

являются процессы возникновения самоорганизующихся структур, эмерджентные, нелинейные и динамические системы и т.д. В этом смысле теория сложности перерастает в новую науку об организованной сложности. Эта наука является симбиозом идей кибернетики, системного подхода, нелинейной физики и квантовой механики, и решающую роль в ней играют информационные технологии.

Амелин К.С., Граничин О.Н., Кияев В.И.

### О возможном пути развития принципиально новых компьютерных устройств и систем

(СПбГУ, СПбГУЭФ, Санкт-Петербург)

Обсуждается вопрос, какими возможно будут принципиально новые вычислительные системы, в основе которых лежит представление компьютера как устройства, состоящего из набора асинхронных динамических моделей (функциональных элементов). Основные черты представления: стохастичность, гибридность, асинхронность, отсутствие жесткой централизации, динамическая кластеризация на классы связанных моделей.

#### 1. Изменение парадигмы вычислений

За шесть десятилетий развития средств вычислительной техники пройден путь от ламп, через транзисторы, интегральные микросхемы к сверхбольшим интегральным микросхемам. Что будет дальше? Основной вопрос настоящего времени уже не сводится просто к наращиванию мощности вычислительных устройств – он трансформировался к вопросу: «Как эффективно использовать имеющиеся мощности для сбора, обработки и использования данных?»

Быстрое развитие электронных технологий приводит к тому, что компьютеры становятся все меньше и меньше, и это позволяет использовать их во всё более миниатюрных устройствах – мобильных телефонах, цифровых фотоаппаратах, различных видеустройствах. Когда-то думали, что более мощные вычислительные системы по необходимости будут требовать больше места под периферию, память и т.д. Это предположение оказалось неверным. В 1965 г. Г. Мур сформулировал правило, имеющее силу и сейчас («закон Мура»), согласно которому производительность вычислительных систем растет экспоненциально (так как число полупроводников на единицу площади удваивается каждые восемнадцать месяцев) [1]. Г. Мур вывел свой эмпирический закон, построив зависимость числа транзисторов в интегральной микросхеме от времени. Как следствие, из этого можно было оценить темпы миниатюризации отдельного транзистора. В настоящее время развитие цифровых технологий приводит к тому, что размер элементарного

вычислительного устройства приближается к размеру молекулы или даже атома. На таком уровне законы классической физики перестают работать и начинают действовать квантовые законы, которые для многих важных динамических задач еще не описаны теоретически.

Увеличение быстродействия вычислительных устройств и уменьшение их размеров с неизбежностью приводит к необходимости операций с «переходными» процессами. Логично было бы перейти от устоявшихся операций с классическими битами к операциям, задаваемым теми или иными динамическими моделями микромира. Введение более широкого класса моделей было бы более обоснованным, если бы удалось, например, для функции, значения которой записаны в кластере квантовых битов, определить операцию, эффективно выполняющую, например, преобразование Фурье. При этом вполне может оказаться, что время на её выполнение будет соизмеримым со временем выполнения одной классической операции, так как аналоги операций типа операции «свертки функций» вполне могут обнаружиться «в природе». Исследования похожих моделей, проводившихся в последнее время, показывают, что их выполнение за счет присущей природе способности к самоорганизации не обязательно «раскладывается» на более простые кирпичики, т.е. не всегда может быть записано в виде классического алгоритма.

Новые потребности, глобализация задач, экспоненциальное возрастание сложности вычислительных систем и намечившийся в последнее время подъём отечественной ИТ-отрасли в развитии суперкомпьютерных вычислений (суперкомпьютеры российских компаний «Т-Платформы», «СКИФ-Аврора» и другие проекты) заставляют уже в практическом плане задуматься о перспективах и возможной смене парадигмы: «Каким должен быть процесс вычислений?» Объективные сегодняшние тенденции – миниатюризация и повышение производительности процессоров, как это и было предсказано законом Мура, – приводят технологии к порогу развития традиционных вычислительных устройств. От приоритетов бесконечного наращивания тактовой частоты и мощности одного процессора производители переходят к многоядерности, параллелизму и т. п. (рис. 1).



