

Ф. А. Мурзин, С. А. Полетаев

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

ВВЕДЕНИЕ

На каждом этапе развития средств вычислительной техники всегда находятся задачи, требующие для своего решения вычислительных мощностей, которые превышают мощности обычных компьютеров, доступных на рынке. Поэтому во все времена развития компьютерной отрасли ведущие страны мира занимались разработкой, реализацией и внедрением суперкомпьютеров.

Вокруг попыток дать определение термина «суперкомпьютер» всегда было много споров. Мы будем придерживаться следующего: компьютеры, включенные в какую – либо редакцию мирового рейтинга пятисот самых мощных машин мира (Top500, [1]), безусловно, заслуживают применения к ним термина «суперкомпьютер». Рейтинг Top500 ведется с июня 1993 года и обновляется два раза в год (в июне и в ноябре). Для ранжирования вычислительных установок в рейтинге Top500 используется некая процедура вычисления «реальной производительности» на тестовой задаче (программе) Linpack. Получаемые при этом оценки производительности обычно называют Linpack-производительностью. Тест Linpack по своей сути сводится к решению системы линейных уравнений с большим числом переменных.

Существуют различные подходы к достижению высокой вычислительной мощности вычислительных установок. Ряд таких подходов можно найти в работе [2]. В последнее время все большую популярность завоевывают архитектуры MPP и кластерный принцип построения суперкомпьютеров:

- используются широкодоступные компоненты – самые обычные процессоры, материнские системные платы (весьма часто двухпроцессорные), модули памяти, жесткие диски;
- из этих компонентов собирают большое число вычислительных узлов;

- вычислительные узлы соединяются между собой системной сетью, для этого используются либо существующие технологии высокоскоростных локальных сетей (например, сегодня это Gigabit Ethernet), либо специализированные высокопроизводительные сетевые технологии (Myrinet, SCI, Infiniband и т.п.);
- системную сеть, как правило, используют только для интеграции вычислительной мощности вычислительных узлов; как правило, это делается за счет реализации при помощи аппаратуры системной сети примитивов MPI [3];
- часто кроме системной сети узлы связывают еще различными сетями:
 - вспомогательной сетью, как правило, с протоколом TCP/IP (используется для передачи файлов и управления узлами);
 - сервисной сетью (например, для управления электропитанием, для мониторинга и управления вычислительными узлами и т. п.)

Возможность создания и использования суперкомпьютеров во всем мире относится к факторам стратегического потенциала оборонного, научно-технического и народно-хозяйственного значения, ибо прогресс любой развитой страны в современном мире невозможен без компьютеризации во всех сферах деятельности. При этом все более проявляется связь между достижениями страны в области создания и овладения передовыми компьютерными технологиями и ее потенциальными возможностями решать ключевые проблемы научно-технического прогресса. Особенно это проявляется в отношении решения научных фундаментальных и прикладных проблем.

Создание и применение современных супер-ЭВМ стало одним из основных направлений в ведущих странах мира. Общие затраты в этой области измеряются миллиардами долларов.

Производительность супер-ЭВМ на протяжении последних 20–30 лет возрастала ориентировочно на порядок за каждое пятилетие. Это отчетливо прослеживается по всей совокупности выпускаемой продукции, и нет оснований сомневаться в продолжении этой закономерности на следующее десятилетие.

По оценке американских экспертов стоимость выпускаемой на рынок новой супер-ЭВМ на 80–85 % окупается возможностями эффективного и быстрого ее применения для решения конкретных задач. Более того, перспективы развития супер-ЭВМ в ближайшем будущем в значительной степени будут определяться успехами вычислительной математики наряду с

успехами электроники. Поэтому в числе важнейших работ по развитию параллельных вычислительных технологий следует назвать:

1. Распараллеливание вычислений, создание новых методов и алгоритмов, ориентированных на эффективное использование в многопроцессорных системах, а также модернизация существующих с реализацией возможностей широкого параллелизма.
2. Разработку систем параллельного программирования, языковых и других средств с сохранением преемственности прикладных программных комплексов по отношению к аппаратным построениям распределенной вычислительной сети.
3. Создание программного обеспечения функционирования многопроцессорных систем, в том числе коммуникационной сети вычислительных модулей (ВМ) и между ВМ и внешними абонентами.
4. Разработку архитектур многопроцессорных вычислительных систем. Инженерное конструирование ВМ и вычислительного поля в целом.
5. Построение и задействование распределенных вычислительных и информационных систем (кластеров рабочих станций, многомашинных комплексов и др.).

Наряду с расширением области применения по мере совершенствования МВС происходит усложнение и увеличение количества задач в областях, традиционно использующих высокопроизводительную вычислительную технику. В настоящее время выделен круг фундаментальных и прикладных проблем, эффективное решение которых возможно только с использованием сверхмощных вычислительных ресурсов. Этот круг, обозначаемый понятием «Grand challenges», включает следующие задачи: структурную биологию, разработку фармацевтических препаратов, генетику, астрономию, транспортные задачи, гидро- и газодинамику, управляемый термоядерный синтез, эффективность систем сгорания топлива, геоинформационные системы, распознавание и синтез речи, распознавание изображений и многое другое.

1. НАЧАЛО ЭРЫ ГОНОК В МИРЕ ЭВМ-ГИГАНТОВ

Современный этап развития науки и техники характеризуется стремительным возрастанием сложности решаемых задач. Обусловлен этот объективный процесс преимущественно двумя причинами. Первая из них состо-

ит в том, что современная наука часто идет не по пути открытия, обнаружения отдельных закономерностей, а по линии моделирования комплексных явлений. Раньше при горении разного рода материалов, к примеру, химиками учитывалось максимум до 100 происходящих при этом химических реакций. При создании же современного химического лазера оказывается необходимым принимать во внимание ход около полутора тысяч реакций. И это не предел. На очереди стоят задачи биохимии. В живой клетке параллельно и последовательно протекает несколько десятков тысяч химических реакций. Да и сложность каждой реакции чрезвычайно высока, ведь число атомов, входящих в одну органическую молекулу, может достигать сотен миллионов.

Вторая причина усложнения научных задач состоит в том, что из года в год возрастает сложность техники – создаваемой человеком «искусственной реальности». Чудо техники, которым уже можно гордиться – современный авиалайнер – содержит более ста тысяч деталей. А число элементов в одной интегральной схеме может достигать нескольких десятков миллионов. При этом размер каждого элемента может быть менее 50 нанометров.

Сложность задач растет параллельно с ростом возможностей вычислительной техники. Не будь этих возможностей, вряд ли хватило бы смелости ставить задачи подобной сложности. Мощные ЭВМ стали необходимыми буквально во всех сферах исследований и разработок: при создании новых автомашин и летательных аппаратов, в проектировании ядерных реакторов, при исследовании космоса и плазмы, в гидрометеорологии, при разведке и добыче полезных ископаемых, а также в химии, точной механике и во многих других областях науки и техники.

Широко используются ЭВМ в микроэлектронике. Для развития вычислительной техники необходима не какая-нибудь, а очень хорошая вычислительная техника. Круг полностью замкнулся: чтобы иметь мощные ЭВМ, необходимы хорошие интегральные схемы; но для того, чтобы их создать, необходимы мощные ЭВМ. Вычислительная техника используется на всех этапах создания микросхем, начиная с проектирования и изготовления фотомасштабов и кончая управлением технологическим режимом их производства и контролем качества готовой продукции. Конечно, в некоторых случаях есть возможность обойтись прямыми натурными экспериментами, но они, как правило, требуют очень большого времени и грандиозных материальных затрат.

С очевидной неизбежностью прогресс в вычислительной технике начинает сказываться на развитии вычислительной математики.

Средства вычислительной техники дополняют физический эксперимент, участвуя в сборе и оперативной обработке различных параметров эксперимента. И хотя роль физического эксперимента по-прежнему остается очень важной, роль численного эксперимента возрастает стремительно.

Некоторые даже считают, что вычислительный эксперимент должен заменить устоявшиеся принципы научных исследований.

Чтобы подтвердить столь радикальное суждение, можно привести такой пример. Численное моделирование профиля самолетного крыла на самых мощных современных ЭВМ, какими располагают сейчас очень не многие страны, можно выполнить примерно за полчаса. Согласно американским данным, стоимость такого моделирования не превышает тысячи долларов.

Много это или мало? Если попытаться выполнить такое моделирование на ЭВМ, существовавших в 1960 году и с помощью соответствующих им алгоритмов, то только за аренду машины пришлось бы уплатить 10 млн. долларов, а расчет одного варианта длился бы 30 лет [4]. В то время, вероятно, натурные испытания были сопоставимы с расчетами по затратам и были выгоднее по времени. Но сейчас расчеты и вычислительные эксперименты стоят в десятки раз дешевле, и их можно провести в сотни раз быстрее. Кроме того, только с помощью расчетов возможно дальнейшее улучшение качества основных видов промышленной продукции. Для того же самолета необходимы расчеты каждой детали на прочность. Этого вообще нельзя сделать, используя традиционные методы проектирования.

Возросшие требования НИОКР и привели к созданию ЭВМ-гигантов, суперкомпьютеров. Со времени появления первых ЭВМ на каждом этапе развития вычислительной техники существовал свой компьютер рекордной производительности, обладающий максимального объема памятью. Но сам термин появился в 1977 году, когда фирма Cray Research [5], [6] выпустила машину Cray 1. Основатель фирмы Seymour Cray ранее работал на руководящей должности в фирме IBM и пытался убедить руководство IBM в перспективности разработки и производства суперкомпьютера. Когда это ему не удалось, он уволился и основал собственную фирму, которая и создала первый суперкомпьютер в 1977 году. Спустя пять лет таких машин работало в мире не так уж много – 61, из них 42 – в США, 7 – в Англии, 6 – в ФРГ, 4 – во Франции и две в Японии. При практически индивидуальном производстве таких машин – штука в месяц, в них постоянно вносились улучшения.

Следует подробнее сказать, почему в тот момент на освоение суперкомпьютера с такими параметрами не пошла IBM, и понадобилось создавать

отдельную фирму, не имеющую технологических традиций, следовательно – инерции.

Несмотря на высокую компактность электронных компонент, суперкомпьютеры фирмы Cray имели приличные габариты и весили многие тонны. Основную часть габаритов и веса «тянула» система охлаждения, в которой используются сжиженные газы. Поэтому трудно сразу сказать, где же лежала главная составляющая успеха фирмы - в электронике или в криогенике.

В последствии позиции фирмы Cray на мировом рынке существенно были потеснены. Суперкомпьютеры начали выпускать и другие американские фирмы: Control Data начала производить Cyber-205, компания Denelcor – NEP, корпорация Floating Point Systems – FPS/164.

Однако главная угроза всем им вместе взятым исходила из «страны восходящего солнца». В 1983 году известная японская фирма Fujitsu сообщила [7] о начале выпуска ею суперкомпьютеров FACOM VP-100 и FACOM VP-200. Интересная особенность их заключалась в том, что они были совместимы с машинами фирмы IBM. Японцы как бы продемонстрировали всем, в том числе и самой фирме IBM, как следовало осваивать суперкомпьютеры, не теряя при этом преимущественности. Демонстрация сопровождалась совершенно реальной угрозой распространить на эту сферу вычислительной техники широкомасштабную международную торговую войну, ведущуюся на мировом рынке. Руководство американского филиала японской корпорации Amdahl заявило в тот момент, что намерено поставить супер-ЭВМ серии FACOM на рынки США и Западной Европы. Эти машины содержали векторные процессоры с максимальным быстродействием над числами с плавающей запятой: 267 (VP-100) и 533 (VP-200) млн. операций в секунду. Но дело не столько в высоких скоростях. Очень важным было то, что суперкомпьютеры Fujitsu могли выполнять уже имеющиеся программы, написанные, например, на языке фортран без их переработки более эффективно, чем ЭВМ фирмы Cray.

