

- Разложения многочлена по *базисным элементам*.
- Зависимости *базисных элементов* и *коэффициентов* от непрерывных параметров трехточечной сетки.
- *Понижения порядка* производных и *увеличения шага* сетки.
- *Понижения вычислительной сложности*.
- *Управления качеством* регрессионной матрицы.
- *Устойчивости вычислений* к входным ошибкам и др.

Указанные свойства позволяют создавать алгоритмы с включением режима *оптимизации* решения в задачах КПА.

Эффективность расчетов подтверждена нетривиальными примерами аппроксимации аналитически заданных кривых, сегментации и сглаживания по координатам точек на контурных линиях. Формулы для вычисления коэффициентов аппроксимирующих многочленов могут быть использованы как для решения практических задач, так и для теоретических исследований.

## Литература

1. Калиткин Н. Н., Шляхов Н. М. В-сплайны произвольной степени // ДАН, 1999. Т. 367, № 2. С. 157–160.
2. де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. М.: «Радио и связь», 1985.
3. Dikoussar N. D. Function parameterization by using 4-point transforms // Comput. Phys. Commun. 1997. Vol. 99. P. 235–254.
4. Дикусар Н. Д. Метод базисных элементов // Матем. модел. 2010. Т. 22, № 12. С. 115–136 (MMCS. 2011. Vol. 3, N 4. P. 492–507).
5. Дикусар Н. Д. Кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка с автоматическим обнаружением узлов // Матем. модел. 2014. Т. 26, № 3. С. 31–48 (MMCS. 2014. Vol. 6, N 5. P. 509–522).
6. Дикусар Н. Д. Полиномиальная аппроксимация высоких порядков // Матем. модел. 2015. Т. 27, № 9. С. 89–109 (MMCS. 2016. Vol. 8, N 2. P. 183–200).
7. Зорин Г. Н., Стрелков А. В., Третьякова С. П., Воинов А. М., Горбачев В. М., Емельянов Б. А., Ильич Р., Скварч Ю. Изучение возможности регистрации термоядерных нейтронов в условиях высокого фона атомного реактора // Атомная энергия. 1996. Т. 80, № 6. С. 473–474.
8. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976.
9. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003.

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ. ТЕПЕРЬ ИЛИ ОПЯТЬ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ?

Г. С. Елизаров

НИИ «Квант», г. Москва

### Введение

Вокруг супер вычисления. В кармане каждого из нас вычислительное устройство, которое превосходит по производительности все вычислительные машины вместе взятые, которые были в распоряжении человечества, когда оно было уже достаточно развито, чтобы взорвать атомную бомбу, преодолеть земное притяжение и устремиться в космос.

Естественно, что с тех пор понятие суперкомпьютера и высокопроизводительных вычислений неоднократно менялось.

В своем докладе мне хотелось бы обратить Ваше внимание на тесную связь того, что мы называем суперкомпьютерами, с другими бурно развивающимися направлениями высокопроизводительных вычислений.

В таблице приведено несколько упрощенное представление о суперкомпьютерах в разные времена.

Период	Краткое описание	Адекватность описания
> 1940	Большое спецустройство для спецслужб	Так и есть
1950	Большое вычислительное устройство для ядерщиков	Так и есть
1960	Большое вычислительное устройство от IBM для бизнес-расчетов	Так и есть
1970	Опять большое вычислительное устройство для ядерщиков	Так и есть
1980	То, что делает Сеймур Крэй	Так все считают
С 1993	То, на чем можно запустить LINPACK и попасть в TOP500	Здорово. Наконец-то что-то общезначимое
2000	То, на чем можно запустить LINPACK и попасть в TOP500	Почему только LINPACK?
2010	То, на чем можно запустить LINPACK и попасть в TOP500	Почему только LINPACK и только в TOP500?
2020	Устройство из микросхем, которое кому-то нужно и потребляет много энергии	А как же TOP500?

Рассмотрим некоторые важные факторы в развитии высокопроизводительных вычислений в мире.

## 1. Типы вычислителей для высокопроизводительных расчетов

### 1.1. Суперкомпьютеры из TOP500

Традиционно основным показателем развития суперкомпьютеров и вообще высокопроизводительных вычислений считаются изменения в рейтинге TOP500 производительности 500 наиболее мощных суперкомпьютерных установок в мире.

Три года подряд рейтинг возглавляет китайский суперкомпьютер Tianhe-2 с производительностью 33,9 петафлопс и энергопотреблением 17,8 МВт.

Сейчас его сменил также китайский суперкомпьютер Sunway TaihuLight с производительностью 93 петафлопс и энергопотреблением 15,4 МВт.

За последние годы суммарная производительность СК, входящих в TOP500, увеличивается всего в 1,3–1,5 раз в год, а не в 1,8 раза, как мы привыкли за последние 10–20 лет.

Замедление? Ни в коем случае.

За три года количество СК в TOP500 с производительностью более 1 Пфлопс выросло более чем в 3 раза.

Интенсивно отрабатываются новые технологии, но пока строить отдельные СК с потреблением более 20 мВт только ради рекорда никто не хочет.

Однако сомнений в том, что в ближайшие 5–7 лет в TOP500 появится СК с производительностью  $10^{18}$  флопс, нет.

В то же время следует отметить, что в настоящее время ориентация только на рейтинг TOP500 и только на суперкомпьютеры из этого списка при анализе высокопроизводительных вычислений представляется весьма недостаточной.

## 1.2. Вычислительные комплексы, обслуживающие Интернет, поисковики, сотовую связь, телекоммуникации в широком смысле

Вычислительные комплексы поисковых систем типа Google и Яндекс, центров обработки данных (ЦОДов), предоставляющих возможности, в том числе, и высокопроизводительных облачных вычислений, социальных сетей, сетей интернет-торговли (Амазон) и прочих сетей интернет-соединений – развиваются очень быстро и реально превысили по суммарной производительности, емкости систем хранения данных и суммарному энергопотреблению показатели всех в совокупности СК TOP500.

Суперкомпьютер из TOP500 с энергопотреблением на уровне 20 МВт всего несколько, а ЦОДов с таким уровнем энергопотребления в мире многие десятки.

Построены и эксплуатируются ЦОДы с энергопотреблением более 100 МВт.

В РФ также СК с энергопотреблением 3–5 МВт всего один в МГУ, а ЦОДов с энергопотреблением 10 МВт и выше более десятка. Строится или проектируется несколько ЦОДов, в том числе для госучреждений, с энергопотреблением до 100 МВт.

Налицо сильнейшее взаимное влияние этих двух групп сверхбольших вычислительных установок.

Это происходит и в научно-техническом аспекте – в первую очередь, в направлении разработки методов сверхвысокопроизводительной обработки сверхбольших объемов данных.

В организационно-экономическом плане:

облачные вычисления, предоставляемые общедоступными ЦОДами, позволяют осуществлять достаточно трудоемкие вычисления, для которых ранее использовались СК из TOP500, что, возможно, объясняет снижение темпов увеличения суммарной производительности в TOP500;

при организации вычислительных процессов в СК из TOP500 для повышения эффективности использования в настоящее время широко используется методика облачных вычислений, разработанная для общедоступных ЦОДов.

Решения, применяемые в таких ЦОДах, серьезно влияют на общее развитие элементной базы и принципов построения вычислительной техники.

## 1.3. Специализированные вычислительные комплексы

Любая современная крупная исследовательская установка типа Большого адронного коллайдера (БАК) в Церне включает вычислительную систему сбора, предварительного анализа, хранения и последующего анализа данных, которая по своим масштабам, сложности, производительности и энергопотреблению находится на уровне самых мощных СК из TOP500.

«Компактный мюонный соленоид» (CMS) – один из двух основных детекторов БАК, это не только свыше 15 тыс. тонн физического оборудования, но и 1000000 специализированных СБИС 20 типов, специально изготовленных для этого проекта. Конечно, это в основном «frontend» электроника, т. е. устройства преобразования результатов измерений в цифровую форму и их первичной обработки. Однако их суммарная производительность исключительно высока (правда, не на LINPACKe).

Криптовалюты – для выработки элементов криптовалюты используется громадное количество специализированного вычислительного оборудования. Это большой сложившийся рынок.

Имеется ряд крупных специализированных систем как для решения задач математической физики, так и, например, для моделирования больших нейронных сетей.

Можно сказать, что центр тяжести высокопроизводительных вычислений сместился от чисто научных «LINPACKовских» суперкомпьютеров из TOP500 в сторону крупных систем распределенной обработки данных более широкого назначения, часто специализированных, но при этом темпы увеличения возможностей высокопроизводительных вычислений не падают.

## 2. Новые технологии и парадигмы обработки информации для экзафлопсных СК

Отметим некоторые важные моменты с учетом развития высокопроизводительных специализированных вычислений.

### 2.1. Технологические возможности производства СБИС

Технологические возможности продолжают развитие.

Технологические нормы производства микропроцессоров – 16 нм освоено, 7 нм будет освоено через несколько лет.

Оптические соединения на кристалле СБИС и вне кристалла.

Трехмерные конструкции СБИС – как 3-D память, так и СБИС типа слой процессоров, слой памяти, слой оптических соединений и коммутации.

Закон Мура, описывающий экспоненциальное развитие производительности средств ВТ, сейчас реализуется в форме продолжающегося быстрого уменьшения стоимости одного вентиля в микросхеме и одной операции в СК в целом.

Стоимость операции – в значительной мере это стоимость затраченной на нее энергии. Нужно выключить в микросхеме и СК в целом все, что не нужно в конкретный момент для выполнения требуемой функции. Но можно иметь в кристалле наготове избыточное количество разнообразной логики и памяти (темный кремний), включая для решения конкретной задачи (или ее подзадачи) лишь конкретную нужную часть.

В результате – появляется возможность дальнейшего повышения уровня параллелизма и распределенности в вычислениях и хранении данных в сочетании со специализацией и гибридизацией отдельных вычислительных устройств и подсистем.

Быстро растут технологические возможности не только основных производителей СБИС микропроцессоров и памяти, изготавливающих свои изделия партиями по несколько миллионов кристаллов. Резко упростилась доступность высоких технологий и для разработчиков-производителей небольших партий – несколько десятков СБИС можно недорого сделать по технологиям до 28 нм. В сочетании с доступными технологиями использования IP-блоков отдельных узлов СБИС (памяти, интерфейсов, процессорных ядер, АЦП/ЦАП и пр.) все это дает возможность быстро разрабатывать и изготавливать сложные специализированные СБИС с высокими технико-экономическими показателями.

Следует обратить внимание на то, что первое место в TOP500 занято именно путем повышения уровня специализации в 260 ядерном процессоре SW26010 (3,06 Tflops) в Sunway по сравнению XeonPhi (1 Tflops) в Tianhe-2.

### 2.2. HPDA (High Performance Data Analysis)

Эти технологические возможности реализуются как в продолжающемся росте производительности СК собственно для HPC (High Performance Computer), так и в виде СК для высокопроизводительной аналитической обработки постоянно изменяющихся сверх больших объемов данных.

Сочетание HPC и массовой обработки сверх больших объемов данных (BIGDATA) породило новый тип СК – HPDA (High Performance Data Analysis).

Следующий шаг HPDA – использование HPC для управления крупными корпоративными ИТ-инфраструктурами или для взаимодействия с Интернетом вещей (Internet-of-Things, IoT).

Полномасштабный мониторинг Интернета и Интернета вещей – это именно HPDA.

Ведущие мировые фирмы производители программных и аппаратных средств активно участвуют в создании HPDA.

Например, главная компания – производитель микропроцессоров Intel осуществляет широкую экспансию по всем главным направлениям развития СК и создает новые возможности – плат-

форму Scalable System Framework (Intel SSF) построения гибридных высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Основой этой платформы являются:

многоядерный процессор Intel Xeon Phi 2-ого поколения Knights Landing, а затем Knights Hill (нормы 10 нм);

сквозная коммутационная технология Intel Omni-Path Architecture (Intel OPA, 100 Гбит/с на порт).

Фирма Intel поглотила одного из двух ведущих производителей ПЛИС – фирму Altera (США) для увеличения своих возможностей по созданию вычислительных устройств с изменяемой функциональностью, в том числе и для HPC.

### 3. Типичная иерархия специализации

В состав СК с различным уровнем специализации в качестве основных обрабатывающих элементов по-прежнему будут входить:

универсальные многоядерные микропроцессоры;

многоядерные проблемно-ориентированные микропроцессоры (графические, коммуникационные, сигнальные и др.);

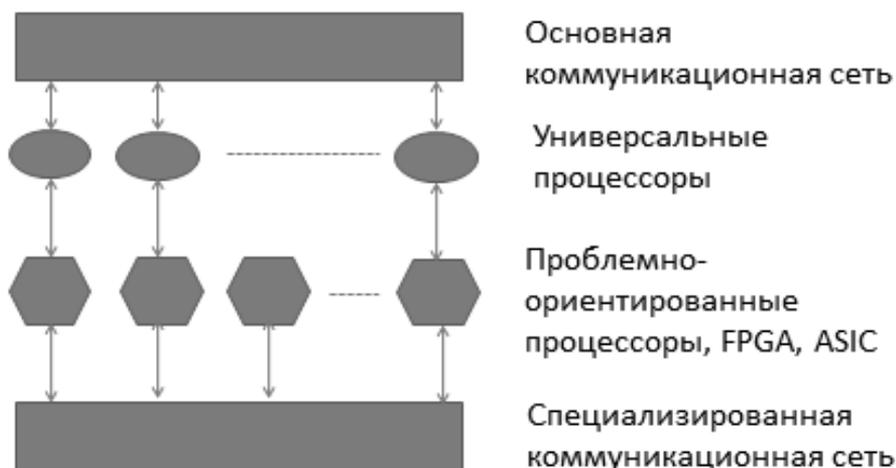
программируемые логические интегральные схемы;

**заказные СБИС**, в которых реализуются конкретные достаточно крупные прикладные преобразования или их группы.

Типичная схема гибридной структуры хорошо отработана на больших кластерах с графическими картами в качестве ускорителей.

### 4. Базовая схема гибридной ВС

На рисунке приведена базовая схема гибридной ВС.



Базовая схема гибридной ВС

Основным интерфейсным стандартом, позволяющим быстро объединять разнородные вычислительные ресурсы, пока остается шина PCI-Express.

Особенно эффективно (на фоне обычных многоядерных процессоров и графплат) удастся использовать специализированные устройства при реализации прикладных алгоритмов, использующих нестандартный набор операций, не включающих, например, операций с плавающей точкой, но

зато использующих целочисленные операции над конечными полями большой размерности. Еще лучше, если удастся использовать большие процедуры, (например, обработка изображений и речи, хеширование).

Интересно, что специализированные микропроцессоры могут не только быстро выполнять фиксированные логические преобразования, но и ускорить обращения к данным в конкретных задачах (например, множественный доступ к таблице).

### **5. Проект ФПИ «Разработка технологии быстрого создания проблемно-ориентированных вычислительных устройств высокой производительности и энергоэффективности» 2016–2018 годы**

Участники проекта: ФГУП «НИИ «Квант», МГУ (Физический факультет), лаборатория топологического проектирования микросхем МИФИ и другие соисполнители.

Цель проекта – разработка технологии быстрого (1,5–2 года) создания проблемно-ориентированных ВС, предназначенных для решения вычислительно сложных вариантных задач дискретной математики с производительностью порядка  $10^{18}$  операций в секунду и при энергопотреблении на уровне 1 МВт.

Проведенные в 2015–2016 годах исследования показывают, что при освоении проектирования и производства заказных микросхем по технологиям 28–22 нм, поставленные в проекте задачи, вполне достижимы.

Достаточно отчетливо просматриваются два пути:

- крупноблочное проектирование специализированных ВС из набора заранее проработанных макроблоков, характерных для данной области проблемной ориентации;
- создание многоядерных ВС, проблемно ориентированных на заданную прикладную сферу, с возможностью окончательной настройки структуры за счет изменения параметров ВС (числа ядер, состава команд, размера памяти различного уровня, характеристик и структуры коммуникационной среды).

Надо сказать, что оба эти пути активно реализуются различными группами исследователей за рубежом. Приглашаю всех желающих ознакомиться с текущими результатами и принять участие в работах.

### **6. Выводы**

Рост производительности СК продолжается.

Центр тяжести смещается в сторону HPDA.

Углубляется специализация высокопроизводительных ВС.