Рис. 1. Предпосылки изменения вычислительной парадигмы

На прошедшей в сентябре 2010 года в Абрау-Дюрсо Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи» во многих докладах ставился вопрос: «Что будет при переходе от сегодняшних производительностей суперкомпьютеров в «TeraFlops» к следующему масштабу «ExaFlops»? Вл.В. Воеводин говорил: «Переход к “ExaScale”», естественно, должен будет затронуть такие важнейшие аспекты вычислительных процессов, как: *модели программирования, степень и уровни параллельности, неоднородность программных и аппаратных систем, сложность иерархии памяти и трудности одновременного доступа к ней в распределенных вычислениях, стек системного и прикладного ПО, надежность, энергопотребление, сверхпараллельный ввод/вывод ...* » [2]. По нашему мнению, всё это неизбежно приведёт к смене парадигмы высокопроизводительных вычислений (рис. 2)!

Сейчас несколько ядер в процессоре переносного компьютера – уже норма, а в процессорах суперкомпьютеров ядер в тысячи раз больше. «Джин выпущен из бутылки»: пройдет совсем немного времени и ядер станет несколько десятков, а потом и сотен тысяч!

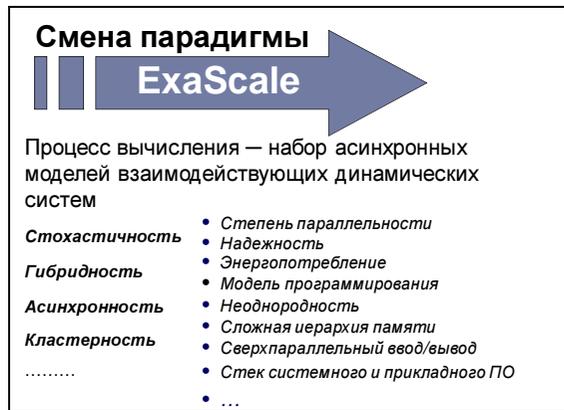


Рис. 2. Проблемы развития суперкомпьютинга и новая парадигма вычислений

Появятся совершенно другие архитектуры, ядра будут объединяться в сложные композитные блоки. К данным можно будет получать параллельный одновременный доступ разным вычислительным блокам, «общение» вычислительных блоков между собой будет происходить через общую память (рис. 3). Это приведет к тому, что изменятся многие аспекты парадигмы: «Что такое вычислительное устройство и что такое вычислительный процесс». Изменятся традиционные представления о том, как устроен компьютер, что такое вычислительная система. Эти процессы принесут изменения и в стиль программирования, и в то, как будут использоваться вычислительные устройства.

Переход к новой парадигме вычислений приведет, видимо, к тому, что архитектура вычислительных устройств «сдвинется» в сторону «набора одновременно работающих асинхронных моделей взаимодействующих динамических систем (функциональных элементов)». Среди новых характерных параметров будущей парадигмы все более отчетливо проступают следующие: стохастичность, гибридность, асинхронность, кластерность (отсутствие жесткой централизации и динамическая кластеризация на классы связанных моделей) [3].

**Стохастичность.** С одной стороны, хорошо известно, что компьютеры становятся все миниатюрнее и миниатюрнее, размер элементарного вычислительного элемента (вентилля) приближается к размеру молекулы или даже атома. На таком уровне законы классической физики, как было сказано выше, перестают работать, и начинают действовать квантовые законы, которые в силу принципа неопределенности Гейзенберга принципиально не дают точных ответов о состоянии элемента вычислительной системы. С другой стороны, стохастичность – это известное свойство сложных динамических систем, состоящих из огромного числа компонент.



Рис. 3

Под *гибридностью* будущих процессов вычислений можно понимать необходимость рассмотрения комбинации непрерывных и дискретных процессов, т. е. учет непрерывной эволюции протекания физических процессов при работе той или иной модели и скачкообразное переключение с одной модели на другую.

