

**ИНФОРМАЦИОННО-
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
Всероссийской конференции
с международным участием**

Москва, РУДН, 24–28 апреля 2017 года

УДК 004:007(063)
ББК 32.81
И74

Конференция проводится в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности РУДН «5-100», проект М 2.4.1.П1 «Организация и проведение НТМ, повышающих международный и всероссийский уровень признания ученых РУДН».

Организатор конференции: Российский университет дружбы народов.

Соорганизаторы конференции:

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ);

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН);

Лаборатория информационных технологий Объединенного института ядерных исследований (ЛИТ ОИЯИ);

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН).

Программный комитет: Самуйлов К. Е., д.т.н., проф., РУДН — председатель программного комитета; Севастьянов Л. А., д.ф.-м.н., проф., РУДН — сопредседатель программного комитета; Толмачев И. Л., к.ф.-м.н., проф., РУДН — сопредседатель программного комитета; Гудкова И. А., к.ф.-м.н., доцент, РУДН — секретарь программного комитета; Андреев С. Д., к.т.н., РУДН, Tampere University of Technology, г. Тампере, Финляндия; Башарин Г. П., д.т.н., проф., РУДН; Боголюбов А. Н., д.ф.-м.н., проф., МГУ; Виноцкий С. И., д.ф.-м.н., проф., ЛТФ ОИЯИ; Вишневский В. М., д.т.н., проф., ИПУ РАН; Гайдамака Ю. В., к.ф.-м.н., доцент, РУДН; Гнатич М. М., проф., Pavol Jozef Šafárik University in Košice, Словакия; Гольдштейн Б. С., д.т.н., проф., СПб ГУТ; Горшенин А. К., к.ф.-м.н., доцент, ФИЦ ИУ РАН; Дружинина О. В., д.ф.-м.н., проф., ФИЦ ИУ РАН; Ефимушкин В. А., к.ф.-м.н., доцент, ОАО «Интеллект Телеком»; Ибрагимов Б. Г., д.т.н., проф., Азербайджанский технический университет (АЗТУ), г. Баку, Азербайджан; Кореньков В. В., д.т.н., проф., ЛИТ ОИЯИ; Королькова А. В., к.ф.-м.н., доцент, РУДН; Крынев А. В., д.ф.-м.н., проф., НИЯУ «МИФИ»; Кулябов Д. С., к.ф.-м.н., доцент, РУДН; Кучерявый А. Е., д.т.н., проф., СПб ГУТ; Кучерявый Е. А., к.т.н., проф., НИУ ВШЭ; Ланеев Е. Б., д.ф.-м.н., проф., РУДН; Мартикайнен О. Е., проф., Service Innovation Research Institute, г. Хельсинки, Финляндия; Назаров А. А., д.т.н., проф., ТГУ; Наумов В. А., проф., Service Innovation Research Institute, г. Хельсинки, Финляндия; Осипов Г. С., д.ф.-м.н., проф., ФИЦ ИУ РАН; Пузынин И. В., д.ф.-м.н., проф., ЛИТ ОИЯИ; Пшеничников А. П., к.т.н., проф., МТУСИ; Ромашкова О. Н., д.т.н., проф., МГПУ; Севастьянов А. Л., к.ф.-м.н., РУДН; Степанов С. Н., д.т.н., проф., МТУСИ; Стрельцова О. И., к.ф.-м.н., с.н.с., ЛИТ ОИЯИ; Сущенко С. П., д.т.н., проф., ТГУ; Хачумов В. М., д.т.н., проф., ФИЦ ИУ РАН; Цирулев А. Н., д.ф.-м.н., проф., ТвГУ; Цитович И. И., д.ф.-м.н., доцент, ИППИ РАН; Чулуунбаатар О., д.ф.-м.н., ЛИТ ОИЯИ; Шоргин С. Я., д.ф.-м.н., проф., ФИЦ ИУ РАН; Щетинин Е. Ю., д.ф.-м.н., проф., СТАНКИН.

Оргкомитет:

Председатель: Васильев С. А., к.ф.-м.н. (РУДН).