Данные сравнительных испытаний супер-ЭВМ Cray X-MP и FACOM VP-200, выполненных в Японии и США (прогон тестовых гидродинамических программ), показали, что при обработке длинных векторов производительность FACOM VP-200 составляет 115 млн. операций, а Cray X-MP – 70 млн. операций, а при обработке коротких векторов (6-10 элементов) производительность VP-200 была на 10 % ниже.

Упомянутая выше корпорация Amdahl, 49 % акций которой принадлежали – компании Fujitsu участвовала в реализации программы суперкомпьютеров в течение нескольких лет. В мае 1984 года она организовала

отделение с преднамеренно расплывчатым названием: «Подразделение систем специального назначения». Руководитель отделения сообщил, что у фирмы подготовлены планы по продаже суперкомпьютеров приблизительно 75 заказчикам в разных странах. О том, что иметь суперкомпьютер могли позволить себе очень немногие, говорят следующие цифры: минимальный комплект VF – 100 стоил 9,2 млн. долл., а VP-200 – 13,7 млн. долл., лицензия на пользование необходимым программным обеспечением обходилась пользователю в 16 тыс. долл. в месяц. За техническое обслуживание нужно было платить 35,9 тыс. долл. – для VP-100 и 51 тыс. долл. – для VP-200 в месяц.

Свой суперкомпьютер с производительностью 300 млн. операций над вещественными числами стала изготавливать фирма Hitachi. По некоторым сведениям, она создала также экспериментальную модель с быстродействием 1,3 млрд. операций. Свои типы суперкомпьютеров изготавливала японская компания Nippon Electric. Один из них также имел быстродействие 1,3 млрд. операций [8].

Характеристики основных супер-ЭВМ, построенных и планируемых на тот момент времени, приведены ниже в таблице. Максимальная производительность дана в млн. операций над вещественными числами в сек., а объем памяти – в млн. байтов.

Сразу же отметим, что приведенная таблица очень неполная. К примеру, фирма CDC создала семь моделей машины cyber 205 серии 600, а именно 611, 612, 622, 642, 644, 682, 684. В таблице приведены данные лишь для старшей модели. Имелись три модели Cray Y-MP. Как уже отмечалось выше, корпорация Floating Point Systems производила суперкомпьютеры серии FPS. Максимальная производительность FPS-164/MAX достигала 341 млн. операций, но объем ее памяти был невелик – 120 млн. байтов. Фирма Wipoughs производила ILLIAC-IV, имеющий быстродействие 300 млн. операций. Кроме того, в ряде фирм и организаций использовались другие специализированные вычислительные системы высокой производительности.

Характеристики супер-ЭВМ

Фирма	Название ЭВМ и дата поставки	Максимальная производительность	Максимальная емкость ОЗУ
Fujitsu	FACOM VP-100 1983	267	128
	FACOM VP-200 1983	533	256
Hitachi	8-810/20 1983	630	256
	1984/85	1.300	-
Nippon Electronic Company	SX-1 1984	570	256
	SX-2 1984	1.300	256
Японский супер-ЭВМ	1989	10.000	1.000
Cray Research	Cray 1 M 1983	250	32
	Cray X-MP/ 22,24 1983	400-630	32+256
	Cray X-MP/48 1984	1.000	
	Cray 2 1984	1.000-1.200	
	Cray 3 1985/86	10.000	
CDC	Cyber 205/684 1984	800	544
	Cyber 2XX 1986/86	2.000	256
CDC-ETA Systems	GF-10 1986	10.000	-
	GF-40 -	40.000	
Denelcor	HEP-2 1985/86	1.000	2.000
Программа стратегических вычислений, реализуемая управлением DARPA	- 1985/86	1.000	-
	- 1989	1.000.000	

Некоторые литературные источники по данной теме были недоступны ранее и остаются недоступными в настоящее время, а некоторые содержат неточности или даже ошибки разного рода. Последнее связано с тем, что фирмы не выдерживали сроки первых поставок своих изделий, о которых они заявили или поставляли изделия с другими параметрами, нежели предполагалось первоначально. Некоторые модели не представляют интереса.

Все ранние модели суперкомпьютеров характеризовались прямым, «лобовым» решением задачи повышения быстродействия. Можно сказать, что главный лозунг разработчиков суперкомпьютеров в тот момент звучал так: «Максимум быстродействия любой ценой». Как бы само собой подразумевалось, что увеличение быстродействия окупится даже при очень больших затратах. Высокое быстродействие элементов суперкомпьютера достигалось использованием новых материалов и сверхнизких температур. Насколько далеко зашли замыслы разработчиков, можно, например, судить по такому факту: фирма Fujitsu вела исследования поведения арсенида галлия при температурах, предельно близких к абсолютному нулю.

Для создания перспективных суперкомпьютеров разрабатывались:

- корпуса для интегральных схем с матричным расположением выводов с шагом 0,5 мм, имеющих 300–500 выводов;
- технология и методы автоматического монтажа;
- многоконтактные разъемные соединители для интегральных схем на 300–500 выводов и для печатных плат на 1200–1800 контактов;
- высокоэффективные системы охлаждения, использующие жидкие газы;
- волоконно-оптические линии.

Использование новых технологий позволяло также существенно уменьшить габариты машин. К примеру, центральный процессор ЭВМ Cray 1 имел высоту 2 м и диаметр 2,7 м. А размеры Cray 2 были всего лишь 66 см и 96,5 см, соответственно. Центральный процессор Cray 2 был выполнен на бескорпусных ECL – интегральных схемах. Он помещался в специальном контейнере, через который прокачивался фторуглеродный хладагент. Таким образом, охлаждение осуществлялось посредством того, что все детали «омывались» сжиженным газом, а размеры ЦП оказывались настолько малы, что в нем не было ни одного проводника длиннее 41 см.

Естественно, что бесхитрое, «лобовое» решение приводит к возникновению новых трудностей. Использование сверхвысоких частот существенно, можно сказать, радикально повышает требования к качеству компонент и монтажа. Небрежно установленная деталь в аппаратуре такого

класса начинает работать как антенна, излучать и принимать на себя шумы. Все размеры печатных и навесных проводников должны строжайше соответствовать расчетам. В противном случае электрический сигнал не просто дойдет по назначению, а может отразиться и породить волновой процесс. Волны в проводниках в состоянии так запутать функционирование суперкомпьютера, что причину искажений практически невозможно выявить.

Трудности, на которые натолкнулись сторонники прямого повышения быстродействия, не могли не вызвать множества критических замечаний. Критика критикой, но нужно было предложить какое-либо альтернативное решение. Ведь громоздкие криогенные установки с фреоном или жидким азотом появились в составе суперкомпьютеров отнюдь не по глупости, а попросту вследствие того, что не было видно иного реализуемого технического решения.

Каков же наиболее вероятный конкурент прямому повышению скорости вычислений? Им могли быть только создание таких ЭВМ, в которых большие количества – тысяча и более процессоров – работают параллельно, в которых мощная память позволяет быстро записывать и считывать информацию. Но относительно устройства таких ЭВМ и в настоящее время полная неясность и идейный разброд. Пока принципиально важные вопросы: как должна быть организована память, каким должен быть язык программирования? Каковы должны быть, наконец, методы трансляции, если счет будет идти одновременно во многих процессорах? Может быть, и транслировать программы с языка высокого уровня нужно также на многих процессорах параллельно? Неясно даже, каким образом должны быть соединены между собою эти считающие одновременно процессоры.

Рассмотрим лишь некоторые подходы, которые развивались в то время. Какой бы ни была вычислительная система, она представляет совокупность связанных между собой устройств. В каждый момент времени эти устройства либо простаивают, либо выполняют полезную работу, то есть, заняты хранением, пересылкой или переработкой информации. Системы различаются как составом устройств, так и видом связей. Как правило, в любой системе имеется много устройств с постоянными связями, но в общем случае могут быть как редко изменяемые, так и часто изменяемые связи, причем число изменяемых связей в различных системах может колебаться в довольно больших пределах.

В используемых в тот момент суперкомпьютерах широкое распространение получили конвейерные системы. Принцип конвейерной обработки информации основан на разбиении процесса вычисления на несколько последовательных этапов. Количество этапов называется длиной конвейера.

Информация сначала попадает в первый блок. После обработки на первом этапе результаты передаются во второй блок, а в первый можно загрузить следующую порцию информации и т.д. Таким образом, одновременно выполняется количество команд, равное длине конвейера. Как правило, одновременно образуется несколько вычислительных конвейеров, и предусматривается «механизм зацепления», суть которого состоит в том, что часть продукции с одного конвейера может передаваться на другие конвейеры. При этом передаваемая продукция может браться как с конечного этапа работы конвейера, так и с его промежуточных этапов. Различие организованных таким образом компьютеров в том, что на одних конфигурация обрабатывающих конвейеров может описываться в программе, а на других устанавливается автоматически аппаратными средствами.

Кроме того, используются довольно широко, но уже значительно меньше, векторные и матричные мультипроцессоры, для которых векторы или матрицы являются элементарными объектами, в том смысле, что вектор или матрица обрабатывается сразу целиком.

В настоящее время огромный класс задач исследован на предмет «конвейеризации» и «векторизации» и практически реализован на суперкомпьютерах указанного вида. Однако считается, что такого рода подходы не обладают в достаточной мере универсальностью, имеют ряд неудобств для пользователя, а идея параллелизма не используется в них в полной мере. Поэтому идет поиск в других направлениях.

Следующий тип распараллеливания – использование мультипроцессоров на основе клеточной логики. Такой мультипроцессор представляет собой совокупность элементарных процессоров, связанных между собой в некоторую сеть. Каждый процессор способен считывать в пределах некоторой окрестности информацию у присоединенных к нему ближайших «соседей». В зависимости от нее он способен принимать решение и переходить в новое состояние. Такая сеть как бы «живет и развивается». В данный фиксированный момент процессор находится в некотором элементарном состоянии, потом все они сразу переходят в новые состояния, каждый в свое и т.д. Элементарные процессоры могут быть соединены самым различным образом: в линию, в кольцо, в виде дерева, в виде квадратной таблицы, в узлах сети, составленной из треугольников или шестиугольников, в узлах трехмерной сети или в узлах так называемых гиперкубов. Могут использоваться также различные нерегулярные структуры. Хотя теоретически доказано, что такие мультипроцессоры универсальны в том смысле, что на них возможно выполнить любой алгоритм, однако на практике на них затруднительны программирование и трансляция. Поэтому эти устройства полу-

чили распространение в основном для решения задач обработки изображений ввиду структуры применяемых там алгоритмов.

Еще один подход – систолические мультипроцессоры. Более точно следовало бы сказать – систолическое программирование. Представим себе, что некоторый процессор находится в некотором фиксированном состоянии, можно сказать, «хранит информацию». Его сосед, «заглянув к нему», переходит в данное состояние и т.д. Наблюдается движение информации или, как еще говорят, «поток». Программирование на основе клеточной логики сводится к описанию функций перехода процессоров из одного состояния в другое. Систолическое программирование представляет собой описание потоков информации и процессов их изменения в функциональных устройствах. Такое программирование оказывается весьма удобным для записи различных алгоритмов из алгебры и геометрии.

Как уже отмечалось, поток информации может претерпевать изменения в функциональных устройствах. И здесь появляется еще одна возможность. Можно не описывать в программе действия функциональных устройств, а сами потоки данных могут активизировать необходимые устройства и «заставлять» выполнять их нужную работу. Такие машины называются «дэйти флоу компьютерс». Для них создаются специальные языки программирования, ориентированные на значения данных.

В этом направлении были сконцентрированы большие усилия. Однако до сих пор они не привели к каким-то выдающимся результатам.