Увеличение быстродействия вычислительных устройств и уменьшение их размеров с неизбежностью приводит к необходимости операций с «переходными» процессами. Серьезным ограничением классической модели вычислений является разбиение памяти на изолированные биты. Во-первых, сокращение длины такта и расстояний между битами с определенного уровня делает невозможным рассматривать их изолированно в силу законов квантовой механики. Вместо примитивных операций с классическими битами в будущем логично перейти к операциям, задаваемыми теми или

иными динамическими моделями микромира, оперирующими с наборами взаимосвязанных «битов» [4-7]. При этом простейшими «моделями» могут остаться классические операции с битами.

*Асинхронность.* Отказ от унифицированных простых вычислительных элементов неизбежно приводит к отказу от синхронизации работы различных компонент, имеющих существенно отличающиеся физические характеристики и свои длительности «тактов». В рамках классической теории множеств противоречивый смысл понятия единого «такта» выражается в рамках неразрешимости проблемы континуума в рамках аксиоматики Френкеля-Цермело.

*Кластерность.* Одним из неожиданных результатов многочисленных попыток в разработках (создании, адекватном описании поведения и управлении) сложных стохастических систем оказалась перспективность модели мультиагентных систем, в которой топология связей агентов между собой меняется со временем. При этом «агентом» может быть как некоторая динамическая модель (компонент системы), так и определенный набор моделей. При отсутствии жесткой централизации такие системы способны эффективно решать достаточно сложные задачи, разбивая их на части и автономно перераспределяя ресурсы на «нижнем» уровне, а эффективность часто повышается за счет самоорганизации агентов и динамической кластеризации на классы связанных моделей.

В некотором смысле, переход к разработке и созданию моделей сложных вычислений закономерный этап развития микропрограммирования. Понимание возможных преимуществ работы устройств с эффективным микрокодом отмечалось еще в 50-е гг. прошлого века. Во втором ряду серии ЕС ЭВМ в конструкцию была заложена возможность динамического микропрограммирования. Хорошо известен целый ряд ЭВМ – от «Мир-1» до «Эльбруса», использующих языки высокого уровня (HLL) как машинные. В настоящее время технологии микропрограммирования, т.е. создания программ в виде компилируемых текстов, естественным образом сдвигаются в сторону физических процессов.

## **2. Обобщение классической схемы Машины Тьюринга**

О.Н. Граничин и С.Л. Молодцов предложили и обосновали новую абстракцию вычислительного устройства, обобщающую схему классической машины Тьюринга [7, 8]. В рамках новой модели переосмысливаются ставшие традиционными понятия «такт», «память», «ленты», «программы» и «состояния». Если в классическом подходе ячейки памяти используются для хранения дискретной информации и их изменение возможно только в тех случаях, когда указатель ленты показывает на нее, то в новой концепции «ячейка памяти» представляет собой постоянно функционирующую модель динамической системы (возможно достаточно сложной), а «лента» – подмножество в общем пространстве состояний, при достижении которого заканчивается очередной «такт» и происходит включение «программы» – скачкообразное переключение с одних моделей на другие. Естественно, что

классическая ячейка памяти для хранения «бита» является частным случаем такого обобщения.

В любых современных вычислительных устройствах хранение информации основано на тех или иных физических принципах, только эволюция состояния ячейки во время хранения более простая – сохраняется постоянной какая-то физическая характеристика. Другими словами, поле вычислений в традиционной информатике можно сравнить с арифметикой, она оперирует цифрами – значениями ячеек памяти (или, более точно – арифметикой конечных двоичных дробей). Предлагаемая новая модель вычислений позволит перейти в информатике от «арифметики» к «функциональному анализу», исследующему процессы эволюции информации внутри новых «ячеек» (операции с функциями).

Другим обобщением может быть вероятностное задание отображений эволюции и программ, что позволит реализовывать с помощью новой модели динамические системы, стохастические гибридные системы, вероятностные автоматы, системы со стохастическим управлением, то есть системы, не описываемые детерминированными законами. Для организации работы такой вычислительной системы, наверное, целесообразно будет использовать рандомизацию, позволяющую частично устранить влияние на работу системы систематических погрешностей, которые практически неизбежны при изменяющейся со временем модели динамической системы [9].