Зам. председателя: Диваков Д. В. (РУДН); Острикова Д. Ю., к.ф.-м.н. (РУДН); Соченков И. В., к.ф.-м.н. (РУДН); Стрельцова О. И., к.ф.-м.н., с.н.с. (ЛИТ ОИЯИ).

Члены оргкомитета: Никитина Е. В., к.х.н., зам. декана по науке (РУДН); Малых М. Д., к.ф.-м.н. (РУДН); Демидова А. В., к.ф.-м.н. (РУДН); Тютюнник А. А. (РУДН).

Секции:

Теория телетрафика и ее применения

Сопредседатели: д.т.н., проф. Башарин Г. П. (РУДН), к.т.н., проф. Пшеничников А. П. (МТУСИ), к.ф.-м.н. доцент Гудкова И. А. (РУДН).

Секретарь: к.ф.-м.н. Острикова Д. Ю. (РУДН).

Сети связи следующего поколения: управление, качество, архитектура

Сопредседатели: д.т.н., проф. Самуйлов К. Е. (РУДН), д.т.н., проф. Вишневский В. М. (ИПУ РАН), к.ф.-м.н., доцент Гайдамака Ю. В. (РУДН).

Секретарь: Горбунова А. В. (РУДН).

Прикладные информационные системы

Сопредседатели: д.ф.-м.н., проф. Осипов Г. С. (ФИЦ ИУ РАН), проф. Толмачев И. Л. (РУДН).

Секретарь: Новикова Д. С. (РУДН).

Высокопроизводительные технологии распределенных вычислений

Сопредседатели: д.т.н., проф. Кореньков В. В. (ЛИТ ОИЯИ), к.ф.-м.н., доцент Кулябов Д. С. (РУДН).

Секретарь: к.ф.-м.н. Демидова А. В. (РУДН).

Математическое моделирование

Сопредседатели: д.ф.-м.н., проф. Севастьянов Л. А. (РУДН), д.ф.-м.н., проф. Крынев А. В. (НИЯУ «МИФИ»), к.ф.-м.н., проф. Дружинина О. В. (ФИЦ ИУ РАН).

Секретарь: к.ф.-м.н. Демидова А. В. (РУДН).

И74

Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологических систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 24–28 апреля 2017 г. — Москва : РУДН, 2017. — 370 с. : ил.

ISBN 978-5-209-07913-2

© Коллектив авторов, 2017

© Российский университет дружбы народов, 2017

Содержание

Теория телетрафика и её применения

Берснев Г. Б., Воронков С. С. Исследование потоков графических данных в трафике компьютерного класса	10
Ботвинко А. Ю. Оптимизация набора правил фильтрации в межсетевых экранах	13
Васильев А. П. Построение и анализ модели с динамическим распределением каналного ресурса при обслуживании трафика реального времени и эластичного трафика данных	15
Журко А. М., Степанов М. С., Степанов С. Н. Построение и анализ модели call-центра с учетом навыков операторов и нетерпеливости абонентов	18
Заринова Э. Р., Чухно Н. В., Чухно О. В. Разработка математической модели бизнес-процесса телекоммуникационной компании	21
Зарядов И. С., Богданова Е. В., Милованова Т. А. Характеристики системы массового обслуживания с обновлением и рекуррентным обслуживанием по вложенной цепи Маркова	24
Иванова Д. В., Карнаухова Е. А., Гольская А. А., Маркова Е. В. Марковская модель схемы совместного использования ресурсов со снижением скорости обслуживания в беспроводной сети	27
Калинина К. А. О случайном суммировании нагрузки при оценивании эффективной пропускной способности узла высокоответственной сети	30
Киселева К. М. Исследование некоторых нестационарных моделей массового обслуживания, описываемых неоднородными марковскими цепями с непрерывным временем	33
Кутбитдинов С. Ш., Лохмотко В. В. Асимптотическая модель сбалансированной IP-сети с распределенной структурой.	35
Мокров Е. В., Полуэктов Д. С., Гудкова И. А. Вероятностная модель загрузки данных подвижному устройству в беспроводной сети LTE	38
Назаров А. А., Бронер В. И. Модифицированная модель Крамера-Лундберга с релейным управлением поступлением ресурса	41
Полуэктов Д. С., Мокров Е. В. Анализ времени ожидания доступа к ресурсам совместного использования в модели с эластичным трафиком и прерыванием обслуживания	44
Потатуева В. В., Лисовская Е. Ю., Моисеева С. П. Асимптотический анализ системы $MMPPI GI _{\infty}$ с заявками случайного объема	47
Сарайкин И. В. Бизнес-процесс оказания услуг профессиональной видеосъемки и монтажа как сеть массового обслуживания	50
Сопин Э. С., Самуйлов К. Е. Рекуррентный алгоритм вычисления вероятностных характеристик для СМО с ограниченными ресурсами и случайными требованиями	52
Уанкло Г. Ж. К., Козырев Д. В. Анализ чувствительности характеристик надёжности модели резервирования системы передачи данных к виду распределений времени безотказной работы и ремонта её элементов	55
Фёдорова Е. А. Исследование RQ-системы $M M 1$ с нетерпеливыми заявками в условии большой загрузки	59
Филонец Т. А. Моделирование телеграфного процесса	63
Цурлуков В. В., Крупко О. С., Зарядов И. С. Входящий поток, управляемый цепью Маркова (ММАР). Использование в задачах теории телетрафика	66