Остановимся на некоторых проектах.

Машина NQN-VQN разрабатывалась в Колумбийском университете (США) под руководством D.Shaw, являлась параллельной вычислительной системой с потоковым управлением [9]. Она представляла собой «дерево», объединяющее 1 млн. процессоров, каждый из которых – миниатюрная ЭВМ с однобайтовым АЛУ, 64-байтовой памятью и 8 однобайтовыми регистрами. Имеется один центральный (в вершине «дерева») источник команд, которые поступают ко многим процессорам, обрабатывающим потоки данных. Отмечают два недостатка NON-VON – симметричная структура дерева осложняет эффективное наращивание системы, а выбор очень малых размеров ПЭ ограничивает тип решаемых задач. В частности, для большинства нечисловых применений задача не может быть разбита на миллион идентичных маленьких частей.

Другая система с потоковым управлением – булевый мультипроцессор в виде 10-мерного куба, разработанный в Калифорнийском университете (США). В нем использовались ПЭ сравнительно больших размеров (мик-

процессоры 8086). Общее число ПЭ – около одной тысячи. В данной системе отсутствуют проблемы, характерные для машины NON-VON.

Проект Ultracomputer Нью-Йоркского университета был рассчитан на решение крупномасштабных вычислительных задач. По проекту предполагалось использовать тысячи однокристалльных СБИС-процессоров [10].

В Массачусетском технологическом институте профессор Arvind выполнял еще один проект архитектуры для реализации тысячекратного распараллеливания. Машина строилась на микропрограммируемых процессорах, взаимосвязанных программируемой сетью с широкой пропускной способностью. Топология сети – 7 мерный гиперкуб с соединениями, обеспечивающими скорость передачи 4 млн. байт в секунду. Там же была разработана структура памяти, которая обеспечивала синхронизацию [11], [12].

Не затрагивая другие подходы, отметим, что их математический анализ средствами современной математики в значительной мере затруднялся и затрудняется в настоящее время большим разнообразием, многочисленными плохо определенными понятиями и отсутствием формализованных принципов исследования.

Первые суперкомпьютеры фирмы Cray представляли собой машины, организованные по конвейерному принципу. Немного коснемся архитектуры ЭВМ Cray X-MP. Она содержала два идентичных процессора, устройство, осуществляющее связь между ними, как уже отмечалось, центральную скоростную память, дополнительную память, а также блок связи с устройствами ввода-вывода. Ниже на рис. 1 показана структурная схема ЭВМ Cray X-MP.

Процессоры могли работать как независимо, так и над выполнением одной программы в параллельном режиме. Каждый из них включает в себя, 13 функциональных устройств, 152 регистра пяти различных видов, 4 буфера для инструкций. Функциональные устройства условно можно разбить на 4 группы по типу выполняемых операций: адресные, скалярные, устройства с плавающей запятой и векторные. Все устройства работают по конвейерному принципу и независимо друг от друга. Регистры используются функциональными устройствами для хранения входных данных и результатов команд. Регистры разбиваются на пять групп, а именно: адресные, скалярные, векторные и буферные двух видов.

Центральная память представляет собой так называемую многопортовую память. Она имеет 4 порта: 2 для чтения, 1 для записи и 1 связанный с устройствами ввода-вывода. Все они могут функционировать параллельно. Это особенно важно для применения «механизма зацепления» конвейеров при векторных вычислениях, когда результирующий вектор ис-

пользуется как входной в последующих операциях, при этом, возможно, в другом конвейере.

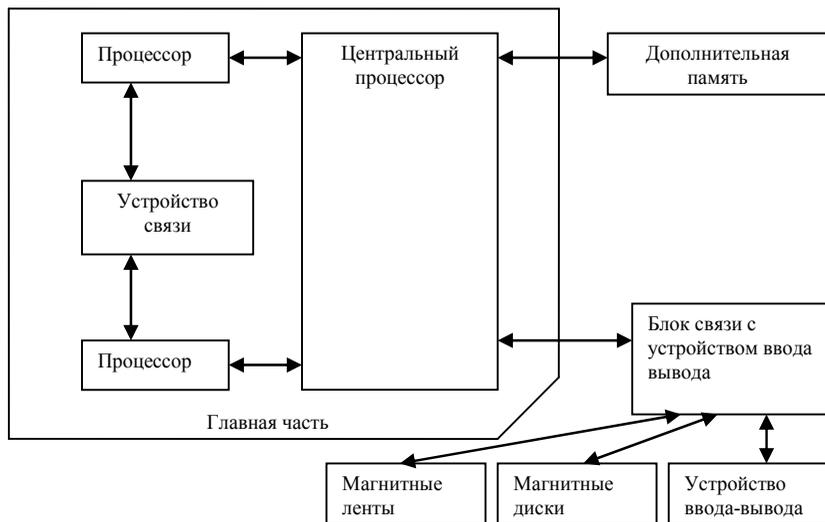


Рис. 1. Структурная схема ЭВМ Cray X-MP

Центральная память связана каналами для передачи информации с устройствами ввода-вывода, устройствами контроля и дополнительной памятью. Последний канал скоростной, скорость обмена информацией по нему – 1250 млн. байтов в секунду.

Дополнительная память имела емкость 64,128 или 256 млн. байтов (три различных варианта), состояла соответственно из 16, 32 или 64 банков. Каждый банк содержал 72 модуля. При этом последовательно расположенные коды программы или данных помещаются в разных модулях памяти. Повышение скорости обмена с памятью достигается за счет конвейеризации последовательных обращений к памяти, а также за счет параллельного вычисления адресов. Время доступа к этой памяти – 38 наносекунд. Ее вес – 1,5 тонны, и она занимала 10 м² площади пола.

Блок связи с устройствами ввода-вывода осуществлял связь с магнитными лентами, магнитными дисками, телетайпами, графическими и буквенно-цифровыми дисплеями и т.д. Он имел 2, 3 или 4 высокоскоростных

процессора, до 64 млн. байтов буферной памяти. Общий объем памяти подключаемых дисков – 48600 млн. байтов.

За всю историю развития отечественной суперкомпьютерной отрасли только четыре вычислительные установки – МВС-1000М, МВС-5000БМ, СКИФ К-500, СКИФ К-1000, – смогли попасть в мировой рейтинг Top500, четыре раза отечественные установки входили в первую сотню мирового рейтинга (МВС-1000М – 3 раза, СКИФ К-1000 – 1 раз). Эти суперкомпьютеры разрабатывались и изготавливались:

- МВС-1000М, МВС-5000БМ – силами ФГУП НИИ «Квант», ИПМ им. М. В. Келдыша РАН и Межведомственного суперкомпьютерного центра (МСЦ);
- СКИФ К-500, СКИФ К-1000 – в рамках суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства силами ОИПИ НАН Беларуси (Минск), НИИ ЭВМ (Минск), компании «Т-Платформы» (Москва) и ИПС РАН (Переславль-Залесский).

Суперкомпьютер	МВС-1000М	СКИФ К-500	МВС-5000БМ	СКИФ К-1000
Разработчики и изготовители	ФГУП «Квант», ИПМ РАН, МСЦ	суперкомпьютерная программа «СКИФ» Союзного государства. ОИПИ НАН Беларуси (Минск), НИИ ЭВМ (Минск), Т-Платформы (Москва), ИПС РАН (Переславль-Залесский)	ФГУП «Квант», ИПМ РАН, МСЦ	суперкомпьютерная программа «СКИФ» Союзного государства. ОИПИ НАН Беларуси (Минск), НИИ ЭВМ (Минск), Т-Платформы (Москва), ИПС РАН (Переславль-Залесский)
Завершение изготовления	июнь 2002 года	сентябрь 2003	июнь 2004 г., модернизация: сентябрь 2004 г.	сентябрь 2004

Место установки	Межведомственный суперкомпьютерный центр (МСЦ, Москва, Президиум РАН)	Объединенный институт проблем информатики (ОИПИ НАН Беларуси, Минск)	Межведомственный суперкомпьютерный центр (МСЦ, Москва, Президиум РАН)	Объединенный институт проблем информатики (ОИПИ НАН Беларуси, Минск)
Пиковая / Linpack-производительность (млрд. операций в секунду)	1 024 / 564 с сентября 2002 1 024 / 734.6	716.8 / 423.6	1 075.2 / 722.1 с сентября 2004: 2 112 / 1 401	2 534.4 / 2 032
Тип процессора / Тип системной сети	Alpha EV67 667 MHz / Myrinet	Pentium IV Xeon 2.8 GHz / SCI 3D	IBM eServer BladeCenter JS20 PowerPC970 1.6 GHz / Myrinet	AMD Opteron 2.2 GHz / Infinivand
Число узлов / число процессоров	384 / 768	64 / 128	84 / 168 с сентября 2004: 168 / 336	288 / 576
Место / выпуск рейтинга Top500	64 / июнь 2002 г 74 / ноябрь 2002 г 95 / июнь 2003 г 189 / ноябрь 2003 г 392 / июнь 2004 г	407 / ноябрь 2003 г.	399 / июнь 2003 г 210 / ноябрь 2004 г	98 / ноябрь 2004 г

Полное название программы: «Разработка и освоение в серийном производстве семейства моделей высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой (суперкомпьютеров) и создание прикладных программно-аппаратных комплексов на их основе».

С одной стороны, вхождение в список TOP500 отечественных вычислительных установок говорит о том, что мы владеем технологиями, которые

доступны только весьма ограниченному списку стран:

- суперкомпьютеры из списка TOP500 установлены всего лишь в пяти десятках стран мира;
- суперкомпьютеры из списка TOP500 способны изготавливать только страны, входящие в весьма узкий (из полутора десятка стран) «элитный клуб разработчиков суперкомпьютеров»;
- суперкомпьютеры из «первой сотни» способны изготавливать только в США, Японии, Китае и России.
- ряд мощных суперкомпьютеров был изготовлен также во Франции и в Индии, но информация о них не попала в официальный список «первой сотни».

Таким образом, гонки в мире ЭВМ-гигантов продолжаются.

2. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ В США

В США развитие и применение суперкомпьютеров (*High performance computing – HPC*) за последние десять лет получило достаточно высокую отдачу в виде конкретных научно-технических проектов как в гражданской, так и военной областях. При этом основная тенденция развития данного направления заключается в широком обмене опытом, программным обеспечением, алгоритмами и специалистами между всеми участниками проектов и их заказчиками независимо от ведомственной принадлежности.

На рис. 2 представлена динамика распределения суперкомпьютеров в США по объектам их использования. Анализ диаграммы показывает, что 2000 год для высокопроизводительных вычислений в США стал решающим с точки зрения промышленного использования технологии суперкомпьютеров, а 2001 год – переломным, когда общее количество установленных компьютеров в промышленности превысило их количество в академических и научно-исследовательских организациях. Это наглядно демонстрирует переход технологий высокопроизводительных вычислений из чисто научных проектов непосредственно в производство. Наряду с этим прослеживается тенденция увеличения количества установленных суперЭВМ на секретных объектах и объектах производителя, что свидетельствует о стратегической важности данного направления развития информационных технологий для национальной безопасности США.

