестирования и отладки параллельных программ.

## ***3. Алгоритмический язык параллельного программирования ОККАМ***

### **3.1. Общая характеристика теории процессов Хоара**

Понятие процесса и его описание при помощи протоколов. Операции над протоколами. Последовательные и параллельные процессы. Моделирование недетерминизма. Описание взаимодействия процессов. Понятие разделяемых ресурсов.

### **3.2. Общая характеристика транспьютерных систем**

Особенности архитектуры транспьютера. Каналы связи. Аппаратная поддержка разделения времени между процессами. Общая структура мультитранспьютерных систем.

### **3.2. Язык параллельного программирования ОККАМ**

Концепция процесса в ОККАМ. Элементарные и составные процессы. Методы конструирования агрегированных процессов (последовательное и параллельное

исполнение, условие, выбор и селекция процессов, цикл и репликация). Принципы передачи данных между процессами при помощи каналов.

Типы данных. Описание каналов. Процедуры и функции. Работа с внешними устройствами.

Примеры программ на алгоритмическом языке ОККАМ: умножение матрицы на вектор, быстрая сортировка данных.

#### ***4. Алгоритмический язык Фортран HPF для параллельного программирования***

Базовые типы данных. Операторы описания. Выражения. Указатели. Конструирование производных типов данных.

Структура программы. Понятие подпрограммы. Модули и интерфейсы.

Массивы. Сечения. Динамические массивы. Конструкторы. Оператор WHERE.

Директивы распределения данных DISTRIBUTE и ALIGN. Распределение многомерных и динамических массивов.

Управление параллельными вычислениями. Оператор FORALL. Директива INDEPENDENT.

Учебный пример: матричное умножение

#### ***5. Технология OpenMP для разработки параллельных программ для систем с общей памятью***

##### **5.1. Общая характеристика технологии**

Технология OpenMP как стандарт параллельного программирования для многопроцессорных систем с общей памятью (SMP, NUMA и др.). История развития стандарта. Международные организации стандартизации технологии.

Общая характеристика подхода. Разработка параллельных программ на основе их последовательных прототипов. Внесение указаний о распараллеливании в виде директив препроцессора. Положительные стороны технологии: поэтапность разработки, единство последовательного и параллельного кода, стандартизованность, возможность применения для наиболее распространенных языков программирования C и Фортран.

Формат записи директив. Области видимости директив. Статический и динамический контекст. Отделенные директивы.

##### **5.2. Управление параллельными областями**

Пульсирующий (fork-join) принцип организации параллелизма. Создание параллельных областей. Директива PARALLEL.

Разделение вычислительной нагрузки между потоками. Директивы DO/FOR и SECTIONS. Балансировка вычислений.

##### **5.3. Управление разделяемыми данными**

Общие (разделяемые) и локальные данные потоков. Необходимость синхронизации. Директивы CRITICAL, ATOMIC и BARRIER. Параметры SHARED и PRIVATE директивы PARALLEL.

Синхронизированные версии выполнения операций (редукция данных). Параметры REDUCTION директивы PARALLEL.

Взаимоисключение доступа к общим переменным. Семафоры (замки). Функции INIT\_LOCK, SET\_LOCK и UNSET\_LOCK.

## **5.4. Общая характеристика среды выполнения**

Функции и переменные окружения. Сравнительная характеристика компиляторов, обеспечивающих поддержку технологии OpenMP.

## **5.5. Учебно-практическая задача численного решения дифференциальных уравнений в частных производных**

Постановка задачи. Задача Дирихле для уравнения Пуассона. Конечно-разностная аппроксимация задачи и алгоритм Гаусса-Зейделя.

Использование OpenMP для организации параллелизма. Проблема синхронизации параллельных вычислений. Возможность неоднозначности вычислений в параллельных программах. Проблема взаимоблокировки. Исключение неоднозначности вычислений. Волновые схемы параллельных вычислений. Балансировка вычислительной нагрузки процессоров. Результаты вычислительных экспериментов.

## **6. Разработка параллельных программ для систем с распределенной памятью с использованием библиотеки MPI**

### **6.1. Общая характеристика подхода**

Модель организации параллельных вычислений в виде одновременного выполнения одной и той же программы на нескольких процессорах (single program multiple data - SPMD). Организация взаимодействия параллельно выполняемых программ при помощи передачи сообщений (message passing interface - MPI). Стандарт спецификаций процедур передачи данных как основа разработки мобильных (переносимых) параллельных программ для разнородных многопроцессорных вычислительных систем. История развития стандарта MPI. Международные организации стандартизации технологии.

Общая характеристика подхода: процессы, сообщения, типы данных, коммутаторы, топологии. Формат записи команд вызова функций библиотеки MPI. Структура программы и минимально необходимый набор функций.

