

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Практикум по параллельным алгоритмам на основе технологий MPI и OpenMP
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование в прикладной физике Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра информатики и вычислительной математики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Н.И. Хохлов, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры информатики и вычислительной математики 04.04.2022

Аннотация

Целью дисциплины является формирование у студентов знаний в области многопоточных вычислений на основе технологий MPI и OpenMP. К задачам дисциплины относятся освоение студентами базовых знаний (понятий, концепций, методов) в области многопоточного программирования и формирование представления о технологиях MPI и OpenMP. После прохождения курса слушатель будет знать основы параллельного программирования; устройство современных высокопроизводительных систем; архитектуру библиотек MPI и OpenMP. Он будет уметь понять поставленную задачу, работать на современном компьютерном оборудовании, разрабатывать код программ, реализующий параллельные алгоритмы, выбирая адекватные средства синхронизации и атомарные операции платформы, отлаживать программы, исполняющиеся в параллельном окружении на современных аппаратных средствах, используя все технические возможности. Слушатель, успешно освоивший курс овладеет навыками освоения большого объема информации, техническими средствами разработки программ, исполняющихся в параллельном окружении, библиотеками MPI и OpenMP, используемыми при разработке программ, и понимать их применимость к задачам, навыками самостоятельной работы при разработке и отладке параллельных программ, математическим моделированием процесса исполнения алгоритмов на разделяемой и общей памяти.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Целью курса является формирование у студентов практических знаний и навыков в области многопоточных вычислений на основе технологий MPI и OpenMP.

Задачи дисциплины

- формирование основных знаний в области практического применения технологий MPI и OpenMP при распараллеливании алгоритмов и программ, работа с распределенными вычислительными системами;
- обучение студентов принципам создания эффективных параллельных алгоритмов, экспериментальное исследование разработанных алгоритмов, поиск узких мест, оптимизация;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области параллельных вычислений и математического моделирования с использованием современных технологий и программных средств параллельного программирования в рамках магистерских диссертационных работ.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности

ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основы архитектуры параллельных вычислительных систем;
- основные технологические этапы разработки параллельных программ;
- основные идеи при реализации численных алгоритмов, позволяющие избежать случая низкой эффективности распараллеливания;
- основные идеи разработки эффективных параллельных алгоритмов для решения задач математической физики;
- архитектуру стандартов MPI и OpenMP;
- архитектуру современных вычислительных кластеров.

уметь:

- экспериментально оценивать эффективность работы распараллеленных программ;
- выбирать эффективные численные методы для поставленных задач математического моделирования;
- работать на современных высокопроизводительных вычислительных системах;
- разрабатывать код программ, реализующий параллельные алгоритмы, выбирая адекватные средства синхронизации и атомарные операции платформы.

владеть:

- приемами распараллеливания алгоритмов и программ;
- навыками освоения большого объема информации;
- Техническими средствами разработки программ, исполняющихся в параллельном окружении;
- Библиотеками MPI и OpenMP, использующимися при разработке программ, и понимать их применимость к задачам;
- навыками самостоятельной работы при разработке и отладке параллельных программ.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение в курс. Основы MPI. Компиляция и запуск программ.	4	4		4
2	Виды коммуникаций. Коммуникации типа точка-точка.	4	4		4
3	Распараллеливание сеточных методов.	4	4		4
4	Групповые коммуникации.	2	2		2

5	Распределенные операции с матрицами и векторами.	2	2		2
6	Собственные типы MPI.	2	2		2
7	Группы и коммуникаторы. Виртуальные топологии.	2	2		2
8	Введение в MPI-2.	2	2		2
9	Основы OpenMP.	4	4		4
10	Параллельное выполнение циклов, параллельные секции, синхронизация потоков. Гибридный параллелизм.	4	4		4
Итого часов		30	30		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение в курс. Основы MPI. Компиляция и запуск программ.

Архитектура вычислительных систем с разделяемой памятью. История суперкомпьютеров. Кластера типа Beowolf. Устройства кластера и основные его компоненты. Высокоскоростные сети. История и стандарты MPI. Существующие реализации MPI. Основные понятия о процессах в MPI. Адресация процессов.

2. Виды коммуникаций. Коммуникации типа точка-точка.

Типы коммуникаций в MPI. Коммуникации типа точка-точка. Блокирующие и неблокирующие коммуникации. Особенности использования буфера библиотекой MPI. Очередность получения и передачи сообщений процессорами.

3. Распараллеливание сеточных методов.

Основные алгоритмы распараллеливания сеточных методов решения PDE. Структурные и неструктурные сетки. Пакеты для деления неструктурных сеток. Распараллеливание на структурных сетках на примере уравнение теплопроводности в двумерном случае.