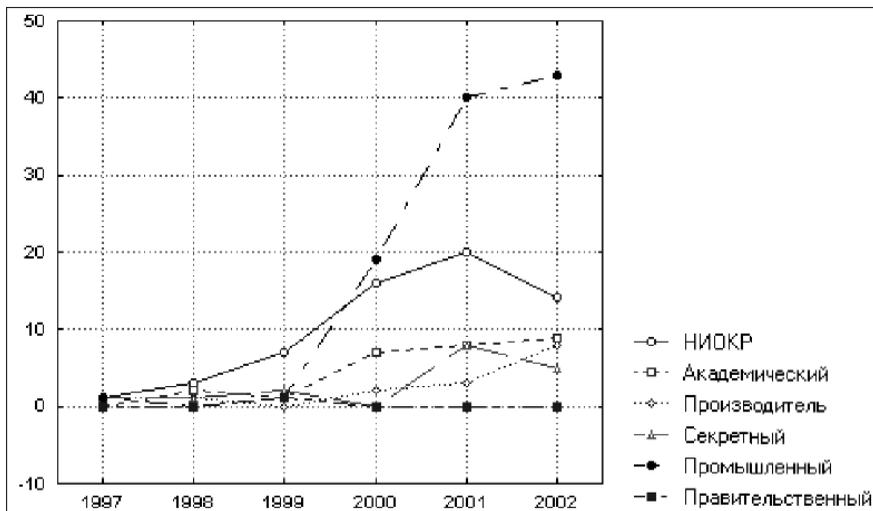


Рис. 2. Динамика распределения суперкомпьютеров, установленных в США, по объектам

Одной из первых крупномасштабных попыток совершить прорыв в использовании суперкомпьютеров в военно-технических и военно-стратегических интересах является так называемая программа «звездных войн», инициированная администрацией Рональда Рейгана в марте 1983 г.

В рамках проекта Стратегической оборонной инициативы – СОИ (Strategic Defense Initiative – SDI) предполагалось создать и развернуть эшелонированную систему противоракетной обороны (на земле, в воздухе и в космосе). Среди научно-технических и инженерно-конструкторских задач, связанных с осуществлением этого проекта, особо выделялась задача селекции ложных целей на заатмосферном участке полета ядерных боеголовок баллистических ракет, для решения которой требовался колоссальный объем вычислений по тем временам – миллиарды операций в секунду с числами, представленными в формате с плавающей точкой.

Несмотря на то, что к началу 80-х годов уже существовали испытанные варианты систем ПРО наземного базирования, их эффективность ограничивалась гарантированным поражением ракет противника преимущественно на атмосферном участке, когда боеголовки при входе в плотные слои атмосферы подвергаются сильному нагреву и могут быть идентифицированы на фоне ложных целей по скорости. В условиях полета на заатмосферном уча-

стке в безвоздушном пространстве отличить боевые цели от ложных при равных скоростях (до 7 км/с.) и физических размерах практически невозможно без использования космических датчиков радиолокационного слежения. Кроме того, для управления орбитальной группировкой космических платформ, на которых предполагалось разместить средства обнаружения и поражения боеголовок и ракет (кинетических, лазерных и др.) требовалось, чтобы большая часть вычислений проводилась непосредственно на месте, т.е. в космосе в условиях ограниченного ресурса времени для принятия решения, что накладывало значительные ограничения не только на быстроедействие и память, но и вес, объем, потребляемую энергию и надежность компьютеров и их программного обеспечения.

Принимая во внимания достигнутый к тому времени уровень развития элементной базы и архитектуры компьютеров, решить подобную задачу можно было только за счет использования комплекса технологий: сверхбыстродействующих и сверхбольших интегральных микросхем, параллельной и векторной обработки данных, методов искусственного интеллекта и высоконадежного программного обеспечения.

Например, суперкомпьютер «Cray-1» американской компании Cray Research Inc. в 1976 году выполнял 240·млн. арифметических операций с плавающей точкой в секунду (240 Мфлоп) и стоил от \$4 до \$11 млн. в зависимости от комплектации. Стоимость таких вычислительных систем становилась просто астрономической, если к цене оборудования добавлялись расходы на изготовление программного обеспечения.

С этой целью в рамках программы СОИ были открыты специальные технологические подпрограммы, получившие название «стратегические сверхпроизводительные вычисления» (Strategic Supercomputing), «сверхбольшие интегральные микросхемы» (Very Large Integrated Circuit – VLIC), «сверхскоростные интегральные микросхемы» (Very High Speed Integrated Circuit – VHSIC), «стратегическое адаптируемое и надежное программное обеспечение» (Strategic Adaptable And Reliable Software – STARS).

Результаты не замедлили себя ждать. Созданный в 1988 году суперкомпьютер «Cray-Y-MP» объединял уже до 16 процессоров, обладал пиковой производительностью 2670 Мфлоп и стоил от \$2,5 до \$16 млн. Тем не менее, для реализации проекта СОИ этого было явно мало: по оценкам американских специалистов бортовые вычислительные системы космического базирования должны были обладать пиковой производительностью не менее 50 Гфлоп.

И здесь не лишним будет упомянуть тот факт, что к началу открытия работ в рамках программы СОИ в Советском Союзе тоже были достигнуты

ощутимые результаты в разработке компьютеров. Убедиться в этом американцы смогли еще во время совместных космических полетов по программе «Союз-Аполлон», когда в подмосковном ЦУПе обработка телеметрической информации на БЭСМ-6 проводилась быстрее почти на полчаса, чем в Хьюстоне.

Многопроцессорный вычислительный комплекс «Эльбрус-1», выпущенный в 1979 году, включал 10 процессоров и базировался на схемах средней интеграции. В этой машине советские ученые опередили американцев, создав симметричную многопроцессорную систему с общей памятью. По принципам построения система команд «Эльбрусов» близка системе команд машин компании Burroughs, считающейся нетрадиционной. Машина «Эльбрус-1» обеспечивала быстродействие от 1,5 Мфлоп до 10 Мфлоп, а «Эльбрус-2» – более 100 Мфлоп. «Эльбрус-2», работа над которым была завершена в 1985 году, также представлял собой симметричный многопроцессорный вычислительный комплекс из 10 суперскалярных процессоров на матричных БИС, которые выпускались в Зеленограде. «Эльбрусы» вообще несли в себе ряд революционных новшеств. Суперскалярность процессорной обработки, симметричная многопроцессорная архитектура с общей памятью, реализация защищенного программирования с аппаратными типами данных – все эти возможности появились в отечественных машинах раньше, чем на Западе.

Особо следует выделить создание единой операционной системы для многопроцессорных комплексов (которым руководил Борис Арташесович Бабаян, в свое время отвечавший за разработку системного программного обеспечения БЭСМ-6). Одной из важнейших задач этой ОС было управление параллельно выполняющимися процессами и их синхронизация – одна из самых сложнейших задач в области высокопроизводительных вычислений.

К сожалению, ориентация отечественной компьютерной индустрии в основном на военные проекты привела эту отрасль к началу 90-х годов в финансовый тупик, когда экономика страны была уже не в силах содержать дорогостоящие проекты военно-промышленного комплекса. Аналогично, в США был закрыт один из самых амбициозных и дорогостоящих научно-технических проектов, сопоставимый по своей значимости только с программой полетов человека на Луну. Тем не менее «звездные войны», при всей своей фантастичности на грани авантюры, стали подлинным катализатором целого ряда важнейших направлений развития современных технологий, включая суперкомпьютеры.

Опыт боевых действий в Персидском заливе, Югославии, Албании, террористические акты 11 сентября 2001 г. В Нью-Йорке и Вашингтоне, наконец, операция по уничтожению баз боевиков Аль-Каиды в Афганистане активно стимулировали новые направления в использовании Пентагоном высокопроизводительных вычислений. За двадцать лет, которые прошли после памятной речи Рональда Рейгана о «звездных войнах», Пентагон вышел на качественно новый уровень в своих НИОКР, связанных с использованием суперкомпьютеров, создав собственную сеть высокопроизводительных ЭВМ, которая сегодня обслуживает свыше 4 тыс. ученых и инженеров в 100 ведущих американских университетах, исследовательских центрах и лабораториях, занятых в 600 крупных военных проектах.

Сегодня можно с большой долей уверенности говорить о том, что это направление развития информационных технологий, которое в значительной степени повлияло на судьбу СОИ, заставив отказаться от идеи размещения лазерного оружия в космосе, достигло или во всяком случае очень близко к тем рубежам, о которых в начале 80-х годов могли только мечтать.

Развитие технического прогресса по спирали находит свое отражение в новой программе Пентагона создания общенациональной высокоскоростной научно-исследовательской и инженерно-конструкторской сети суперкомпьютеров DREN (Defense Research Engineering Network), которая должна сделать США неоспоримым лидером в практическом применении целого комплекса стратегических технологий, основанных на высокопроизводительных параллельных вычислениях с высокоточной визуализацией объектов и математическим моделированием физических процессов.

На сегодняшний день высокоскоростная сеть суперкомпьютеров DREN объединяет 4 главных вычислительных центра коллективного пользования и 17 региональных распределенных вычислительных центров, размещенных по всей территории США. На ее развитие и модернизацию в период с 1997 по 2007 г. выделено в общей сложности \$1,73 млрд. В составе этой самой мощной в мире сети суперкомпьютеров насчитывается 64 объекта электронно-вычислительной техники (ЭВТ) общей производительностью 12 Тфлоп.

При этом 96% всей вычислительной мощности сети DREN сосредоточено в 4 главных вычислительных центрах коллективного пользования: Центре исследования аэрокосмических систем на военно-воздушной базе Райт-Паттерсон (шт. Огайо) – ASC, Исследовательской лаборатории сухопутных войск на полигоне армии США в Абердине (шт. Мэриленд) – ARL-APG, Центре исследований и разработок сухопутных войск в Висксбурге

(шт. Миссисипи) – ERDC, Океанографическом управлении ВМС США в Космическом центре им. Джона Стениса (шт. Миссисипи) – NAVO.

Распределенные центры сети DREN, выполняющие роль региональных вычислительных центров, на долю которых приходится до 75% всех проектов Пентагона в области высокопроизводительных вычислений, включают в себя: Центр авиационных систем вооружения ВВС США на авиабазе в Эглин (шт. Флорида) – AAC, Испытательный центр ВВС США на авиабазе Эдвардс (шт. Калифорния) – AFFTC, Исследовательская лаборатория ВВС США в Риме (шт. Нью-Йорк) – AFRL/IF, Исследовательская лаборатория ВВС США на авиабазе Райт-Паттерсон (шт. Огайо) – AFRL/SN, Вычислительный центр арктического региона в Фэйрбэнкс (шт. Аляска) – ARSC, Исследовательский центр высокопроизводительных вычислений сухопутных войск США в Минеаполисе (шт. Миннесота) – ANPCRC, Центр инженерных разработок на авиабазе Арнольд (шт. Теннесси) – AEDC, Национальный объединенный центр интеграции на авиабазе Шривер (шт. Колорадо) – JNIC, Центр высокопроизводительных вычислений в Мауи (шт. Гавайи) – MHPCC, Центр воздушной войны ВМС США в Патаксен-Ривер (шт. Мэриленд) – NAWCAD, Центр воздушной войны ВМС США в Чайна-Лейк (шт. Калифорния) – NAWCWD, Исследовательская лаборатория ВМС США в Вашингтоне (федеральный округ Колумбия) – NRL, Технический испытательный центр арсенала в Редстоун (шт. Алабама) – RTTC, Штаб командования космических сил и противоракетной обороны в Хантсвилле (шт. Алабама) – SMDC, Космический центр ВМС США в Сан-Диего (шт. Калифорния) – SSCSD, Центр исследований и разработок бронетанковой техники в Уоррен (шт. Мичиган) – TARDEC, Ракетный полигон в Уайт-Сэндс (шт. Нью-Мексика) – WSMR.

География размещения вычислительных центров сети DREN говорит сама за себя – охват значительной территории континентальной и островной части США (13 штатов и один федеральный округ) обеспечивает глобальный доступ к ее ресурсам в любое время суток с максимальной нагрузкой вычислительных мощностей четырех главных центров коллективного пользования. Удаленный доступ к ресурсам сети DREN осуществлялся по высокоскоростным каналам передачи данных со скоростью до 1,5 Гбит в с. (к 2004 г. до 10 Гбит в с.). Пользователями сети могут быть как военные, так и гражданские научно-исследовательские организации, и университеты штатов (Алабама, Вирджиния, Гавайи, Джорджия, Иллинойс, Калифорния, Миссисипи, Мичиган, Мэриленд, Огайо, Пенсильвания, Северная Каролина, Теннесси, Техас, Флорида), участвующие в совместных проектах в области высокопроизводительных вычислений.