Предлагаемая новая модель вычислений позволяет описывать если не все, то подавляющее большинство процессов реального мира, а также работу всевозможных существующих и будущих вычислительных устройств, включая аналоговые и биокомпьютеры, нейрокомпьютеры, квантовые компьютеры и т. д. Особенностью рассматриваемого подхода является отказ от редукции сложности в процессе вычисления. Сложность вычисляемого объекта должна быть эквивалентна сложности вычисляемого. Другими словами, понятие вычислительной сложности правильнее рассматривать относительно выбранной системы базисных эволюционных примитивов, а не относительно традиционно рассматриваемых битовых преобразований (0; 1). Квантовые и нейрокомпьютеры обещают сильно изменить представления о вычислительной мощности современных вычислительных устройств. Увеличение вычислительной мощности, возможное за счет использования новых моделей вычислений, основывающихся на физических явлениях, позволяет предположить, что в будущем новые компьютеры смогут решать задачи, невыполнимые для обычных компьютеров.

## **3. Искусственный интеллект**

Человечество накопило большой массив задач, которые компьютеры умеют эффективно решать. Можно рассчитать параметры ядерного взрыва, можно построить модель космологического расширения Вселенной, можно быстро найти решение какого-нибудь важного уравнения и многое-многое другое. При этом для решения одних задач достаточно настольного компьютера, для решения других – требуется мощный суперкомпьютер. Но как нам поступить, если мы хотим «собрать» универсальный вычислитель,

который способен один решать задачи разных уровней сложности? Предположим, что мы делаем не вычислитель, быстро решающий уравнения – наша цель создать «искусственное мыслящее существо», которое в условиях неопределенностей способно распознать реальную ситуацию, выбрать адекватную ей задачу и решить ее. Например, среди всего реализованного набора задач компьютер сам принимает решение о выборе блока, ответственного за решение определенной задачи, который отвечает на запрос: «Да, я распознаю ситуацию, я контролирую её, это моя цель, с ней следует поступать так или этак в зависимости от развития ситуации и т. п.».

Такие системы, которые работают в ситуациях, описываемых в терминах нечеткой логики, плохо «вписываются» в традиционную концепцию архитектуры компьютера, в которой операции обычно выполняются последовательно, данные загружаются последовательно, для выполнении того или иного действия надо последовательно пройти некоторые шаги А, Б, В, ..., задаваемые алгоритмом решения. При достаточно большом количестве шагов и громадных объемах данных, зачастую решаемая задача перестает быть актуальной.

Что можно ждать в перспективе? Простое решение, по которому сейчас идут практически все разработчики вычислительных систем, – собрать всевозможные вычислительные блоки вместе и наращивать их вычислительную мощность – в сегодняшних условиях уже наталкивается на серьёзные проблемы. Это одновременная доставка и структуризация огромных объёмов информации, выбор «ведущего» блока, синхронизация работы многоядерных систем, оптимизация энергетических затрат на производство вычислений, отвод тепла от процессорных блоков и многие другие проблемы. Наверное, когда-то мы сможем собрать блоки (микросхемы), решающие выбранные нами задачи (желательно все) в «клубок» закрученной спирали, как в молекулах ДНК в клетках биологического организма, которые одновременно решают огромное количество задач (аналоги вычислительных функций).

Как могут решаться важные для универсального вычислителя задачи с доступом к памяти, с параллелизмом, данными? Гипотетически можно представить, что химическое или электромагнитное воздействие (например, луч света или другой вид излучения) на такой «клубок» может одновременно воздействовать сразу на все блоки, и каждый из них одновременно с другими «примечает» поступающую информацию «на себя». Традиционная альтернатива параллелизму – перебирать блоки по очереди и смотреть, кому и что лучше подходит. В том блоке, который распознал адекватность текущей информации его задаче и которому информация «подошла» лучше остальных, можно сопоставить возникновение состояния некоторого *информационного резонанса*.

Рассмотрим пример интеллектуальной системы, работающей на перечисленных выше принципах. Представим себе робота, взаимодействующего с реальным миром через стандартные устройства –

датчики, видео и фотокамеры, микрофоны, радиолокаторы, сервомеханизмы. Центральный компьютер робота состоит из тысяч устройств (блоки из «моделей»), обрабатывающих наборы данных, поступающих из внешнего мира, и создающих внутреннее представление (отражение) реального мира в «мозгу» робота. Это представление по очевидным причинам будет создаваться с помехами и должно постоянно корректироваться.