Чукарин А. В., Зарипова Э. Р., Смирнова Н. М. Моделирование семи эталонных клиентоориентированных бизнес-процессов телекоммуникационной компании	69
Шкленник М. А., Моисеева С. П. Исследование суммарного потока обращений в неоднородной системе массового обслуживания с неограниченным числом обслуживающих устройств и повторными обращениями	72
Штыкова Е. Н. Анализ марковских сетей с доходами, положительными и отрицательными заявками	75

Сети связи следующего поколения: управление, качество, архитектура

Абаев П. О. Угрозы безопасности в программно-конфигурируемых сетях	77
Абаев П. О., Царев А. С., Леон Агупанья М. К. Модель для анализа показателей эффективности виртуальных сетевых функций в 5G сетях	80
Агеев К. А., Сопин Э. С. Дискретизация функции распределения требований к ресурсу для анализа характеристик M2M трафика	83
Адаму А., Медведева Е. Г., Гайдамака Ю. В. К анализу характеристик туманно-облачных вычислений	86
Андреев С. Д. О причинах и последствиях технологической фрагментации современного интернета вещей	89
Ардилла Пинто А. Процедура установления соединения по каналу случайного доступа	92
Ардилла Пинто А., Семенова О. В., Власкина А. С., Зарипова Э. Р., Гудкова И. А. К разработке имитационной модели схемы установления соединения по каналу случайного доступа	95
Бегишев В. О., Молчанов Д. А., Самуйлов А. К. Анализ сотовой технологии интернета вещей NarrowBand IoT	98
Бесчастный В. А. Дискретная модель с групповым обслуживанием для анализа схемы доступа транспортных средств к ресурсам беспроводной сети	101
Власкина А. С., Семенова О. В., Гудкова И. А. Об алгоритме использования технологий мультимедиа и прямого взаимодействия устройств для передачи данных в беспроводной сети	104
Волков А. С., Бахтин А. А., Миронов А. В., Солодков А. В., Кульпина Ю. А. Применение широкополосных сигналов в сетях MANET	107
Гайдамака Ю. В., Жданков А. Н. Алгоритм моделирования расположения взаимодействующих устройств для оценки интерференции в сетях беспроводной связи	110
Гайдамака Ю. В., Русина Н. В., Фомченко Т. Д., Цветкова О. О. Алгоритм расчета вероятности блокировки заявок на узлах пассивной оптической сети	113
Гудкова И. А., Самуйлов К. Е. К разработке модели схемы совместного доступа к ресурсам беспроводной сети с адаптивной скоростью обслуживания пользователей	116
Дараселия А. В., Сопин Э. С. Анализ энергопотребления системы облачных вычислений с учетом разогрева и выключения серверов	119
Дзантиев И. Л., Харин П. А., Маркова Е. В., Гудкова И. А. К разработке вероятностной модели затухания сигнала в беспроводной сети с разноудаленными от базовой станции и разновысокими устройствами	122
Ибрагимов Б. Г., Гасанов М. Г., Керимов В. Р. К анализу показателей эффективности функционирования сетей NGN/IMS при оказании мультимедийных услуг	124