С этой целью Пентагон выдвинул достаточно смелую, с точки зрения военной бюрократии, и революционную в технологическом отношении инициативу, получившую название «Единой поддержки программного обеспечения высокопроизводительных вычислений» (Common High Performance Computing Software Support Initiative).

Суть этой инициативы заключается в доступе пользователей не только к вычислительным ресурсам центров (процессорам, каналам, оперативной и внешней памяти), но и алгоритмам, их программной реализации. Характерно, что 97% прикладного программного обеспечения для суперкомпьютеров на сегодняшний день написано на современных версиях классического Фортрана (77,90, HPF), хорошо известная и непревзойденная математическая мощность которого при решении задач численными методами (линейные и дифференциальные уравнения, преобразование Фурье и др.) в сочетании с практически неограниченными возможностями в области системного программирования языка Си++ позволяют быстро разрабатывать полноценные приложения с удобным для пользователя графическим интерфейсом.

Особое место в этой инициативе занимают вопросы информационной безопасности, связанные с распределенным доступом к вычислительным ресурсам и программам сети DREN. Предусмотрены как несекретные, так и секретные анклавов ресурсов и пользователей сети. Создана единая распределенная по всем объектам сети система датчиков обнаружения несанкционированного вторжения NIDS, монтирование и испытание которой проводилось под непосредственным наблюдением и контролем со стороны специалистов АНБ. При этом особое внимание уделено высокоскоростному трафику в режиме ATM, надзор за которым осуществляется круглосуточно специальной группой немедленного реагирования. Кроме того, в плановом порядке Управление информационных систем Пентагона осуществляет так называемый аудит информационных ресурсов сети DREN и консультации персонала по предотвращению, как перегрузки ресурсов, так и несанкционированного вторжения. Но не только военные, ученые и инженеры используют в США суперкомпьютеры в своих профессиональных интересах. Бизнес уверенно прогрессирует в этом наукоемком секторе применения высоких технологий, отвоевывая шаг за шагом ведущие позиции у пионеров высокопроизводительных вычислений: свыше 52% всех суперкомпьютеров, входящих в список 500 самых быстродействующих ЭВМ на земном шаре, сегодня заняты в маркетинге, торговле, финансах, телекоммуникациях и других секторах частного предпринимательства.

Лидер складской индустрии на мировом рынке услуг в сфере снабжения, американская компания Staples Inc., доходы которой превышают \$9 млрд. в год, закупила мощный суперкомпьютер IBM серии SP для повышения эффективности и снижения себестоимости своих торгово-закупочных операций. Основу суперкомпьютера составляет 64-х процессорная вычислительная система, с помощью которой распределенная база данных (DB2), организованная на основе механизма репликации, ежедневно обновляется на общем жестком магнитном носителе объемом 4 Тбайт. Тем самым, пользователи (50 тысяч сотрудников) получают оперативный доступ к глобальному информационному ресурсу для получения сведений о ценах, объемах и номенклатуре поставок, сроках отгрузки по всем филиалам компании (свыше 1200) во всем мире (США, Канаде, Великобритании, Германии, Нидерландах, Португалии и др. странах), на основе которых они могут делать краткосрочные и долгосрочные прогнозы деловой активности клиентов, планировать транспортные операции, отслеживать прохождение грузов.

3. СТАТИСТИКА И АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ В США

Для того, чтобы лучше понять суть происходящего в такой бурно развивающейся области информационных технологий, как высокопроизводительные вычисления, специалисты пользуются богатым арсеналом современных методов математической статистики или, как их принято называть сейчас, технологией многомерного анализа данных. Статистика позволяет компактно описать данные, понять их структуру, провести классификацию, увидеть закономерности в хаосе случайных явлений. Даже простейшие методы визуального анализа данных позволяют существенно прояснить сложную ситуацию, первоначально поражающую нас огромным количеством цифр.

При проведении исследований ограничимся выборочными объектами электронно-вычислительной техники (ЭВТ) – вычислительными центрами коллективного пользования (ВЦКП) уже известной нам сети суперкомпьютеров DREN, данные о которой приведены в серии ежегодно публикуемых отчетов Управления перспективных исследований Пентагона DARPA. Следует иметь в виду, что с позиций теории математической статистики такого рода исследования всегда носят выборочный характер, поскольку генеральная совокупность объектов или, как ее еще называют, популяция достаточно велика: список 500 самых мощных суперкомпьютеров мира явля-

ется далеко не полным в силу того, что многие объекты ЭВТ этого класса засекречены.

Кроме того, очерченный нами круг объектов ЭВТ является во всех отношениях репрезентативным, поскольку и по своему объему, и по своим характеристикам отражает те тенденции, которые происходят в области высокопроизводительных вычислений, как в военных, так и в гражданских проектах США. Например, суммарная пиковая производительность 22 суперкомпьютеров, установленных в 4 вычислительных центрах коллективного пользования сети DREN, составляла на начало 2002 г. почти 12 Тфлоп или 22% от общей производительности всех суперкомпьютеров США. Номенклатура фирм производителей, собиравших суперкомпьютеры для этих вычислительных центров, также говорит сама за себя – IBM, Cray, SGI, Compaq, Sun. Вместе с тем, полученные в ходе исследований данные с достаточной степенью надежности можно будет распространить и на другие объекты ЭВТ данного класса.

Итак, ограничив область и круг объектов исследования, перейдем непосредственно к тем вопросам, которые больше всего сейчас волнуют экономистов и бизнесменов, ученых и инженеров, политиков и военных, словом тех людей, кто так или иначе заинтересован в суперкомпьютерах и их применении в конкретных проектах. А вопросы более чем очевидны: какой суммарной пиковой производительностью, оперативной и внешней памятью будут обладать суперкомпьютеры той или иной страны через несколько лет и за счет чего?

Следует заметить, что поставленные вопросы далеко не так банальны с точки зрения ответов на них, поскольку прогноз, который нам предстоит дать, носит, во-первых, стратегический, а, во-вторых, вероятностный характер.

Вначале рассмотрим, в каких пределах изменяются основные интересующие нас характеристики (оперативная память, количество процессоров, пиковая производительность) суперкомпьютеров с течением времени. На диаграммах размаха или так называемых графиках «ящички-усы» представлены диапазоны вариации выбранных нами переменных, которые построены отдельно по годам. В качестве основных показателей вариации выбраны следующие описательные статистики: минимальное и максимальное значения переменной, нижняя (25%) и верхняя (75%) квартили, медиана распределения. Медиана и квартили делят диапазон значений переменной на четыре равные части, показывая тем самым, где находятся 25%, 50% и 75% значений переменной.

Анализ диаграммы (Рис 3.) показывает, что к началу 2002 г. произошло резкое увеличение не только максимального значения пиковой производительности (почти в 2 раза), но и верхней квартили диапазона, в который попадают 75% всех значений производительности (в 7 раз) и соответственно медианы (в 5 раз). Заметим, что на протяжении предшествующих трех лет с 1998 по 2000 гг. значения этих показателей вариации оставались практически на одном уровне, хотя максимальное значение диапазона непрерывно увеличивалось.

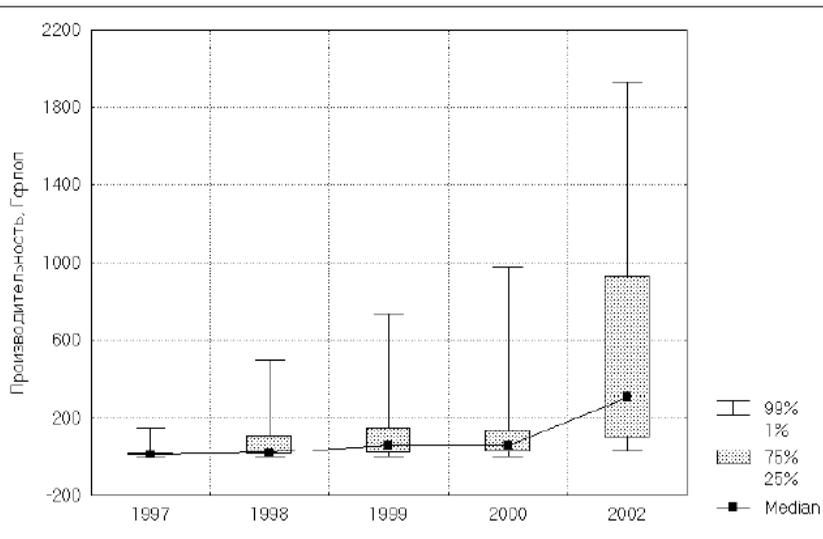


Рис. 3. Диаграмма размаха значений пиковой производительности суперкомпьютеров вычислительных центров коллективного пользования сети DREN по годам

Суммируя вышеизложенное, можно утверждать, что произошедшие к началу 2002 г. изменения в пиковой производительности отражают не только количественные, но и качественные перемены в сфере высокопроизводительных вычислений, которые были подготовлены в предшествующие три года. Ниже более подробно рассматривается этот аспект, посредством использования других методов анализа.

Существенные изменения в увеличении производительности суперкомпьютеров ВЦКП сети DREN осуществлялись в основном за счет наращивания объема оперативной памяти и количества процессоров. Однако при этом следует иметь в виду, что имеются свои нюансы, связанные с архитектурой компьютеров.

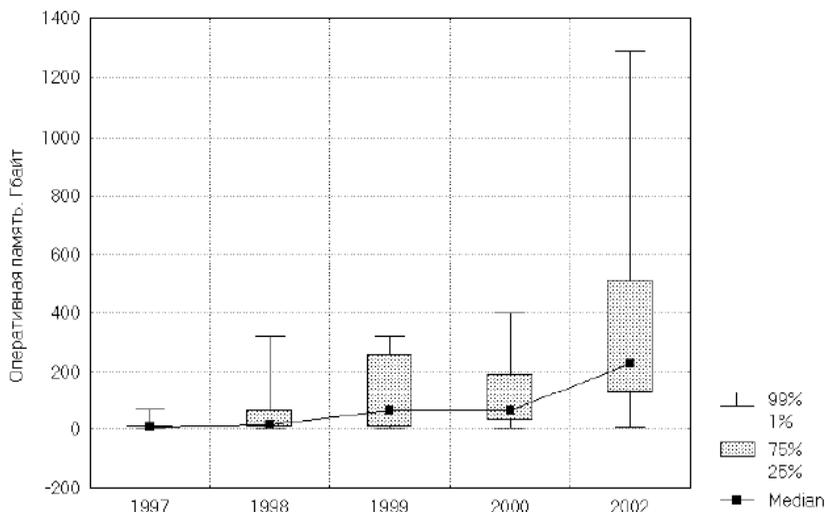


Рис. 4. Диаграмма размаха значений емкости оперативной памяти суперкомпьютеров вычислительных центров коллективного пользования сети DREN по годам

Так, например, диаграмма (рис. 4) размаха значений емкости оперативной памяти наглядно демонстрирует путь выбора архитектуры, для которого характерны колебания (взлеты и падения) всех выбранных нами статистик, в то время как на диаграмме размаха значений количества процессоров отчетливо (рис. 5) просматривается плановое начало – неуклонный рост.

Таким образом, на примере диаграмм размаха мы наглядно увидели, что достигнутый резкий скачок в производительности суперкомпьютеров ВЦКП сети DREN на рубеже конца 2001 и начала 2002 г. стал результатом многолетних совместных усилий ученых, конструкторов и инженеров, плоды работы которых привели к наращиванию потенциальных возможностей в области высокопроизводительных вычислений (рис. 6).