Центральный компьютер использует созданное представление мира для расчета базисной стратегии и оптимальных траекторий перемещения, позволяющих избежать опасностей и выполнить поставленное задание. Функционирование робота в подобных условиях можно представить как одновременное выполнение совокупности параллельных задач, контролируемых разными устройствами в центральном компьютере. Следует отметить, что если резонансные устройства не конкурируют за общий ресурс (видеокамеру, исполнительное устройство и т. д.), то нет необходимости выбирать из них главное.

Работа всех устройств робота (в том числе и вычислительных) регулируется вектором параметров, размерность которого может быть очень большой. Поиск оптимальных значений этих параметров возможен только после постановки задачи, включающей в себя определение функционала качества. В этом случае функционал качества будет оцениваться центральным компьютером. Основные возможные критерии – соответствие внутренней картины мира реальным условиям (число коррекций), число и качество информационных резонансов и т. д. Настройку параметра с высокой размерностью удобнее всего производить рандомизированным алгоритмом стохастической оптимизации, который хорошо ложится на логику квантовых вычислительных устройств и по многим параметрам предпочтительнее других подобных алгоритмов для оптимизации систем в реальном времени [6; 9].

Ещё один, более конкретный пример. Предположим, что у нас есть набор устройств, способных распознавать определенные виды изображений (каждое из устройств настроено на какой-либо конкретный объект). Все эти устройства получают в реальном времени изображение с некоторой цифровой камеры. В каждый момент времени только одно из устройств, объявившее себя «главным», может управлять камерой. Существует также одно устройство, управляющее камерой в случаях, когда никто не объявил себя главным. Оно может действовать по какому-нибудь простому алгоритму, например, осматриваться в круговую или сканировать некоторый важный участок, в котором ожидается появление объектов. Картинка с камеры постоянно подается на входы всех распознавателей, и те в свою очередь пытаются распознать в ней свой объект. Результатом их работы является степень совпадения в процентах (например, объект является движущимся животным или человеком с вероятностью 75%). Под информационным резонансом естественно понимать превышение «степени достоверности» у какого-то из устройств заранее установленного порога (например, 90%), в результате это устройство объявляет себя главным и берет

на себя управление камерой для более детального изучения объекта или слежения за ним.

Резюмируя изложенное выше, можно заключить, что рост мощности «классических» вычислительных устройств и постоянное расширение классов научных и прикладных задач, усложнение этих задач, проблемы с вводом и обработкой данных в суперкомпьютерах с неизбежностью приведут к смене парадигмы вычислений. Из этого с неизбежностью следует необходимость поиска путей создания принципиально новых вычислительных систем, основанных на гибридных стохастических устройствах.

### Литература

1. Закон Мура. Википедия. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Закон\\_Мура](http://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Мура).
2. Воеводин Вл.В. Тринадцатая редакция списка Топ50 самых мощных компьютеров СНГ: суперкомпьютерные центры и задачи // Сб. тр. Всеросс. науч. конф. «Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи» 20-25 сент. 2010 г., Новороссийск. – М., 2010.
3. Амелин К.С., Граничин О.Н., Кияев В.И. Мобильность или супервычисления: кто кого? // Суперкомпьютеры. – 2010. – № 4. – С. 19-23.
4. Shor, P. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM J. Comput.* 26, 1997, p.1484-1509.
5. Tien, D.K. Computing the non-computable, *Contemporary Physics*, 44, 2003, p. 51-71.
6. Вахитов А.Т., Граничин О.Н., Сысоев С.С. Точность оценивания рандомизированного алгоритма стохастической оптимизации // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 4. – С. 86-96.
7. Граничин О.Н., Молодцов С.Л. Создание гибридных сверхбыстрых компьютеров и системное программирование. – СПб., 2006. – 108 с.
8. Граничин О.Н., Васильев В.И. Гибридная модель процесса вычислений: обобщение концепции машины Тьюринга // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2010. – № 6. – С. 51-58.
9. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. – М.: Наука, 2003. – 291 с.