Ибрагимов Б. Г., Гумбатов Р. Т., Ибрагимов Р. Ф. Исследование эффективности интеллектуальной сети связи при установлении соединения	127
Мащевич И. А., Самуйлов К. Е. Модель разделения нагрузки в системах туманных вычислений	130
Мачнев Е. А., Полужков Д. С., Мокров Е. В. К разработке мобильного приложения для измерения качества радиоканала и моментов совершения хэндовера в беспроводной сети LTE	133
Осипов О. А. Построение модели системы распределённых вычислений в виде системы массового обслуживания с делением и слиянием требований	135
Саркер М., Острикова Д. Ю. К анализу вероятностных характеристик процедуры веб-браузинга в условиях ненадежности ресурсов беспроводной сети	137

Прикладные информационные системы и технологии

Данилов И. Д. Программная реализация графического интерфейса, направленного на моделирование инвестиционных проектов	140
Докучаев Д. А. Методы решения задач распознавания изображений	143
Жарикова С.-Н. А. Тематическая кластеризация новостных сообщений	147
Исаев А. А. Выделение параметров для обучения ЭС, решающей задачи ТОРО	150
Каменская М. А., Храмоин И. В. Разрешение референции в текстах на русском языке	153
Карпов А. В., Деникин А. С., Наumenко М. А., Алексеев А. П., Рачков В. А., Самарин В. В., Сайко В. В. Сетевая база знаний NRV по ядерной физике низких энергий	156
Кулзак О. Д. Д. Интеллектуальный анализ клинических данных	159
Лорян К. А., Иванов В. Е. Расширение функциональности партионного учета себестоимости в среде 1С: Предприятие	161
Лукина М. С. Экспериментальные исследования задачи планирования траектории на картах специального вида	164
Панкратов А. С., Мазри А. Построение интегрированной информационной системы, объединяющей базы данных компаний, обеспечивающих грузоперевозки	167
Панкратов А. С., Пшеунов А. Х. Построение интегрированной информационной системы, объединяющей транспортные расписания	170
Сарибекян М. А. Исследование зависимости основных макроэкономических показателей Российской Федерации с помощью корреляционно-регрессионного анализа	173
Симон К. К. Сетевая защита с помощью средства машинного обучения	176
Соколова Т. А. Методы автоматического извлечения и сегментации библиографических ссылок из научных текстов	179
Хамбикова Г. М. Разработка метода интеллектуального анализа социально-экономических данных	182
Харитонов А. С., Жуков В. В. Сравнительный анализ статистических систем, используемых при проведении клинических и биомедицинских исследований	185
Хасаншина А. Д. Анализ методов разработки диалоговых систем	188
Фомин М. Б. Использование тестовых данных в процессе описания метаданных многомерных информационных систем	191

Черчик К., Меняшина А. Ю., Толмачев И. Л. Технология автоматизации документо-оборота	194
Шагаев Е. А. Структуры данных для хранения больших массивов данных и алгоритмы быстрого доступа к ним	197