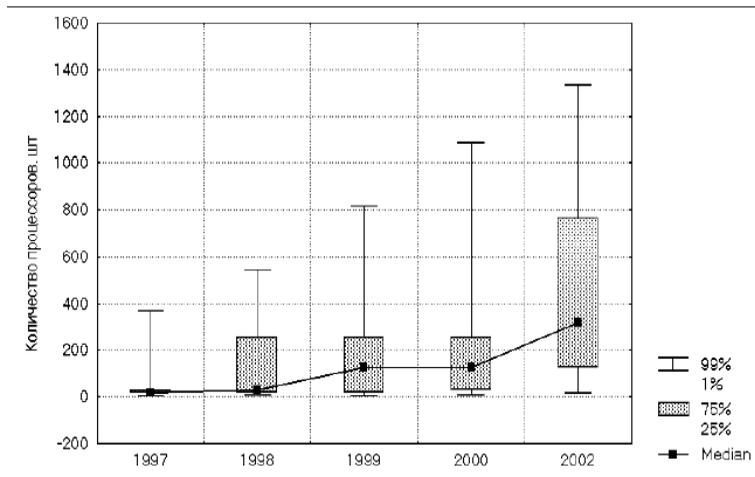


Рис. 5. Диаграмма размаха значений количества процессоров суперкомпьютеров вычислительных центров коллективного пользования DREN по годам

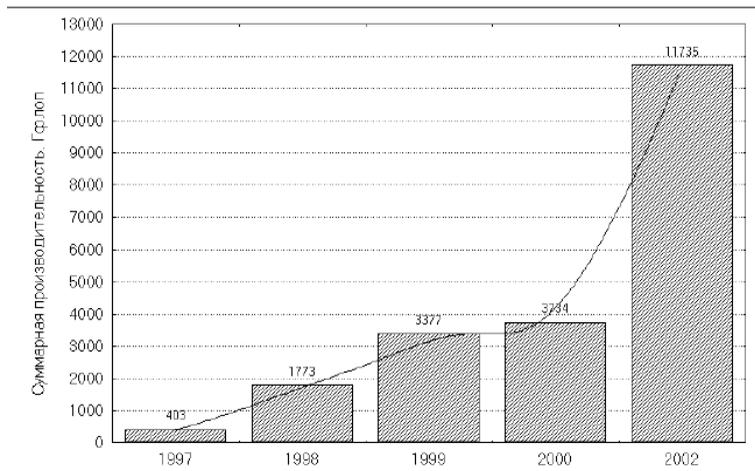


Рис. 6. Динамика увеличения суммарной производительности суперкомпьютеров вычислительных центров коллективного пользования сети DREN по годам

Далее рассмотрим, как меняется зависимость пиковой производительности от объема оперативной памяти и количества процессоров в вычислительных системах по годам. С этой целью были построены соответствующие регрессионные модели, оценим их адекватность и достоверность. Таким образом, для проведения регрессионного анализа в качестве *зависимой* переменной выберем значение пиковой производительности, а в качестве *независимых (предикторов)* – значения объема оперативной памяти и количества процессоров.

Полученные с помощью автоматизированной системы анализа данных STATISTICA линейные регрессионные модели представлены на рис. 7 и 8.

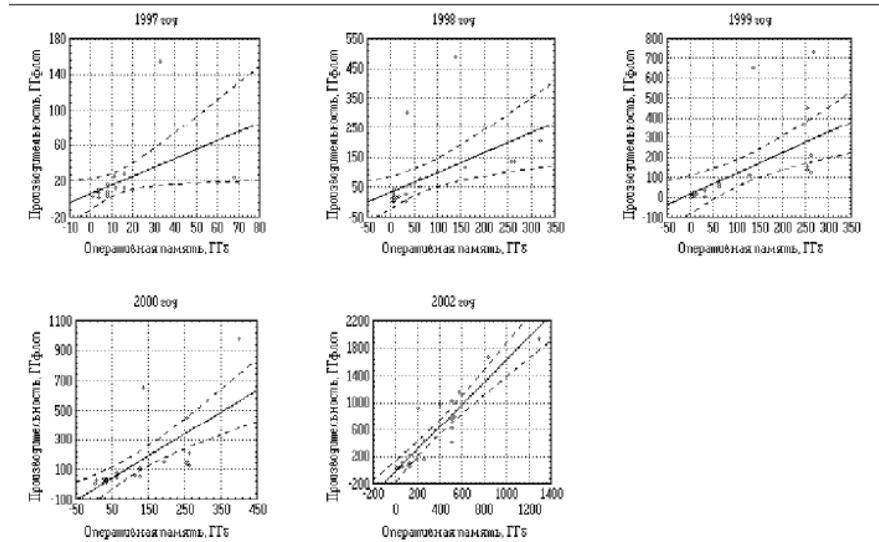


Рис. 7. Диаграммы рассеивания пиковых значений значений производительности в зависимости от объема оперативной памяти по годам

На диаграмме (рис. 7) представлены пиковые значения производительности в зависимости от объема оперативной памяти по годам, а также регрессионные прямые и их 95% доверительные интервалы. Анализ диаграмм показывает снижение разброса значений и увеличение коэффициента наклона регрессионной прямой, что дает основания говорить не о простом наращивании объема оперативной памяти, а о качественном улучшении архитектуры компьютеров. Иными словами, отдача от капиталовложений в

дорогостоящую оперативную память становится эффективной с точки зрения увеличения производительности. Аналогичная картина наблюдается и на регрессионных прямых, построенных для определения зависимости производительности от количества процессоров (рис.8), хотя они имеют и свои особенности.

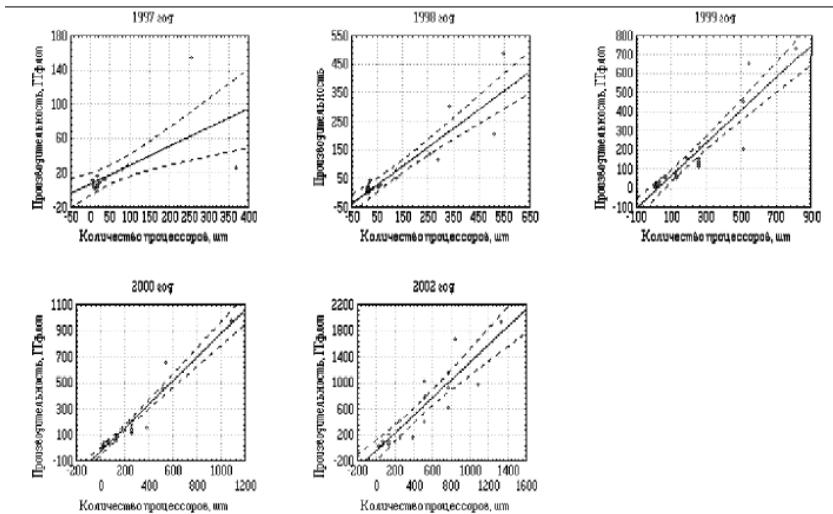


Рис. 8. Диаграммы рассеивания пиковых значений производительности в зависимости от количества процессоров по годам

Диаграммы рассеивания и регрессионные прямые, построенные для значений производительности в зависимости от количества процессоров в целом дают основания говорить о тех же тенденциях – уменьшении разброса и увеличении коэффициента наклона регрессионной прямой. Однако при этом видно что, начиная с 1999 г. наклон регрессионной прямой практически не меняется или изменяется незначительно. Это свидетельствует о том, что простое наращивание количества процессоров без увеличения оперативной памяти является эффективным только в ограниченных пределах.

Для того, чтобы убедиться в этом обратимся к анализу коэффициентов корреляции производительности с объемом оперативной памяти и количеством процессоров. В статистике корреляция определяет степень, с которой значения двух переменных пропорциональны друг другу. Диаграмма изме-

нения значений указанных коэффициентов корреляции по годам представлена на рис. 9.

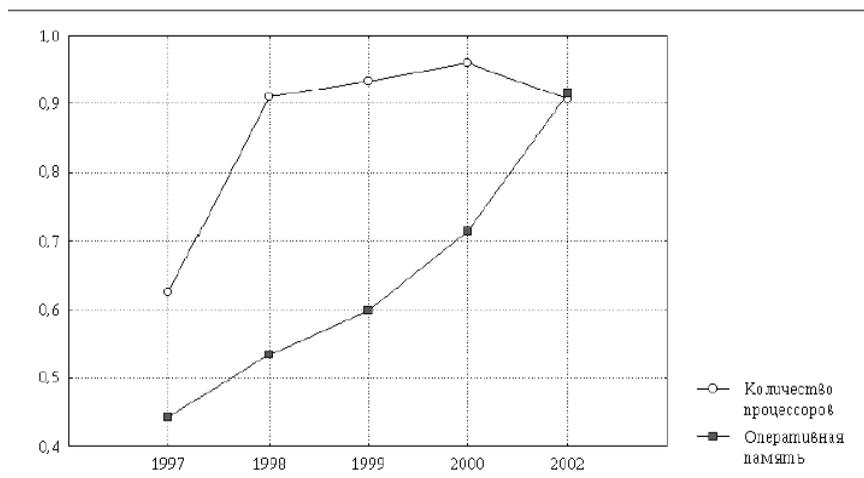


Рис. 9. Динамики изменения коэффициентов линейной парной корреляции пиковой производительности с объемом оперативной памяти и количеством процессоров

Анализ диаграммы показывает, что увеличение степени связи между производительностью и объемом оперативной памятью в указанный период было более ярко выраженной тенденцией по сравнению с ростом количества процессоров. В тоже время из диаграммы видно, что к началу 2002 гг. связь между производительностью и этими основными характеристиками архитектуры стала практически равноценной, что подтверждает достигнутый качественный рост эффективности суперкомпьютеров.

На основе нелинейной аппроксимации промежуточных значений пиковой производительности ВЦКП сети DREN и их последующей экстраполяции можно построить прогнозный тренд, достоверность которого составляет на ближайшие 5 лет 97%.

Анализ полученного прогнозного тренда изменения суммарной пиковой производительности ВЦКП сети DREN показывает, что можно ожидать повышение общей вычислительной мощности ресурсов суперкомпьютеров, входящих в их состав, с 12 до 43 Тфлоп или почти в 4 раза, что вполне согласуется с известным законом Мура. Интересно и то, что полученная прогнозная оценка не противоречит принятым еще администрацией Клинтона

в 1996 г. нормативным цифрам плана программы развития высокопроизводительных вычислений в интересах безопасного хранения ядерных вооружений, согласно которым к 2004 году предполагалось достичь производительности супер-ЭВМ в 100 Тфлоп.

4. ПРОЕКТ TOP 500

Проект TOP500 был начат в 1993 году, чтобы обеспечить надежный базис для отслеживания и обнаружения тенденций в области высокопроизводительных систем. Два раза в год собирается и выпускается список 500 самых мощных компьютерных систем в мире. Список содержит большое количество информации, включая спецификации систем и главные области их приложений. Информация во всех 30 списках TOP500, выпущенных до настоящего времени, доступна на сайте, www.top500.org.

С 1986 до 1992 в Университете Мангейма участникам суперкомпьютерных семинаров были представлены суперкомпьютерные статистические данные, был замечен интерес к данной области, который рос из года в год. Были представлены векторные компьютерные системы, установленные в США, Японии и Европе. Подсчет количества векторных компьютеров, установленных в мире; прежде всего зависел от данных, предоставленных изготовителями систем, и делал статистику ненадежной. Системы, существовавшие в США и Европе были достаточно хорошо известны, информацию относительно систем в Японии собрать было намного сложнее. Создатели проекта установили связь с тремя японскими изготовителями векторных компьютеров – Fujitsu, NEC и Hitachi – и использовали их данные для ежегодных оценок.