Общая характеристика среды выполнения. Определение состава используемых процессоров. Команда запуска на выполнение mpirun. Учебный пример.

Положительные стороны технологии: инкапсуляция низкоуровневых проблем передачи данных, возможность предварительной подготовки параллельных программ на однопроцессорных компьютерах, стандартизованность, применимость для наиболее распространенных языков программирования C и Фортран.

### **6.2. Управление обменом сообщениями между процессами**

Функции передачи сообщений MPI\_Send и MPI\_Recv. Описание пересылаемых данных. Идентификация процессов и сообщений.

Коллективные операции передачи данных. Передача данных всем процессам (функция MPI\_Bcast). Операции редукции данных (функция MPI\_Reduce). Синхронизация вычислений (функция MPI\_Barrier).

Учебный пример: численное интегрирование.

Режимы передачи сообщений (блокирующий, синхронный, буферизуемый, по готовности). Парный обмен сообщениями. Общая характеристика дополнительных операций передачи данных.

### **6.3. Управление данными**

Базовые типы данных в MPI. Понятие производного типа данных. Карта и сигнатура типа.

Методы конструирования производных типов данных: непрерывный, векторный, N-векторный, индексный, N-векторный, упакованный. Общий способ определения производного типа данных.

Учебный пример: ленточная схема разделения данных при умножении матриц.

#### **6.4. Управление процессами**

Понятие группы процессов и коммуникатора. Функции для управления группами и коммуникаторами.

Учебный пример: моделирование топологии взаимодействия процессов в виде прямоугольной решетки.

Функции MPI для работы с виртуальными топологиями взаимодействия процессов.

#### **6.5. Общая характеристика среды выполнения**

Функции и переменные окружения. Сравнительная характеристика реализаций библиотеки MPI.

#### **6.6. Учебно-практическая задача численного решения дифференциальных уравнений в частных производных**

Способы разделения данных. Обмен информацией между процессорами. Коллективные операции обмена информацией. Организация волны вычислений. Блочная схема разделения данных. Оценка трудоемкости операций передачи данных.

### **7. Параллельные численные алгоритмы для решения вычислительно-трудоемких задач**

#### **7.1. Параллельные численные алгоритмы линейной алгебры**

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

#### **7.2. Параллельная сортировка данных**

Параллельное обобщение базовой операции сортировки. Пузырьковая сортировка. Сортировка Шелла. Быстрая сортировка.

#### **7.2. Параллельная обработка графов**

Нахождение минимально охватывающего дерева (параллельный вариант алгоритма Прима). Поиск кратчайших путей (параллельный вариант алгоритма Дейкстры).

### **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*).

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

### **3. Разработка параллельных программ с использованием технологии OpenMP - 2 часа**

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

*Пример 7:* Скалярное произведение векторов. Глобальные и локальные данные потоков. Критические секции доступа к разделяемым данным. Синхронизация.

*Пример 8:* Умножение матриц (*варианты распараллеливания вложенных циклов, самостоятельное задание 3*).

### **4. Практикум по разработке параллельных алгоритмов и программ для решения вычислительно-трудоемких задач - 6 часов**

*Пример 9:* Параллельная сортировка: алгоритмы пузырьковой сортировки, сортировки Шелла и быстрой сортировки (выполнение задания под руководством преподавателя).

*Пример 10:* Задачи обработки графов: построение минимального охватывающего дерева, поиск кратчайших путей (*самостоятельное задание 4*)

## **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.
5. Корнеев В.В. Параллельное программирование в MPI. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.

### *Дополнительная литература*

6. Джоунз Г. Программирование на языке ОККАМ. - М.: Мир, 1989.
7. Сырков Б.Ю., Матвеев С.В. Программное обеспечение мультитранспьютерных систем. - М.: Диалог-МИФИ, 1992.
8. Хоар Ч. Взаимодействующие последовательные процессы. - М.: Мир, 1989.
9. Chandra, R., Menon, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., McDonald, J. Parallel Programming in OpenMP. - Morgan Kaufmann Publishers, 2000
10. 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.
11. 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>)
12. Kumar V., Grama A., Gupta A., Karypis G. Introduction to Parallel Computing. - The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1994
13. Pacheco, S. P. Parallel programming with MPI. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco. 1997.

### *Информационные ресурсы сети Интернет*

14. Информационно-аналитические материалы по параллельным вычислениям (<http://www.parallel.ru>)
15. Информационные материалы Центра компьютерного моделирования Нижегородского университета (<http://www.software.unn.ac.ru/ccam>)
16. Информационные материалы по MPI (<http://www.mpi-forum.org>)
17. Информационные материалы по OpenMP (<http://www.openmp.org>)