Высокопроизводительные технологии распределённых вычислений

Адам Г., Беляков Д. В., Валя М., Зрелов П. В., Кореньков В. В., Матвеев М. А., Подгайный Д. В., Стрельцова О. И. Расширение функциональных возможностей гетерогенного кластера HybriLIT	200
Адам Г., Вальова Л., Валя М., Заикина Т. Н., Киракосян М. Х., Кутовский Н. А., Федоров К. В., Подгайный Д. В., Стрельцов А. И., Стрельцова О. И., Торосян Ш. Г. Новые компоненты программно-информационной среды гетерогенного кластера hybriLit	203
Александров Е. И., Башашин М. В., Беляков Д. В., Волохова А. В., Земляная Е. В., Зуев М. И., Кутовский Н. А., Матвеев М. А., Нечаевский А. В., Ососков Г. А., Подгайный Д. В., Рахмонов И. Р., Стрельцова О. И., Трофимов В. В., Шукринов Ю. М. Исследование эффективности MPI-расчетов на облачной и гетерогенной инфраструктурах МИВК ОИЯИ	206
Валя М., Майоров А. В., Бутенко Ю. А. Развитие сервиса Stat-HybriLIT для гетерогенного кластера HybriLIT	209
Зуев М. И., Башашин М. В., Беляков Д. В., Кутовский Н. А., Матвеев М. А., Подгайный Д. В., Стрельцова О. И. Тестовый полигон для исследования эффективности проведения параллельных расчетов на облачной и гетерогенной вычислительных системах	212
Кулябов Д. С., Геворкян М. Н., Королькова А. В., Севастьянов Л. А. О поддержке параллельных вычислений в языке Julia	215
Кутовский Н. А., Нечаевский А. В., Ососков Г. А., Пряхина Д. И., Трофимов В. В. Моделирование MPI-приложений, выполняемых на гетерогенных вычислительных ресурсах	218
Мажитова Е. М., Балашов Н. А., Баранов А. В., Кутовский Н. А., Семенов Р. Н. Использование облачных технологий в ЛИТ ОИЯИ	221
Никонов Э. Г., Казаков Д. С. Механизм управления процессом сходимости итерационного метода Ньютона	224
Федосов М. Е., Коробов Н. А., Назаренко К. М. Оценка временных характеристик вычислительных экспериментов с использованием квантово-химических методов	227

Математическое моделирование

Агавелян Г. В. Формирование инвестиционного портфеля по модели Г. Марковица	229
Аль-Натор М. С. Задача выбора оптимального портфеля с двусторонними ограничениями и с комиссией в условиях определенности	232
Аль-Натор С. В., Новиченкова М. Г. Хеджирование фьючерсными контрактами в нефтегазовой отрасли РФ	235
Амирханов И. В., Доля С. Н., Сархадов И. Математическое моделирование движения протонов в сильноточном линейном ускорителе	238
Амирханов И. В., Саркар Н. Р. Об одном методе исследования нелинейной самосогла-сованной задачи на собственные значения с растущим потенциалом нечетной степени	241

Бугрий Г. С., Пономаренко Е. Ю. Об обратной задаче потенциала для тела постоянной толщины в слоистой среде	244
Будочкина С. А. Гамильтоновы и Гамильтона-допустимые уравнения, скобки Пуассона и алгебраические структуры в механике бесконечномерных систем	246
Велиева Т. Р., Королькова А. В., Кулябов Д. С. Гармоническая линеаризация модели системы с управлением	249
Велиева Т. Р., Платонова А. А. Программный комплекс определения значений параметров автоколебательного режима в системах с управлением	252
Веселов А. В. Вычисление нормали к поверхности, заданной приближенно	256
Вiana И. К., Зарядов И. С. Применение марковских моделей для анализа страховых компаний	258
Диваков Д. В., Древицкий А. С. Задача численного моделирования распространения волноводных мод в регулярном однородном открытом волноводе	261
Дружинина О. В., Масина О. Н. Анализ устойчивости многомерных моделей динамики популяций на основе принципа редукции	264
Емельянова Е. Ю., Исмаилов И. И., Петров В. А., Попова Е. В., Савин А. С., Хохлов А. А. К задаче анализа состава тела человека	268
Ермаčkова А. В., Пономаренко Е. Ю. Об обратной задаче потенциала для бесконечно тонкого тела в слоистой среде	271
Ефeрина Е. Г., Кулябов Д. С. Элементы диаграммной техники для статистических моделей	273
Завозина А. В., Мухина Д. Б. Применение метода гармонической линеаризации для определения значений параметров автоколебательного режима в системах с управлением	276
Зайцева А. А., Зарядов И. С. Цепи Маркова высшего порядка, их применение и построение в R	280
Иванов В. В., Крянев А. В., Осетров Е. С. Прогнозирование суточного потребления электроэнергии в Московском регионе на основе сингулярно-спектрального анализа	283
Иванов В. В., Крянев А. В., Севастьянов Л. А., Удumян Д. К. Прогнозирование временных рядов с помощью метрического анализа	286
Камнев А. В. Имитационное моделирование алгоритмов с управлением	289
Карамышева А. В., Шипова Е. П. Прогнозирование расходов пенсионного фонда России при увеличении пенсионного возраста	292
Касимов Ю. Ф. Риск менеджмент позиций в однопериодных финансовых сделках	295
Керимов А. К., Марченко М. Н. Стохастическое моделирование влияния метеофакторов на результаты электрометрического мониторинга	298
Крянев А. В., Орехов А. А., Пинегин А. А., Семенов С. В., Удumян Д. К. Моделирование ксеноновых переходных процессов на основе данных реакторных экспериментов и метрического анализа	301
Кузв Я. Ю. Прямая реализация псевдоспектрального метода вычисления волноводных мод	304
Кулябов Д. С., Геворкян М. Н., Королькова А. В., Демидова А. В. Стохастическое моделирование ветроэнергетических установок	307
Ломидзе И. Р., Евлахов С. А. Об одном методе классификации эрмитовых матриц по унитарным инвариантам	309

