

**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:	Теория и практика многопоточной синхронизации
по направлению:	Прикладная математика и информатика
профиль подготовки:	Прикладная математика, компьютерные науки и инженерия Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра алгоритмов и технологий программирования
курс:	2
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 4 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.И. Гришутин, ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры алгоритмов и технологий программирования 02.04.2024

Аннотация

В курсе изучаются основы многопоточного программирования и задачи, связанные с ним. Рассматриваются классические сценарии и механизмы синхронизации в многопоточных системах, такие как, например, мьютекс, условная переменная и барьер. Обсуждаются задачи и механизмы разных уровней, которые возникают в языках программирования, поддерживающих возможность асинхронного программирования, на примере языков программирования C++ и Golang. Немаловажное значение в курсе придаётся моделям памяти в различных языках программирования и архитектурах процессоров. Кроме этого, исследуются механизмы и стратегии garbage collection в различных языках программирования и проблемы, связанные с многопоточностью.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- Сформировать у студента понимание основных сценариев и инструментов многопоточной синхронизации.
- Дать теоретические и практические знания о механизмах асинхронного программирования и асинхронного исполнения в различных языках программирования.
- Дать студентам полную картину исполнения многопоточных систем: от моделей памяти процессора до устройства высокоуровневых примитивов как, например, futures.

Задачи дисциплины

- Научить формулировать задачи в терминах изученных теорий, выбирать подходящий алгоритм для поставленной задачи.
- Научить разрабатывать комбинации алгоритмов для решения поставленных задач, оценивать сложности алгоритмов, их модификаций и комбинаций, выбирать подходящие структуры данных для поставленных задач, реализовывать алгоритмы в обобщенной форме на языке программирования C++

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные модели памяти, используемые в языках программирования и различных архитектурах процессоров, уметь описывать различия этих моделей памяти.

уметь:

- описать основные сценарии многопоточной синхронизации и примитивы синхронизации, позволяющие эти сценарии воспроизвести;
- описывать и реализовывать такие объекты асинхронного программирования, как fibers, stackless coroutines, futures и promises.

владеть:

- навыками разработки и отладки многопоточных приложений, в том числе с использованием таких средств отладки, как AddressSanitizer и ThreadSanitizer.

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	Проблемы синхронизации	10	10		15
2	Модель памяти, кэш	6	6		20
3	Lock-free структуры	8	8		20
4	События, задачи, пул потоков	6	6		20
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 4 (Весенний)

1. Проблемы синхронизации

Блокирующая синхронизация.

Взаимное исключение

- Мотивация: примеры гонок, критические секции для группировки операций в атомарные блоки
- Постановка задачи взаимного исключения
- Гарантии консистентности (safety: mutual exclusion) и гарантии прогресса (liveness: deadlock freedom, starvation freedom)

- Атомарность и атомарная память
- Модель чередования для конкурентных исполнений

- Протоколы на чтениях/записях:
- Мьютекс Петерсона для двух потоков
- Обобщение на n потоков с помощью tournament tree
- Свойство честности (fairness), doorway и wait-секции
- Мьютекс Лампорта на временных метках, логические часы
- Сравнение алгоритмов Петерсона и Лампорта

- RMW-операции: test-and-set, fetch-and-add,
- Протоколы на RMW-операциях:
- TAS спинлок
- Ticket спинлок
- Сравнение протоколов на атомарных RW-регистрах и RMW-регистрах

- Нижняя граница на число ячеек памяти для взаимного исключения
 - Сплиттер и fast path для мьютекса Лампорта
 - Дополнительно:
 - Задача renaming
 - Конструкция для ограниченных временных меток в алгоритме Лампорта
-

Синхронизация: условные переменные и семафоры

- Паттерн коммуникации producer/consumer
- Блокирующая очередь, интерфейс, применение для пула потоков

Условные переменные:

- Условные переменные как механизм ожидания и сигнализирувания
- Точная семантика операций
- Метафора с комнатами
- Предикат как функция от состояния, связь условной переменной и предиката
- Почему нужно будить в цикле:
- Spurious wakeup
- Intercepted wakeup
- Loose predicate (на примере обобщенного семафора)

- Варианты сигнализирувания
- Инвариант и формальное док-во
- Сценарии с ошибками

Семафоры:

- Семафор как блокирующий счетчик
 - Интерфейс семафора, имена операций (P/V, acquire/release, wait/signal)
 - Семафор не пропускает сигналы, считает их
 - Сам счетчик недоступен в интерфейсе семафора
 - Семафор как автомат с жетонами
 - Реализация блокирующей очереди на семафорах, циркуляция жетонов
 - Реализация семафора на условных переменных
-

Мелкогранулярные блокировки

- Задача обедающих философов и взаимные блокировки
- Wait-for граф для обнаружения взаимных блокировок, условия Коффмана
- Решение с помощью семафоров
- Решение с помощью нарушения симметрии
- Общая идея: упорядочивание локов, док-во корректности
- Главный пример - lock striping для хэширования цепочками
- Фиксированный массив мьютексов, страйпы
- Как делать расширение таблицы: отпустить лок страйпа и захватить все локи
- Локи захватываем справа налево, чтобы не возникло взаимной блокировки
- Гонки при расширении и как их избегать
- Нужно ли захватывать все локи, чтобы понять, что нас опередили?
- Проблема: Как узнать номер страйпа, не зная корзины? Как вычислить корзину, не захватив блокировки страйпа?
- Главный инвариант: каждый элемент не должен менять свой страйп при перехешировании
- Как добиться большего параллелизма в хэш-таблице: Reader/Writer блокировки
- Реализация с голоданием писателей

- Реализация с голоданием читателей
- Честная реализация
- Другой подход к построению словарей: скип-листы

2. Модель памяти, кэш

Как устроена память: когерентность кэшей и модель консистентности памяти

Когерентность кэшей и спинлоки

- Как работает с точки зрения синхронизации каждая отдельная ячейка памяти
- Кэши и иерархия памяти
- Проблема когерентности (синхронизации) кэшей
- Внутренняя реализация протоколов когерентности: message passing на шине памяти, свойства шины
- Протокол MSI для синхронизации, граф переходов
- Аналогия с R/W блокировками
- Оптимизация MSI -> MESI
- Дополнительно: MOESI, MESIF
- Когерентность и порядок модификаций: протокол когерентности упорядочивает записи в одну ячейку памяти
- Проблемы производительности, связанные с протоколом когерентности:
 - cache ping-pong при захвате спинлока, TATAS-спинлок
 - thundering herd при отпуске спинлока: спинлок Андерсона, CLH, MCS и другие реализации
 - false sharing на примере распределенного счетчика

Модель памяти

- Главные вопросы:
 - Как упорядочиваются чтения и записи в разные ячейки?
 - Что может вернуть конкретное чтение?
- Последовательная согласованность Лампорта
- Реальность:
 - Примеры реордерингов для разных архитектур процессоров
 - Реордеринги компиляторов
- Как гарантировать иллюзию последовательной согласованности, и при этом иметь реордеринги при исполнении?

Последовательная согласованность для программ, свободных от гонок (SC-DRF):

- Гарантировать последовательную согласованность для любой программы дорого
- Процессору нужно делать реордеринги
- Программисту нужна простая модель исполнения
- Решение: обеспечим видимость последовательной согласованности только для корректно синхронизированных программ
- Модель памяти - контракт между разработчиками программ и разработчиками компиляторов/инженерами процессоров

Главные идеи модели SC-DRF:

- Разделим ячейки памяти (и операции над ними) на два класса:
- Атомики - ячейки, которые используются для синхронизации, порядок обращения к ним и определяет синхронизацию (см. протокол Петерсона)
- Неатомарные ячейки
- Глобальный порядок для атомиков (synchronization order, SO)
- Отношение synchronizes-with (через SO)
- Отношение happens-before в модели отправки сообщений
- Happens-Before как транзитивное замыкание synchronization order и program order
- Видимость записей через happens-before для неатомарных операций
- Главная теорема: SO для атомиков + видимость записей через HB для остальных ячеек + DRF => последовательная согласованность

Зачем такие сложности:

- Мы ослабили требования к упорядочиванию: последовательная согласованность только для DRF
- Взамен компилятор получает возможность делать больше реордерингов

Классы реордерингов, которые допускает SC-DRF:

- Реордеринги между точками синхронизации на атомиках - порядок не могут наблюдать другие потоки
- Roach Motel
- Реализация модели памяти в языке программирования: барьеры памяти (memory barriers)
- Более слабые модели упорядочивания: acquire/release, relaxed
- Acquire/Release-семантика:
- Гарантируем только видимость через HB, глобального порядка на атомиках при этом нет
- Пример: Independent Reads of Independent Writes (IRIW)
- Relaxed-семантика
- Дополнительно: OoTA (out of thin air)