4. Групповые коммуникации.

Введение в групповые коммуникации в MPI. Особенности работы групповых коммуникаций. Типы групповых сообщений: синхронизация, сбор и передача данных, коллективные вычисления. Отличия и сходства в вызовах и работе с коммуникациями типа точка-точка. Взаимодействия процессов при групповых коммуникациях.

5. Распределенные операции с матрицами и векторами.

Алгоритмы распределенных операций над матрицами и векторами. Разбор примера решения СЛАУ методом сопряженных градиентов в MPI. Особенности работы с разреженными матрицами.

6. Собственные типы MPI.

Понятие о типе данных. Виды типов данных в MPI. Создание своих типов. Разбор примеров. Оптимизация распараллеливания задачи теплопроводности используя собственные типы.

7. Группы и коммутаторы. Виртуальные топологии.

Основные новшества в MPI-2. Динамическое порождение и уничтожение процессов. Параллельная работа с файлами.

8. Введение в MPI-2.

Вычислительные системы с общей памятью. Стандарт OpenMP. Сравнение со стандартными реализациями потоков (POSIX Threads, WinAPI и другие реализации). Поддержка современными компиляторами. Особенности компиляции и запуска программ. Модель программирования OpenMP.

9. Основы OpenMP.

Директивы PRAGMA и функции исполняющей среды OpenMP. Разбор простого примера «Hello World». Основные принципы программирования в OpenMP. Основные правила применения директив OpenMP, использующихся для описания данных и организации параллельных вычислений. Вопросы видимости данных и корректности доступа к данным.

10. Параллельное выполнение циклов, параллельные секции, синхронизация потоков. Гибридный параллелизм.

Методы распараллеливания циклов и контроля распределения работы между процессорами. Статическое и динамическое распределение итераций между потоками. Способы балансировки работы процессоров с помощью директив OpenMP. Задание внешних переменных окружения с помощью функций.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная компьютерами с доступом к виртуальному кластеру и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Параллельные вычисления [Текст], учеб. пособие для вузов /В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. -СПб., БХВ-Петербург, 2002
2. Теория и практика параллельных вычислений [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. П. Гергель .— М. : Интернет-Университет Информ. Технологий : БИНОМ. Лаб. знаний, 2007 .— 423 с.
3. Технологии параллельного программирования MPI и OpenMP [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. С. Антонов ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова .— М. : Изд-во Моск. ун-та, 2012 .— 344 с.

Дополнительная литература

1. Последовательные и параллельные алгоритмы: Общий подход [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Р. Миллер, Л. Боксер ; пер. с англ. А. В. Козвониной ; под ред. С. М. Окулова .— М. : БИНОМ. Лаб. знаний, 2006 .— 406 с.
2. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных систем — М.: Издательство Московского университета, 2013 — 467 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.intuit.ru/>, <http://www.parallels.ru/>, www.hpc-education.ru, электронные конспекты лекций, учебные пособия и сборники задач, разработанные для данного курса.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекциях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию экрана.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину "Практикум по параллельным алгоритмам на основе технологий MPI и OpenMP", должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, теоремы и алгоритмы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- выполнение лабораторных работ, для осознания связей между теорией и практическими навыками;
- подготовку к зачету.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателям.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование в прикладной физике Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра информатики и вычислительной математики
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	Н.И. Хохлов, канд. физ.-мат. наук, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Практикум по параллельным алгоритмам на основе технологий MPI и OpenMP» обучающийся должен:

знать:

- основы архитектуры параллельных вычислительных систем;
- основные технологические этапы разработки параллельных программ;
- основные идеи при реализации численных алгоритмов, позволяющие избежать случая низкой эффективности распараллеливания;
- основные идеи разработки эффективных параллельных алгоритмов для решения задач математической физики;
- архитектуру стандартов MPI и OpenMP;
- архитектуру современных вычислительных кластеров.

уметь:

- экспериментально оценивать эффективность работы распараллеленных программ;
- выбирать эффективные численные методы для поставленных задач математического моделирования;
- работать на современных высокопроизводительных вычислительных системах;
- разрабатывать код программ, реализующий параллельные алгоритмы, выбирая адекватные средства синхронизации и атомарные операции платформы.