В 1992 была выпущена последняя статистика Мангейма, в которой были представлены 530 суперкомпьютеров со всего мира. Хотя на практике суперкомпьютерные статистические данные Мангейма были не очень полезны, так как им недоставало надежности данных, но в итоге, так называемые векторные компьютерные системы, такие как VP30/50 Fujitsu, стали более популярными в Японии благодаря статистике Мангейма.

Но являлись ли эти системы действительно суперкомпьютерами? Как должен быть оценен мини-суперкомпьютер, такой как Convex C1/2 из США? Необходимо было дать точное описание метода, как оценить и распознать суперкомпьютер для того, чтобы внести его в список Мангейма и обновлять его каждый год. С начала 90-х векторные компьютеры больше не были единственной суперкомпьютерной архитектурой; в широко распро-

странялись и выходили на рынок параллельные системы, такие как Интеллектуальные Машины CM2 (ТМС).

Это послужило основной причиной для того, чтобы Hans Werner Meuer и Erich Strohmaier начали проект TOP500 в Университете Mannheim/Germany весной 1993. Они руководствовались следующими руководящими принципами:

- предоставлять отчет о 500 самых сильных компьютеров в мире;
- производить оценку производительности с помощью системы Linpack;
- список TOP500 обновлять и издавать два раза в год;

Все данные TOP500 открыты и доступны на сайте www.top500.org.

Возникает ряд вопросов:

- Почему именно «500 самых мощных компьютеров»? Одна причина – то, что в последний раз, когда были посчитаны суперкомпьютеры во всем мире в 1992, их количество было 530. И другая причина конечно – (эмоциональное) влияние 500 списков Forbes, например 500 самых богатых людей или 500 самых больших корпораций в мире.
- Почему «самый мощный» определен общей оценкой эффективности, для которой выбрана система Linpack? Потому, что данные Linpack, прежде всего максимальная производительность, известны и легко доступны для всех рассматриваемых систем. Строго говоря, TOP500 перечисляет компьютеры только по их способности решить систему линейных уравнений, $Ax = b$, используя произвольную плотную матрицу A .

В 7-й суперкомпьютерной статистике Мангейма, изданной на Суперкомпьютерном Семинаре Мангейма в 1992, в первом списке TOP500 ожидали гонку между США и Японией. Однако «японская опасность» была чрезвычайно завышена, поскольку первый список TOP500 показал ясно, что ведущими являются США с 45% всех установок TOP500, а Япония была далеко позади и имела всего лишь 22%. Если посмотреть на 30-ый список TOP500, изданный в ноябре 2007 в Рено/США, увидим что господство США еще больше чем было 15 лет назад: теперь у них 56.6% всех установленных систем, а Япония имеет только 4%. Даже Великобритания с 9.6% и

Германия с 6.2% оказались перед Японией, которая находится рядом с Францией 3.4%.

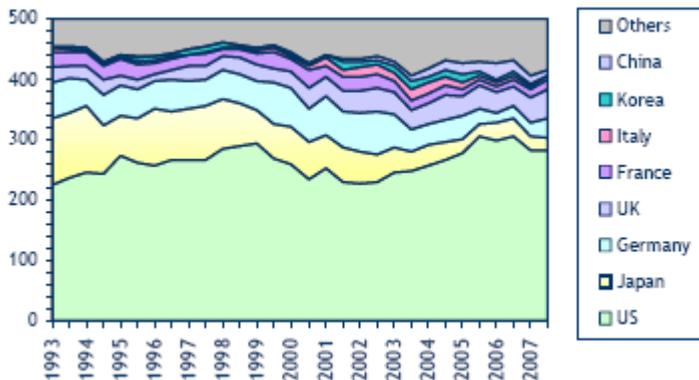


Рис. 10. Суперкомпьютерные установки в мире

В 1993, США начали с огромной цифры 45 %, которые им даже удалось немного повысить. Япония стартовала с 22%-в, но значительно отступила. В Европе – Германия, которая всегда была перед Великобританией, сейчас далеко позади.

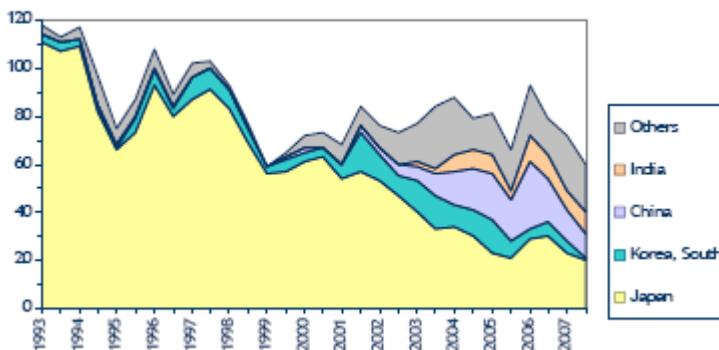


Рис. 11. Суперкомпьютерные установки в Азии

Рис. 11 показывает развитие суперкомпьютерных установок в Азии с 1993. Там виден быстрый спад в Японии, и видно, что Китай и Индия выходят на рынок НРС. Но на следующих списках TOP500 они уже теряют свои места.

Если сосредоточиться на развитии изготовителей (рис. 12), Cray был явным лидером в первом списке TOP500 с 41% перед Fujitsu с 14 %. Третье место было предоставлено ТМС – не векторному суперкомпьютерному изготовителю – с 10.8 %, перед Intel с 8.8 %. Тогда у Intel все еще было свое Суперкомпьютерное Подразделение, которое также производило не векторные суперкомпьютеры. Удивительно, продвижение изготовителей НРС, IBM и Hewlett Packard, их не было представлено в первом списке TOP500 вообще. В 30-ом списке TOP500 в ноябре 2007 у IBM есть явное преимущество, а именно, 46.4 %. Второе положение принадлежит Hewlett Packard с 33.2 %, и лидер 1993 Cray Research (теперь Cray Inc) потерял позиции до 2.8 %.

1st TOP500 List, 06/1993

<i>Manufacturer</i>	<i>Count</i>	<i>Share</i>
Cray Research	205	41.0%
Fujitsu	69	13.8%
Thinking Machines	54	10.8%
Intel	44	8.8%
Convex	36	7.2%
NEC	32	6.4%
Kendall Square Res.	21	4.2%
MasPar	18	3.6%
Meiko	9	1.8%
Hitachi	6	1.2%
Parsytec	3	0.6%
nCube	3	0.6%
Total	500	100.0%

30th TOP500 List, 11/2007

<i>Manufacturer</i>	<i>Count</i>	<i>Share</i>
Cray Inc.	14	2.8%
Fujitsu	3	0.6%
Thinking Machines	–	–
Intel	1	0.2%
Hewlett-Packard	166	33.2%
NEC	2	0.4%
Kendall Square Res.	–	–
MasPar	–	–
Meiko	–	–
Hitachi/Fujitsu	1	0.2%
Parsytec	–	–
nCube	–	–
IBM	232	46.4%
SGI	22	4.4%
Dell	24	4.8%
Others	35	7.0%
Total	500	100.0%

Рис. 12. TOP 500 списки производителей

Из рис. 12 видно, что рынок НРС является очень динамичным: всего за 15 лет рынок претерпел полное преобразование. Cray потерял статус лидера на общем рынке НРС, от индустриального сегмента рынка, перешел в нишу разработок для высококачественных правительственных научно-исследовательских лабораторий и академических клиентов. IBM, с другой

стороны, которая фактически не имела достаточно важного сегмента на рынке НРС в начале 90-х, стала доминирующим лидером рынка во всех сегментах рынка, включая промышленных и коммерческих клиентов. Hewlett Packard сначала был небольшим изготовителем НРС, представленным в первых списках TOP500, следующим за Convex, а теперь утвердился как номер два, сразу за IBM.

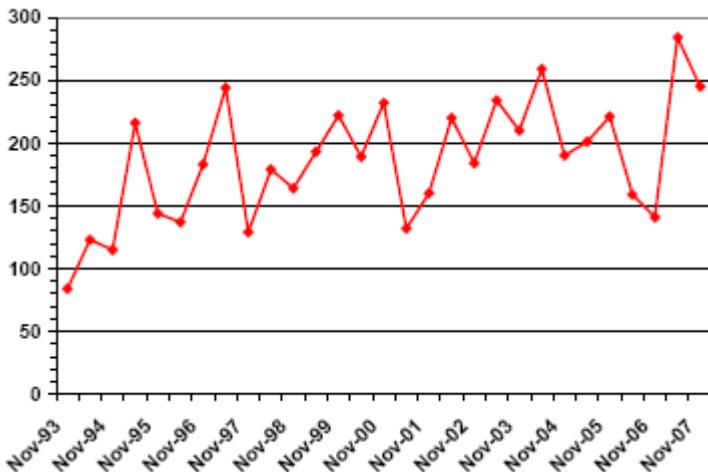


Рис. 13. Интенсивность замещения

Компания Sun Microsystems была второй среди производителей НРС, а теперь серьезно уступила свои позиции в списке TOP500. В принципе, Cray мог бы снова более активно действовать на арене НРС. Компания в настоящее время имеет три гибридных суперкомпьютера, находящихся в списке TOP10, который показывает, что она успешно развивает векторные вычисления.

Проект TOP500 компенсировал дефицит суперкомпьютерной статистики Мангейма, которую использовали в течение семи лет на конференциях ISC 1986–1992. Используется простой, но успешный подход, основанный на оценке эффективности с помощью Linpack, хотя она часто критикуется. Посредством списка TOP500 невозможно оценить размер рынка НРС (например, в US\$), поскольку мы не знаем сколько систем и по какой стоимости производится и реализуется. Информация о ценах систем представляла бы большой интерес для сообщества НРС. Но в самом начале проекта

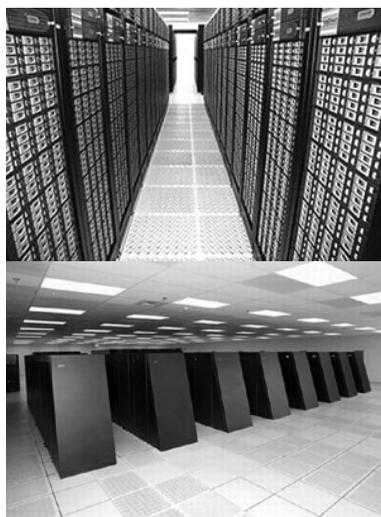
TOP500 предполагалось не включать этот вид более или менее ненадежных и неопределенных данных.

Анализируя списки TOP500, видно, что системы верхней половины списка остаются там только в течение некоторых периодов, и видны сезонные колебания. Есть случаи, когда системы находятся в списке в течение только шести месяцев, и в этот период товарооборот очень высок. Рис. 13 показывает, что в среднем, приблизительно 200 систем выбывают после шести месяцев.

5. BLUE GENE – АТЛАНТ МИРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На фоне «гонки вычислительных мощностей» весьма красиво выглядит легендарный Blue Gene/L, который вот уже 2 года является “царем суперкомпьютеров”. Blue Gene/L разработан компанией IBM, а его мощность – 280,6 терафлоп (или триллионов операций с плавающей запятой в секунду) – почти в 3 раза превосходит мощность машины, занявшей в ноябре 2006 г. второе место в списке Top 500.