Малькова А. М., Зарядов И. С. Скрытые марковские модели, их применение и моделирование в пакете R	310
Матюшенко С. И., Сухина Ю. И. Эконометрическое моделирование зависимости между спросом и предложением на рынке дизельного топлива	313
Михеев А. В. Механизмы управления риском страховых исков	316
Мусаев В. К. Математическое моделирование динамических упругих напряжений в полуплоскости с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем) с помощью волновой теории сейсмической безопасности	319
Мусаев В. К. Численное моделирование динамических упругих напряжений в полуплоскости с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем) с помощью волновой теории взрывной безопасности	322
Нсамо В. Д., Мануэль М. А., Бенто А. Э., Гаспар С., Маршалл О. И. Р. Реализация генераторов псевдослучайных чисел на языке Julia	325
Пермякова Ю. С. Оценка и анализ стабильности финансового состояния страховой компании	327
Петров А. А. Алгоритмы поиска оптимальных траекторий для моделей управляемых технических систем	330
Полуян С. В., Ершов Н. М. Разработка эффективных алгоритмов биоинформатики на основе решения модельной задачи укладки графов	333
Пузынин И. В., Пузынина Т. П., Христов И. Г., Христова Р. Д., Тухлиев З. К., Шарипов З. А. Развитие непрерывно-атомистического метода для моделирования процессов взаимодействия тяжелых ионов высоких энергий с конденсированными средами	336
Стародубцев В. В., Мусаев А. В., Дикова Е. В., Крылов А. И. Моделирование достоверности и точности импульсного воздействия в упругой полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К.	339
Сучков Д. А., Перепелкин Е. Е. Исследование энтропии систем многих частиц в неравновесных процессах	342
Талагаев Ю. В. Стабилизация класса 3D хаотических систем, представленного нечеткой моделью Такаги-Сугено.	343
Тарелкин А. А., Перепелкин Е. Е. Исследование поведения решения нелинейного уравнения дивергентного типа	346
Третьяков Н. П., Кафарова М. В., Кафаров Р. Р. Оптимизация объема властных полномочий по критерию удельного потребления	348
Федоров А. Л., Шиянов С. М., Саликов Л. М., Блинные В. В. Моделирование плоских волн при распространении импульса (восходящая часть – линейная, нисходящая часть – четверть круга) в упругой полуплоскости с помощью комплекса программ Мусаева В. К.	353
Хведелидзе А. М., Рогожин И. А. Генерация ансамблей Гильберта–Шмидта и Бура для пар кубитов и кутиров	356
Цыганкова В. С. Реализация генераторов стохастических процессов.	358
Щербаков А. В. Анализ устойчивости нелинейной модели популяционной динамики на основе свойств дивергенции поля скоростей	360
Щетинин Е. Ю., Мартынова В. М. О моделировании пространственных структур статистической зависимости экстремальных осадков	363

О ПОДДЕРЖКЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЯЗЫКЕ JULIA

Кулябов Д.С., Геворкян М.Н., Королькова А.В., Севастьянов Л.А.

