

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
прикладной математики и
информатики**

А.М. Райгородский

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Системы параллельного программирования
по направлению:	Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки:	Прикладная математика и информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра системного программирования
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.И. Аветисян, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры системного программирования 06.05.2024

Аннотация

Данный курс ориентирован на получение базовых знаний в области параллельных вычислений в течение одного семестра. Предполагается, что слушатели имеют базовую подготовку в области программирования, архитектуры компьютеров и вычислительных методов. Курс состоит из трех взаимосвязанных частей: параллельные вычислительные системы и суперкомпьютеры, основы технологий параллельного программирования, анализа структуры программ и алгоритмов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование у студентов теоретических знаний и навыков разработки и отладки параллельных программ для различных современных архитектур.

Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний (понятий, концепций, методов и моделей) в области параллельного программирования;
- приобретение теоретических знаний и практических умений и навыков в области параллельного программирования;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных разработок в области параллельного программирования.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-5 Способен и готов к профессиональному росту и руководству коллективом в области информатики и вычислительной техники, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
	ОПК-5.4 Способен осуществлять эффективное управление разработкой программных средств и проектов
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Вести научную дискуссию и формы устного научного высказывания	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания

ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия и основные законы параллельного программирования;
- современные проблемы соответствующих разделов системного программирования;
- основные трудности параллельного программирования, причины их возникновения и пути их преодоления;
- основные свойства соответствующего системного программного обеспечения;
- классы параллельных архитектур и особенности разработки параллельных программ для этих классов;
- фундаментальные понятия и основные законы параллельного программирования;
- современные проблемы соответствующих разделов системного программирования;
- основные трудности параллельного программирования, причины их возникновения и пути их преодоления;
- основные свойства соответствующего системного программного обеспечения;
- классы параллельных архитектур и особенности разработки параллельных программ для этих классов.

уметь:

- понять поставленную задачу;
- использовать свои знания для разработки эффективных параллельных программ;
- оценивать корректность программы, ее масштабируемость;
- самостоятельно проектировать, реализовывать, отлаживать и сопровождать высокоэффективные параллельные программы.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации и решения задач параллельного программирования (в том числе, сложных);
- навыками самостоятельной работы и освоения новых дисциплин;
- культурой постановки, анализа и решения математических и прикладных задач, требующих для своего решения использования математических подходов и методов параллельного программирования.

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	Аппаратура. Мультипроцессорные системы с общей памятью.	1	2		3
2	Аппаратура. Системы с распределенной памятью. Ускорители.	1	2		3
3	Библиотека Pthreads. Библиотека OpenMP.	4	8		8

4	Модели параллельного программирования.	1	2		7
5	Основные понятия библиотеки MPI. Параллельное программирование с использованием библиотеки MPI.	4	8		10
6	Параллельное программирование с использованием ускорителей. Методы и средства отладки и настройки.	4	8		14
Итого часов		15	30		45
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Аппаратура. Мультипроцессорные системы с общей памятью.

Параллельность на всех уровнях: на уровне команд, на уровне потоков, на уровне процессов. Синхронная и асинхронная параллельность.

Мультипроцессорные системы с общей памятью, в том числе особенности многоядерных процессоров. Общая архитектура и подходы к параллельному программированию. Проблемы, возникающие при организации доступа к общим ресурсам.

2. Аппаратура. Системы с распределенной памятью. Ускорители.

Массивно-параллельные системы с распределенной памятью (кластеры, суперкомпьютеры). Высокопроизводительные вычислительные системы с использованием ускорителей.

3. Библиотека Pthreads. Библиотека OpenMP.

Библиотека Pthreads: управление потоками, управление мьютексами, управление условными переменными.

Библиотека OpenMP: модель программирования, синтаксис, понятие параллельной области и режима ее выполнения. Директивы OpenMP. Параллельные циклы for/DO. Параметры директив. Директивы OpenMP. Параллельные секции, директива single. Параметры директив. Системные переменные и системные подпрограммы времени выполнения библиотеки OpenMP. Синхронизационные конструкции OpenMP: critical, atomic, barrier, master, ordered, flush. Ошибки, возникающие при программировании с общей памятью: состязание и взаимоблокировка. Приватизация.

4. Модели параллельного программирования.

Характеристики параллельной программы: ускорение, масштабируемость, эффективность. Формулы Амдаля и Густафсона. Проблемы разработки и внедрения высокоуровневых языков. Программирование в потоках (модель OpenMP). Механизмы управления доступом к критическим ресурсам: активное ожидание, семафоры, мониторы.

Программирование в процессах (модель MPI). Программирование на специализированных процессорах. Модель CUDA (и OpenCL).

5. Основные понятия библиотеки MPI. Параллельное программирование с использованием библиотеки MPI.

Программирование в терминах обмена сообщениями. Основные понятия библиотеки MPI: инициализация и выход, понятие коммуникатора, сообщение. Блокирующие коммуникации точка-точка: функции отправки и приема. Неблокирующие коммуникации точка-точка: функции отправки и приема, подпрограммы ожидания/проверки.

Типы данных MPI (базовые и производные). Соответствие типов данных MPI и типов данных языков C и Fortran. Конструирование производных типов: непрерывно размещенный, векторный, структурный.