3. Lock-free структуры

Неблокирующая синхронизация, lock-free контейнеры, управление памятью

- Проблемы синхронизации: дедлоки, лайвлоки
- Прогресс в случае паузы потока, захватившего блокировку
- Идея неблокирующей синхронизации
- Строгие определения гарантий прогресса: lock-freedom, wait-freedom, obstruction freedom
- Не используем взаимное исключение
- CAS - швейцарский нож в мире RMW-операций
- Пример: как реализовать FAA с помощью CAS
- Общий механизм построения lock-free структур данных: ссылочные структуры и CAS-лупы
- Контейнеры:
- Стек Трайбера
- Проблемы: ABA, освобождение памяти

- Очередь Майкла-Скотта
- Список Харриса, применение для хэш-таблицы и скип-листа

- Проблемы с памятью:
- Освобождение памяти
- АВА при использовании пулов

- Подходы:
- Quiescent-based memory reclamation (QBMR)
- Hazard pointers
- Node recycling + tagged pointers

Дополнительно:

- Гарантия obstruction-freedom и снимки нескольких ячеек памяти

4. События, задачи, пул потоков

Линеаризуемость

- Мотивация: Что такое многопоточная FIFO-очередь?
- Более общие вопросы: как промоделировать конкурентные исполнения для структуры данных?

- Порядок:
- упорядочивание операций через критические секции
- на уровне ячеек памяти - последовательная согласованность для свободных от гонок программ

- Цель: получить модель чередования для высокоуровневых объектов
- Формальная модель: конкурентная и последовательная история, проекции на потоки и объекты

- Последовательная согласованность для высокоуровневых объектов
- Пример с реплицированным регистром - последовательная согласованность не позволяет комбинировать несколько объектов

- Линеаризуемость (атомарность)
- Док-во композируемости для линеаризуемости

- Точки линеаризации
- Пример с очередью Herlihy/Wing

- Линеаризация для ускорения структур данных: basket queue, elimination backoff stack

Дополнительно:

- Quiescent consistency и чудо-стек Шавита с призмами
- В случае операций над несколькими объектами (транзакции) нужна новая модель консистентности - сериализуемость
- Линеаризуемость и распределенные системы
- Local Linearizability?

- Мотивация: Почему набор инструкций процессора именно такой? Какие операции лучше помогают синхронизировать потоки, а какие - хуже?

- Наводим интуицию

- Постановка задачи wait-free консенсуса, число консенсуса для операции/объекта

Как описать любой протокол консенсуса:

- Конфигурация, протокол как спуск по дереву конфигураций (вспомнить про линейизуемость),

- бивалентные и унивалентные конфигурации, критическая конфигурация

- Универсальные свойства любого протокола: корень - бивалентный, любой протокол при спуске проходит через критическую конфигурацию

- Теорема: консенсус на атомарных R/W регистрах невозможен даже для двух потоков

- Пример с очередью (без док-ва): число консенсуса для wait-free очередей равно 2, а значит wait-free очередь нельзя реализовать только лишь на атомарных чтениях/записях

- Класс RMW-операций Common2: идемпотентные и коммутирующие операции

- Теорема: консенсус с помощью операций из Common2 невозможен даже для трех потоков

- Дополнительно:

- Робастность wait-free иерархии

- Рандомизация

- Универсальность консенсуса

Универсальная конструкция

- Универсальность консенсуса

- Работаем со структурой данных как с черным ящиком, используем только последовательную спецификацию

Lock-free конструкция:

- Основная идея:

- Потоки разделяют не состояние структуры данных, а историю ее изменений (лог команд)

- Каждая операция состоит из двух шагов: 1) вставка элемента в лог команд, 2) применение команд из лога

поддерживаем общий лог команд (историю изменений)

- Реализация:

- Храним голову списка в виде массива

- Используем консенсус для вставки очередного узла в список

- Свобода от блокировок

- Линеаризация вставки

Wait-free конструкция:

- В чем проблема lock-free конструкции: поток может проигрывать вставки сколь угодно долго

- Идея: потоки должны синхронно помогать другим потокам вставлять узлы в лог команд