Российский университет дружбы народов,
kulyabov_ds@rudn.university, gevorgyan_mn@rudn.university,
korolkova_av@rudn.university, sevastianov_la@rudn.university

Целью доклада является краткий обзор средств для параллельных вычислений, реализованных в текущей версии Julia — молодого перспективного языка для научного программирования. Изложение иллюстрируется большим количеством примеров.

Ключевые слова: научное программирование, параллельные вычисления, Julia. Работа частично поддержана грантами РФФИ № 15-07-08795, 16-07-00556. Также публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 02.A03.21.0008).

Введение

Язык программирования Julia [1,2] является динамическим, номинативным языком высокого уровня с параметрическим полиморфизмом. Язык разрабатывается в первую очередь для высокопроизводительных научных вычислений, хотя может использоваться и как язык общего назначения. Первая публичная версия языка была представлена в 2012 году, на начало 2017 года актуальной является версия 0.5. Несмотря на новизну, уже сейчас выходят книги с описанием языка и популярных библиотек, в том числе переведенные на русский язык [3].

Данная работа носит обзорный характер. Вначале дается общее описание основных особенностей языка, а затем более подробно описываются возможности параллельного программирования, поддерживаемые текущей версией языка.

Ключевые особенности языка

Основной задачей разработчиков Julia было совмещение сильных сторон различных языков и сред, используемых в научных вычислениях. От интерпретируемых языков, таких как Python и Ruby была перенята простота, краткость синтаксиса и возможность интерактивного выполнения, а от компилируемых языков, таких как C и Fortran — производительность.

Базовый синтаксис Julia весьма интуитивен и требует минимального времени для освоения. Присутствует большое количество синтаксического сахара, упрощающего программирование математических формул и выражений. Например, в язык встроена поддержка Unicode, так что становится возможным использовать в именах переменных практически любые символы из любого алфавита, поддерживаемого этой кодировкой.

Высокая производительность достигается благодаря использованию LLVM компиляции. В некоторых задачах Julia приближается по скорости выполнения к компилируемым языкам (C и Fortran), хотя в целом не превосходит их. Другие же языки, чаще всего используемые в научных вычислениях (Matlab, Python, Mathematica, Maple) уступают Julia на порядок. Авторы предусмотрели прямой вызов библиотек на C и Fortran, что с одной стороны призвано компенсировать недостаток в производительности на критических участках программы, а с другой стороны восполнить отсутствие необходимых библиотек.

Нацеленность именно на научное программирование выражена в частности во встроенной реализации комплексных чисел, матричных операций, рациональных дробей, большого количества встроенных математических функций.

Параллельные вычисления

В настоящий момент существуют несколько широко доступных аппаратных решений, которые обеспечивают выполнение параллельных программ: многопроцессорные системы с общей памятью, кластеры и системы с графическими ускорителями (CUDA и OpenCL).

В язык Julia встроены средства для написания программ, предназначенных для выполнения на кластере, а также на одном компьютере с многоядерным процессором. Параллелизм в Julia в основном реализован в рамках процессов, а нити (потoki) поддерживаются пока только экспериментально.

В отличие от технологии MPI, параллельное программирование в Julia опирается не на явное получение и отправку сообщений от процесса к процессу, а на удаленные обращения (*remote references*) и удаленные вызовы (*remote calls*). Удаленное обращение может использоваться любым процессом для получения доступа к любому объекту, находящемуся в ведении другого процесса. Удаленный вызов в свою очередь позволяет одному процессу послать запрос другому процессу на выполнение определенной функции.