Коллективные операции распределения данных в MPI: MPI_Bcast, MPI_Scatter, MPI_Gather, MPI_Allgather, MPI_Alltoall.

Операции глобальной редукции: minloc и maxloc; определенные пользователем.

Односторонние коммуникации.

6. Параллельное программирование с использованием ускорителей. Методы и средства отладки и настройки.

Возможности технологии программирования Cuda. Сравнительный анализ технологии Cuda и стандартов OpenCL, OpenACC.

Обзор современных методов и средств отладки и настройки параллельных программ.

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

Необходимое оборудование для лекций: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis, Vipin Kumar. Introduction to Parallel Computing, 2nd Edition. Addison-Wesley, Hardcover, 2nd edition, Published January 2003. - 636 pages, int_par_comp2. - ISBN 0201648652.

Дополнительная литература

1. David E. Culler, Jaswinder Pal Singh, Anoop Gupta. Parallel Computer Architecture: A Hardware/Software Approach. - Morgan Kaufmann Publishers, 1998. - 1025 pages. - ISBN 1558603433.
2. Peter S. Pacheco. PARALLEL programming with MPI. - Morgan Kaufmann Publishers, 1997. - 420 pages. - ISBN-13: 978-1-55860-339-4.

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

<http://www.iso.org>, <http://www.itu.int>, <http://www.ietf.org>

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

Программное обеспечение и информационные технологии не требуются.

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

Студент, изучающий дисциплину, 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, аксиомы, методы доказательств.

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 дифференцированному 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 лектору.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки: Прикладная математика и информатика
Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики
кафедра системного программирования
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.И. Аветисян, канд. физ.-мат. наук, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-5 Способен и готов к профессиональному росту и руководству коллективом в области информатики и вычислительной техники, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
	ОПК-5.4 Способен осуществлять эффективное управление разработкой программных средств и проектов
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Системы параллельного программирования» обучающийся должен:

знать:

- фундаментальные понятия и основные законы параллельного программирования;
- современные проблемы соответствующих разделов системного программирования;
- основные трудности параллельного программирования, причины их возникновения и пути их преодоления;
- основные свойства соответствующего системного программного обеспечения;
- классы параллельных архитектур и особенности разработки параллельных программ для этих классов;
- фундаментальные понятия и основные законы параллельного программирования;
- современные проблемы соответствующих разделов системного программирования;
- основные трудности параллельного программирования, причины их возникновения и пути их преодоления;
- основные свойства соответствующего системного программного обеспечения;
- классы параллельных архитектур и особенности разработки параллельных программ для этих классов.

уметь:

- понять поставленную задачу;
- использовать свои знания для разработки эффективных параллельных программ;
- оценивать корректность программы, ее масштабируемость;
- самостоятельно проектировать, реализовывать, отлаживать и сопровождать высокоэффективные параллельные программы.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации и решения задач параллельного программирования (в том числе, сложных);
- навыками самостоятельной работы и освоения новых дисциплин;
- культурой постановки, анализа и решения математических и прикладных задач, требующих для своего решения использования математических подходов и методов параллельного программирования.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

1. Особенности современных параллельных архитектур. Виды параллельности. Модели параллельного программирования. Характеристики параллельной программы: ускорение, масштабируемость, эффективность.
2. Мультипроцессорные системы с общей памятью. Общая архитектура и подходы к параллельному программированию. Проблемы, возникающие при организации доступа к общим ресурсам.
3. Механизмы управления доступом к критическим ресурсам: активное ожидание, семафоры, мониторы.
4. Библиотека Pthreads: управление потоками, управление мьютексами, управление условными переменными.
5. Библиотека OpenMP: модель программирования, синтаксис, понятие параллельной области и режима ее выполнения.
6. Директивы OpenMP. Параллельные циклы for/DO. Параметры директив.
7. Директивы OpenMP. Параллельные секции, директива single. Параметры директив.
8. Системные переменные и системные подпрограммы времени выполнения библиотеки OpenMP.
9. Распараллеливание циклов. Зависимости по данным.
10. Синхронизационные конструкции OpenMP: critical, atomic, barrier, master, ordered, flush.
11. Ошибки, возникающие при программировании с общей памятью: состязание и взаимоблокировка.
12. Кластерные высокопроизводительные вычислительные системы: требования к архитектуре. Коммуникационное оборудование и аппаратно-программные платформы.

13. Модель вычислительной системы с распределенной памятью – LogGP.
14. Программирование в терминах обмена сообщениями. Основные понятия библиотеки MPI: инициализация и выход, понятие коммуникатора, сообщение.
15. Блокирующие коммуникации точка-точка: функции отправки и приема.
16. Неблокирующие коммуникации точка-точка: функции отправки и приема, подпрограммы ожидания/проверки.
17. Типы данных MPI (базовые и производные). Соответствие типов данных MPI и типов данных языков C и Fortran. Конструирование производных типов: непрерывно размещенный, векторный, структурный.
18. Коллективные операции распределения данных в MPI: MPI_Bcast, MPI_Scatter, MPI_Gather, MPI_Allgather, MPI_Alltoall. Операции глобальной редукции: minloc и maxloc; определенные пользователем.
19. Односторонние коммуникации.
20. Основные конструкции технологии Cuda.
21. Сравнительный анализ стандартов OpenCL и OpenACC.
22. Средства отладки и настройки параллельных программ.

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

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.