В 1999 г. компания IBM объявила о развертывании программы, результатом которой должен стать суперкомпьютер с производительностью в один петафлопс (тысяча терафлоп) [13, 14]. В то время десятки терафлоп были сказкой, что уж говорить о тысячах... Так вот, проект Blue Gene (голубой ген) – это один из первых шагов на пути к достижению заветной цели. Новая машина должна была затмить славу Deep Blue, суперкомпьютера обыгравшего Каспарова в шахматы. (Производительность Deep Blue чуть больше 1 терафлопа.) О строительстве новой системы, которое должно производиться в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса (США), было объявлено в сентябре 2000 г., а уже в ноябре 2004 г. она заняла первое место в рейтинге Top 500. Ее производительность тогда достигала 70,7 терафлоп, а в составе системы было 16 384 двудерных процессора (поэтому



число процессоров умножалось на два, и в прессе фигурировала цифра 32 768). Затем, в 2005 г., количество процессоров Blue Gene/L удвоилось (65 536) и производительность повысилась почти в 2 раза (135,5 терафлоп). И наконец в 2006 г. число процессорных блоков было еще раз увеличено вдвое, а производительность достигла небывалого доселе показателя в 280,6 терафлоп.

Каким образом, возможно, измерить производительность суперкомпьютеров? Для этого используется тест Linpack, который «кормит машину» громоздкими системами линейных уравнений с множеством неизвестных. При проведении такого теста вычислениями занимаются все блоки суперкомпьютера. Необходимо заметить, что при решении реальных задач некоторые блоки заняты организацией распределения задач и коммуникаций в системе.

Для чего же нужны такие мощности? Неужели те вычислительные системы, которые существуют, не удовлетворяют потребностей науки и техники? Оказывается, что нет. Изначально Blue Gene/L, соответственно своему названию, должен был моделировать строительство белков на основании информации, хранящейся в ДНК. Эти исследования могли помочь ученым в борьбе с некоторыми болезнями. Но, как это всегда случается, проблема национальной безопасности ставится выше проблемы здоровья населения. Поэтому американские оборонщики уже в 2001 г. «переманили» многообещающую, но еще не построенную машину к себе, чтобы использовать ее для исследования ядерного оружия.

Сегодня в серии Blue Gene есть несколько машин, построенных по одному принципу. Одна из них занимается моделированием процессов, происходящих в мозге человека. Так что медицина и генетика не остались на задворках.

В 2006 г. оборонщики Соединенных Штатов заключили контракт с IBM на строительство вычислительной системы для моделирования глобальной биосистемы нашей планеты. Производительность этой машины будет не менее 1 петафлопа. Вероятно, IBM разработает новую архитектуру, хотя Blue Gene все еще обладает довольно внушительным потенциалом. Впрочем, результаты этого проекта будут известны лишь в 2010 г., поэтому Blue Gene/L пока что «царь в мире суперкомпьютеров», и, по-видимому, останется им еще какое-то время.

Blue Gene/L, как и многие суперкомпьютеры, имеет кластерную архитектуру. Суть ее состоит в том, чтобы объединить множество процессоров в единую систему и тем самым увеличить ее производительность. На сегодня этот принцип строительства суперкомпьютеров, пожалуй, самый эко-

номичный и удобный. Несмотря на это, у него есть и некоторые недостатки. Например, при использовании множества кластеров значительно увеличивается энергопотребление вычислительной системы, кроме того, она требует довольно мощного охлаждения. И конечно, невысокие скорости обмена данными с памятью снижают мощность системы, поэтому потенциал процессоров не используется полностью.

Архитектура Blue Gene/L весьма экономична. Блоки, где размещены процессор, кэш-память, оперативная память, сетевой интерфейс, обладают относительно небольшой производительностью, приравненной к скорости обмена данными. Это обеспечивает рациональное использование процессорных мощностей с минимальными потерями, а также небольшое энергопотребление. Сама параллельная архитектура суперкомпьютера хорошо организована при помощи отдельных блоков, количество которых можно регулировать в зависимости от потребности задач, решаемых системой.

«Элементарной частицей» суперкомпьютера Blue Gene/L является модуль *compute card*, состоящий из двух блоков, которые, в свою очередь, обладают двумя процессорами. Такие модули объединяются по 16 штук и размещаются на особой карте. В свою очередь, 16 карт также объединяются и располагаются на одной панели (ее размеры 43,18x60,96x86,36 см). Получается, что в каждой такой панели 512 блоков. Затем две панели объединяются и встраиваются в серверную стойку (в такой стойке уже 1024 блока и 2048 процессоров).

На каждом модуле *compute card* размещаются два процессора и по 4 Мб выделенной памяти. Здесь же располагается контроллер и девять микросхем оперативной памяти. Общий объем «оперативки» – 256 Мб, хотя теоретически модуль может поддерживать и 2 Gb памяти. Каждый модуль физически представляет собой синтез микросхем оперативной памяти SDRAM-DDR и специальной интегральной микросхемы ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*). ASIC стоит рассмотреть подробнее, так как многие достоинства Blue Gene/L определяются ею. Схема представляет собой так называемую «систему-на-чипе», включающую в себя помимо процессора сетевые интерфейсы и встроенную память. Размеры модуля достаточно малы (габариты подложки не больше 11,1x11,1 мм). Микросхема ASIC работает на частоте 700 MHz. Размеры и компактность ASIC позволили снизить энергопотребление и значительно увеличить вычислительную плотность по отношению к объемам машины.

Модули Blue Gene/L оснащены процессорами PowerPC 440. Одна панель, объединяющая 512 элементарных блоков системы, обладает производительностью в 1,4 терафлоп при условии, что на каждом узле установлен

один процессор. Но в каждом блоке присутствует еще один процессор, выполняющий функции связи с другими процессорами всей системы. Есть еще и особые процессорные узлы, которые занимаются сугубо вводом-выводом информации. Для нормальной работы всей системы необходимы хост-компьютер (он занимается анализом и компиляцией данных) и файл-серверы. Блок ввода-вывода является таким посредником между вычислительными блоками и хост-компьютером, а также файл-серверами.

Все вычислительные и иные блоки системы связаны хитросплетением сетей. Сеть Gigabit Ethernet обеспечивает подключение к хост-компьютеру и файловым серверам. Сеть Gigabit Ethernet-ITAC предназначена для управления машиной. Кроме этого, для обмена информацией между разными



блоками строится трехмерная тороидальная сеть; для выполнения общих операций – «сеть-дерево», а также присутствует сеть барьеров и прерываний, общая для всей системы. Все устройство вычислительной системы довольно компактно (в сравнении с конкурентами) и экономично. Разработчики создали хорошую систему охлаждения, состоящую из радиаторов с наклонными ребрами, благодаря которым охлажденный воздух распределяется более рационально.

Blue Gene/L работает под управлением специально разработанной версии операционной системы Linux. Благодаря тому, что программный код Linux открыт, задача создания программного обеспечения значительно упрощается и удешевляется.

6. ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ BLUE GENE

Министерство энергетики Соединенных Штатов купило Blue Gene/L за \$290 млн. Для дальнейшего развития суперкомпьютерных технологий IBM начала продажу машин типа Blue Gene/L. Стоимость одной стойки (ее производительность – 5,7 терафлоп) составляет \$2 млн. Некоторые научные учреждения уже оснащаются системой Blue Gene, в их числе Суперкомпьютерный центр Сан-Диего и Эдинбургский университет. В целом супер-

компьютеры, построенные на основе технологий Blue Gene, работают в разных частях света и решают различные по своему направлению задачи. Они задействованы как в сфере военной безопасности и изучении ядерных потенциалов, так и в исследовании биомолекулярных формаций, ДНК и в разработке тех или иных лекарств.

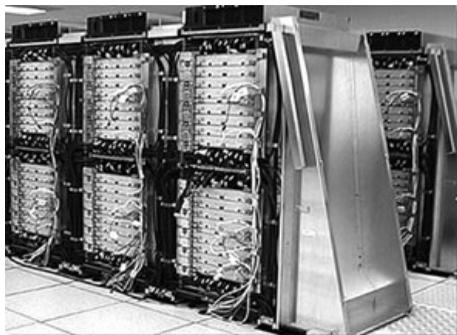
Помимо этого, IBM может предоставить суперкомпьютер, установленный в Watson Research Center, для решения каких-либо задач (естественно, за определенную плату).

Производительность этой системы – 100 терафлоп. Арендовать систему (или приобрести вычислительное время) могут как научные исследователи, так и бизнес деятели. IBM планирует внедрять суперкомпьютеры не только в научные, исследовательские центры и государственные учреждения, но и в коммерческие организации. Blue Gene – в этом отношении очень конкурентоспособная технология, так как она относительно дешева, компактна, а сетевая структура позволяет организовать конфигурацию, необходимую для решения конкретных задач с достаточной (но не избыточной) мощностью. Если произойдет массовое внедрение суперкомпьютеров в коммерческие организации, появится более широкое финансовое основание для дальнейшего развития в данной области, поэтому скорость развития высокопроизводительных машин также возрастет.

Система Blue Gene/L была способна к развитию, но IBM планировала в рамках серии Blue Gene построить еще несколько машин. Например, Blue Gene/C (C означает Cycles64). А система BlueGene/P, релиз которой планировался выпустить в 2008 г., должна была достигнуть заветного предела в 1 петафлоп.

Реально всё произошло значительно быстрее. А именно, 26 июня 2007 года IBM представила Blue Gene/P, второе поколение суперкомпьютеров Blue Gene. То есть был разработан компьютер для постоянной работы с производительностью в 1 петафлоп. Blue Gene/P может быть сконфигурирован для достижения более чем 3 петафлоп.

Следующая система с производительностью в 3-10 петафлоп называется Blue Gene/Q. На данный момент этот проект – скорее мечта, чем реаль-



ность. И все-таки, если человечество достигло всего того, что мы уже имеем (а ведь и терафлоп когда-то был чем-то нереальным), то можно с уверенностью смотреть в будущее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. TOP500 Supercomputer Sites – мировой рейтинг пятисот самых мощных компьютеров мир. – <http://www.top500.org/>
2. Воеводин В.В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления – СПб: БХВ-Петербург, 2002. – 609 с.
3. Message Passing Interface Forum. – <http://www.mpi-forum.org/>
4. Андрианов А.Н., Бабенко К.И., Забродин А.В., Задыхайло И.Б., Котов Е.И., Мямлин А.Н., Поддерюгина Н.В., Поздняков Л.А. О структуре вычислителя для решения задач обтекания. Комплексный подход к проектированию // Вычислительные процессы и системы. – М.: Наука, 1985. – С. 13–62.
5. Cray Research, Inc. CAL Assembler Version 1 Reference Manual. – Publ. 2240000, Bloomington, Minnesota. – 1977.
6. Cray Research, Inc. Computer System Hardware Reference Manual. – Publ. 2240004, Bloomington, Minnesota. – 1979.
7. Суперкомпьютеры Facom фирмы Fujitsu выходят на рынки США и Западной Европы // Электроника. – 1984. – Т. 57, № 20. – С. 28–29.
8. Towards Supermachines: NEC's Supermachine SX-2 with Operating Speeds of 1,3 Gigafllops // Data Tid, Norway. – 1984. – Vol. 6, № 1. – P. 132–135.
9. Shaw D.E. The NON-VON Project // Progress Report, Columbia Univ. – 1983.
10. Gottlieb A., Grishman R., Kruskal C., McAuliffe K., Rudolph L., Snir M. The NYU Supercomputer – Designing and MIMD Shared Memory Parallel Computer // IEEE Trans. Comput. – 1983. – Vol. C32, № 2. – P. 175–189.
11. Arvind, Dertouzos M.L., Ianucci R.A. A Multiprocessor Evaluation Facility // MIT/LCS/TR-32. Cambridge, Massachusetts. – 1983.
12. Arvind, Culler D.E., Ianucci R.A., Kathail V., Pingali K., Thomas R.E. The Tagged Token Dataflow Architecture. – MIT. Cambridge, Massachusetts. . – 1983. – (Prep).
13. Blue Gene – IBM Research Project // http://domino.research.ibm.com/comm/research_projects.nsf/pages/bluegene.index.html
14. The IBM Blue Gene/P Solution. – <http://www-03.ibm.com/systems/deepcomputing/bluegene/>