Распределение работы между процессами в большинстве случаев осуществляется автоматически. Удаленный вызов производится с помощью функции `remotecall()`. Данная функция немедленно возвращает объект `Future`, хотя вычисления могут еще долго продолжаться на удаленном процессе. Для получения результатов вычисления с удаленного процесса применяется функция `fetch()` или `wait()`. Удаленный вызов также может осуществлять макрос `@spawnat`. Функция `remotecall_fetch()` является по своей сути комбинацией функции `remotecall()` и `fetch()` то есть процесс выполнения на текущем процессе останавливается до получения результата вычисления с удаленного процесса.

Для работы с кластерами в Julia предусмотрены соединения с удаленными машинами с помощью `ssh`, а также управление запущенными на удаленных узлах процессами.

Обмен данными между процессами в большинстве случаев происходит не явно, что отличается от подхода технологии MPI, где программист должен прописать логику передачи сообщений между процессами при разработке кода.

Параллельные циклы и `map reduce`

Многие задачи, которые можно эффективно распараллелить, не требуют интенсивной пересылки данных. К таким задачам относится параллельное выполнение различных витков цикла. В Julia предусмотрены макросы для этой цели. Рассмотрим следующие простой пример:

```
nheads = @parallel (+) for i=1:200000000
    Int(rand{Bool})
end
```

Итерации данного цикла распределяются между процессами, затем к результатам работы процессов применяется операция, указанная в скобках после макроса `@parallel` (в нашем примере `+`). Таким способом можно очень эффективно распараллеливать циклы, итерации которых могут выполняться независимо друг от друга.

Если в параллельном цикле необходимо манипулировать с массивом данных, то вместо стандартного массива следует использовать разделяемый массив (`SharedArray`). Элементы такого массива будут доступны всем задействованным процессам, и его можно применять в параллельных циклах:

```
a = SharedArray{Float64,10}
@parallel for i=1:10
    a[i] = i
end
```

Параллелизация с помощью нитей

Julia поддерживает параллелизацию с помощью нитей, хотя на данный момент эта функция считается экспериментальной и синтаксис может существенно измениться, по мере развития языка. В отличие от процессов нити имеют общую область памяти и требуют меньше ресурсов. Нити оптимальны при параллелизации в рамках одного многоядерного процессора. На данный момент имеющийся функционал обеспечивает макрос `@threads`. Он, например, позволяет распределить итерации цикла между нитями:

```
Threads.@threads for i = 1:10
    a[i] = Threads.threadid()
end
```

К сожалению, поддержка нитей в Julia пока весьма ограничена по сравнению, например, с OpenMP.

Заключение

На данный момент язык Julia поддерживает базовые технологии параллельных вычислений на основе процессов. Синтаксис, обеспечивающий написание параллельных программ, встроен в ядро языка, поэтому есть уверенность, что он будет развиваться по мере развития языка. На данный момент имеющегося функционала уже достаточно для создания производительных параллельных программ, работающих как на кластере, так и на одном компьютере с несколькими процессорами (ядрами).

Литература

1. Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing / Jeff Bezanson, Alan Edelman, Stefan Karpinski, Viral B. Shah.—2014.— November.— arXiv : cs.MS/1411.1607.
2. Julia: A Fast Dynamic Language for Technical Computing / Jeff Bezanson, Stefan Karpinski, Viral B. Shah, Alan Edelman.— 2012.— September.— arXiv : cs.PL/1209.5145.
3. Малькольм Шеррингтон Осваиваем язык Julia.— М.: ДМК Пресс. — 416 с. — 2017. ISBN : 978-5-97060-370-3, 978-5-97060-370-3

SUPPORT FOR PARALLEL COMPUTING IN JULIA LANGUAGE

Kulyabov D. S., Gevorkyan M. N., Korolkova A.V., Sevastianov L. A.

*RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia),
kulyabov_ds@rudn.university, gevorkyan_mn@rudn.university,
korolkova_av@rudn.university, sevastianov_la@rudn.university*

The aim of the report is a brief overview of the parallel computing implemented in the current version of Julia — a young language for scientific programming. In this report, we use different examples to illustrate Julia capabilities of parallel computing.

Key words: scientific programming, parallel computing, Julia Language.