владеть:

- приемами распараллеливания алгоритмов и программ;
- навыками освоения большого объема информации;
- Техническими средствами разработки программ, исполняющихся в параллельном окружении;
- Библиотеками MPI и OpenMP, использующимися при разработке программ, и понимать их применимость к задачам;
- навыками самостоятельной работы при разработке и отладке параллельных программ.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

1. Как называется глобальный коммунитор в MPI, в который по умолчанию включены все запущенные процессы?
 - GLOBAL_COMMUNICATOR
 - Такого коммунитора нет, в MPI все коммуниторы надо создавать вручную.
 - MPI_COMM_SELF
 - MPI_DEFAULT_COMM
 - MPI_COMM_WORLD
 - COMM_WORLD
2. Что делает процедура MPI_Comm_rank?
 - Она сравнивает номер (ранк) текущего процесса с запрашиваемым и возвращает TRUE или FALSE. Значение возвращается через аргумент.
 - Она возвращает целое число, которое представляет собой номер (ранк) вызвавшего ее процесса в запрашиваемом коммуниторе. Значение возвращается через аргумент.
 - Она возвращает целое число, которое представляет собой число процессов в запрашиваемом коммуниторе. Значение возвращается через аргумент.
 - Преобразует номер процесса в операционной системе в уникальное целое число (ранк), начинающееся с 0 и возвращает его. Значение возвращается через аргумент.
 - Возвращает номер приоритета процесса, приоритет начинается с 0. Значение возвращается через аргумент.
3. Как расшифровывается MPI?
 - Message Passing Interface
 - Massive Parallel Interface
 - Message Process Intercommunication
 - Multi Processing Intercommunication
 - Memory Parallel Interface
4. Какой подход реализации взаимодействия лежит в основе в MPI?
 - Система обмена сообщений.
 - Механизм общей памяти.
 - Многопоточное (multi-threading) программирование.
 - Системы разделяемой памяти.
5. Число процессов в MPI-1...
 - Статично и задается на этапе запуска.
 - Динамично, можно создавать и убивать процессы по мере надобности.
 - Статично, задается в программе во время вызова MPI_Init.
 - Можно только порождать новые процессы, завершаются все процессы после вызова MPI_Finalize.
6. Что делает процедура MPI_Comm_size?
 - Она сравнивает размер текущего коммунитора с запрашиваемым и возвращает TRUE или FALSE. Значение возвращается через аргумент.
 - Она возвращает целое число, которое представляет собой номер (ранк) вызвавшего ее процесса в запрашиваемом коммуниторе. Значение возвращается через аргумент.
 - Она возвращает целое число, которое представляет собой размер запрашиваемого коммунитора. Значение возвращается через аргумент.
 - Она возвращает целое число, которое представляет собой размер коммунитора, в котором состоит процесс. Значение возвращается через аргумент.

- Возвращает число коммуникаторов, в которых состоит процесс. Значение возвращается через аргумент.
7. Что включает в себя стандарт MPI-1?
- Взаимодействия типа точка-точка (p-t-p).
 - Коллективные взаимодействия.
 - Группы процессов и коммуникаторы.
 - Топологии процессов.
 - Работа с типами данных.
 - Явные операции с общей памятью.
 - Вызов удаленных процедур.
 - Поддержка многопоточности.
 - Операции ввода-вывода (I/O).
8. Выберите процедуру, которая не принимает коммуникатор в качестве одного из аргументов.
- MPI_Send
 - MPI_Init
 - MPI_Comm_size
 - MPI_Recv
- Они все принимают коммуникатор, т. к. все процедуры MPI требуют наличие коммуникатора в качестве аргумента.
 - Ни одна из них не требует коммуникатора в качестве аргумента.
9. Для чего предназначен тэг (tag) сообщения в MPI?
- Для разделения процедур приема-передачи сообщения у различных разработчиков одного приложения.
 - Передает число элементов массива в сообщении.
 - Определяет тип пересылки.
 - Для механизма разделения сообщений от одного процесса к другому.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примеры проектных работ:

- Клеточные автоматы типа «Жизнь».
- Клеточные автоматы Кохомото-Ооно.

Перечень типовых вопросов:

1. История стандарта MPI. Особенности стандарта. Что включает в себя стандарт.
2. Взаимодействия точка-точка. Режимы взаимодействия. Особенности работы режимов. Блокирующий, асинхронный режим.
3. Коллективные взаимодействия. Виды взаимодействий. Векторные версии функций коллективных взаимодействий. Асимптотическая сложность коллективных взаимодействий.
4. Типы данных в MPI. Векторные типы, структуры. Карты типов. Проблемы соответствия типов.
5. Группы и топологии процессов. Декартова топология. Особенности работы с декартовой топологией.
6. Распараллеливание сеточных методов. Сложность алгоритмов межпроцессорного взаимодействия.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачет выставляется по результатам работы в семестре на основе оценок за лабораторные задания и контрольную работу а также по результатам сдачи проектной работы.