- Отличие от очереди Майкла-Скотта

- Реализация: анонсы вставок, round-robin по последовательным номерам узлов в истории
- Линеаризация: точка линеаризации операции может находиться в другом потоке!
- Замечания по эффективной реализации
- Управление памятью
- Параллели с распределенными системами - state machine replication

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

Учебная аудитория, оснащенная компьютерами для каждого студента.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теория и практика параллельных вычислений, учебное пособие / В. П. Гергель. — Москва, ИНТУИТ, 2016.— URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/363224/reading> (дата обращения: 25.11.2020). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)
2. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA, Электронная версия печатной публикации / А. В. Боресков, А. А. Харламов, Н. Д. Марковский, Д. Н. Микушин. — Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова, 2015

Дополнительная литература

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

Не используются

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

учебная аудитория, экран и проектор.

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

На занятиях особое внимание обращается на современные способы разработки программных продуктов. Необходимо требовать от студентов качественного и понятного программного кода на ряду и в равной степени с правильной работой программы. На занятиях стоит постоянно разбирать ошибки, которые допускали студенты в своих программах, а также логические ошибки.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладная математика и информатика
профиль подготовки:	Прикладная математика, компьютерные науки и инженерия Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра алгоритмов и технологий программирования
курс:	<u>2</u>
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 4 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.И. Гришутин, ассистент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теория и практика многопоточной синхронизации» обучающийся должен:

знать:

- основные модели памяти, используемые в языках программирования и различных архитектурах процессоров, уметь описывать различия этих моделей памяти.

уметь:

- описать основные сценарии многопоточной синхронизации и примитивы синхронизации, позволяющие эти сценарии воспроизвести;
- описывать и реализовывать такие объекты асинхронного программирования, как *fibers*, *stackless coroutines*, *futures* и *promises*.

владеть:

- навыками разработки и отладки многопоточных приложений, в том числе с использованием таких средств отладки, как *AddressSanitizer* и *ThreadSanitizer*.

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

Примеры практических заданий в течение семестра:

1. Найдите в данном коде асинхронного клиент-серверного приложения ошибку.
2. Объясните суть ошибки в коде асинхронного клиент-серверного приложения.
3. Исправьте ошибки в коде асинхронного клиент-серверного приложения.
4. Реализуйте класс *stackless coroutine*.
5. Реализовать мьютекс.
6. Реализовать синхронные сокеты для *файберов* над фреймворком *asio*.
7. С помощью синхронных сокетов для *файберов* над фреймворком *asio* написать эхо-сервер.
8. Реализовать фреймворк *executors + futures/promises*.
9. Какой Мьютекс называется рекурсивным.
10. Примитив синхронизации *read/write-lock*.

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

1. Напишите на псевдокоде примитив синхронизации *read/write-lock* с приоритетом для читателей.
2. Создайте на псевдокоде примитив синхронизации *read/write-lock* с приоритетом для писателей.

3. Мьютекс называется рекурсивным (reentrant, recursive), если поток, владеющий мьютексом, может захватить его (вызвать метод lock), повторно. Для освобождения рекурсивного мьютекса поток должен вызвать unlock столько раз, сколько был вызвал lock. Например, TAS спинлок не является рекурсивным: попытка повторного захвата спинлока тем же потоком приведет к вечному циклу с exchange внутри. Стандартный системный мьютекс также не является рекурсивным. Реализуйте рекурсивный мьютекс с помощью обычного нерекурсивного мьютекса и условной переменной.
4. Напишите класс CountdownLatch, который инициализируется значением count.
5. Напишите класс CountdownLatch, который поддерживает операцию Down() - уменьшить значение счетчика на единицу
6. Напишите класс CountdownLatch, который поддерживает операцию Await() - дождаться с блокировкой потока пока значение счетчика не опустится до нуля.
7. Напишите ReadWriteLock с приоритетом для читателей
8. Напишите класс TicketMutex, который выдает потокам блокировку в порядке вызовов метода Lock.
9. Напишите класс TicketMutex, который выдает ожидание на мьютексе и должно быть блокирующим.

Критерии оценивания

- оценка «отлично (10)» 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 (9)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений
- оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, и правильное обоснование принятых решений
- оценка «хорошо (7)» 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 (6)» выставляется студенту, если он 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)» выставляется студенту, если он знает материал, и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет фрагментарно основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач
- оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется студенту, который не знает формулировок основных понятий дисциплины.

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

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины.