

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ЗА РУБЕЖОМ

Д.Б. Изюмов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, *izyumov@extech.ru*

А.Б. Логунов, дир. центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. воен. наук, *logunov@extech.ru*

Е.Л. Кондратюк, ст. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, *kel@extech.ru*

В статье представлены результаты анализа основных элементов и направлений развития суперкомпьютеров и квантовых технологий за рубежом. Рассмотрены основные научно-технические проблемы их использования в вооруженных силах.

Ключевые слова: суперкомпьютеры, квантовые технологии, высокопроизводительные вычисления, вооружение, военная и специальная техника, основные направления развития, перспективные исследования.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF HIGH-PERFORMANCE COMPUTATIONS ABROAD

D.B. Izumov, Head of Department, SRI FRCEC, *izyumov@extech.ru*

A.B. Logunov, Director of Centre, SRI FRCEC, Doctor of Military Sciences, *logunov@extech.ru*

E.L. Kondratyuk, Senior Researcher, SRI FRCEC, *kel@extech.ru*

The article presents the results of the analysis of the main elements and directions of development of supercomputers and quantum technologies abroad. The main scientific and technological issues of their use in the armed forces are considered.

Keywords: supercomputers, quantum technologies, high-performance computing, weapons, military and special equipment, the main directions of development, advanced research.

Введение

Понятие «суперкомпьютер» не раз было предметом многочисленных споров и обсуждений. Чаще всего авторство термина приписывается Дж. Майклу и С. Фернбачу, в конце 60-х годов XX века работавшим в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory – LLNL).

В лексикон термин «суперкомпьютер» вошел благодаря распространенности компьютерных систем С. Крэя, таких как CDC 6600, CDC 7600, Cray-1, Cray-2, Cray-3 и Cray-4. Крэй разрабатывал вычислительные машины, которые зачастую становились основными вычислительными средствами правительственных, промышленных и академических научно-технических проектов США с середины 1960-х годов до 1996 года.

Суперкомпьютер («Supercomputer», СверхЭВМ, СуперЭВМ, сверхвычислитель) — это специализированная ЭВМ, значительно превосходящая по своим техническим параметрам и скорости вычислений большинство существующих в мире компьютеров. Как правило, современные суперкомпьютеры представляют собой большое число высокопроизводительных серверных компьютеров, соединенных друг с другом локальной высокоскоростной магистралью для достижения максимальной производительности в рамках подхода распараллеливания вычислительной задачи.

Методика исследования

Объект исследования — процесс разработки и применения суперкомпьютеров за рубежом в военной сфере. Предмет — высокопроизводительные вычисления, применение суперкомпью-

теров и квантовые технологии, реализуемые в ведущих иностранных государствах. Цель — обобщить опыт применения суперЭВМ за рубежом.

Эмпирическую базу исследования составили: научные публикации отечественных и зарубежных специалистов в области разработки суперкомпьютеров; материалы периодической печати; зарубежные нормативно-правовые акты, регламентирующие применение суперкомпьютеров в вооруженных силах.

В исследовании объектно-предметной сферы использовались структурно-функциональный и системный подходы. Применялись теоретические методы: индукция, дедукция, анализ, синтез, а также вторичный анализ результатов отечественных и зарубежных исследований.

Обсуждение

Зарубежными специалистами в области суперкомпьютеров проведена классификация суперЭВМ, согласно которой выделяют четыре типа данных машин, различающиеся спецификой элементной базой [1].

1. Суперкомпьютеры общего назначения (General Purpose – GP).

Предназначены для решения научно-технических задач, имеющих хорошую или среднюю пространственно-временную локализацию обращений к памяти. Однако сегодня таких задач становится все меньше, а для актуальных задач локализация ухудшается: например, вместо работы с плотно заполненными матрицами в настоящее время характерна работа с разреженными.

2. Суперкомпьютеры с большим объемом памяти (Capacity-Bandwidth – CB).

Представляют собой суперкомпьютеры с огромной памятью, используемой в режиме интенсивных обращений к ней с плохой пространственно-временной локализацией. Типичные задачи для таких машин: Большие данные (Big Data), графовые базы с неоднородной информацией, моделирование функционирования сложных изделий и систем, искусственный интеллект.

3. Суперкомпьютеры с малым объемом памяти (Reduced Memory – RM).

Представляют собой суперкомпьютеры со встроенной основной памятью малого объема, обладающей малыми задержками и повышенной пропускной способностью. Такие системы обладают повышенной производительностью в сравнении с GP-суперкомпьютерами и предназначены для решения таких задач, как обработка сигналов и изображений, информационная безопасность, глубинное обучение.

4. Суперкомпьютеры большой производительности (Compute Oriented – CO).

Суперкомпьютеры высшей производительности ориентированы только на вычисления с хорошей пространственно-временной локализацией обращений к памяти. Для них важно наличие большой кэш-памяти, допускается низкий баланс пропускной способности памяти и производительности; характерны задачи работы с плотно заполненными матрицами. Возможности таких суперкомпьютеров адекватно оцениваются тестом Linpack.

На рис. 1 суперкомпьютеры перечисленных типов представлены в пространстве координат объема оперативной памяти (PB, Пбайт) и баланса пропускной способности памяти к производительности (B/F), где B – байт, F (FLOP) – операция над числами с плавающей точкой. По производительности на первом месте CO-суперкомпьютеры, далее RM, GP и CB. К классу СКЧН относятся RM-, CB-суперкомпьютеры и частично CO-суперкомпьютеры.

Традиционно сферой применения суперкомпьютеров были исследования в следующих областях: физика плазмы и статистическая механика, физика конденсированных сред, молекулярная и атомная физика, теория простых частиц, газовая динамика и теория турбулентности, астрофизика. В химии – соответственно разные области вычислительной химии: квантовая химия (включая расчеты электронной структуры для целей конструирования новейших материалов, к примеру катализаторов и сверхпроводников), молекулярная динамика

ка, химическая кинетика, теория поверхностных явлений и химия твердого тела, создание фармацевтических средств. Естественно, что ряд областей внедрения находится на стыках соответственных наук, к примеру химии и биологии, и перекрывается с техническими приложениями. Так, задачи метеорологии, исследования атмосферных явлений и задача длительного прогноза погоды, для решения которой постоянно не хватает мощностей современных суперЭВМ, тесно соединены с решением ряда вышеперечисленных проблем физики.

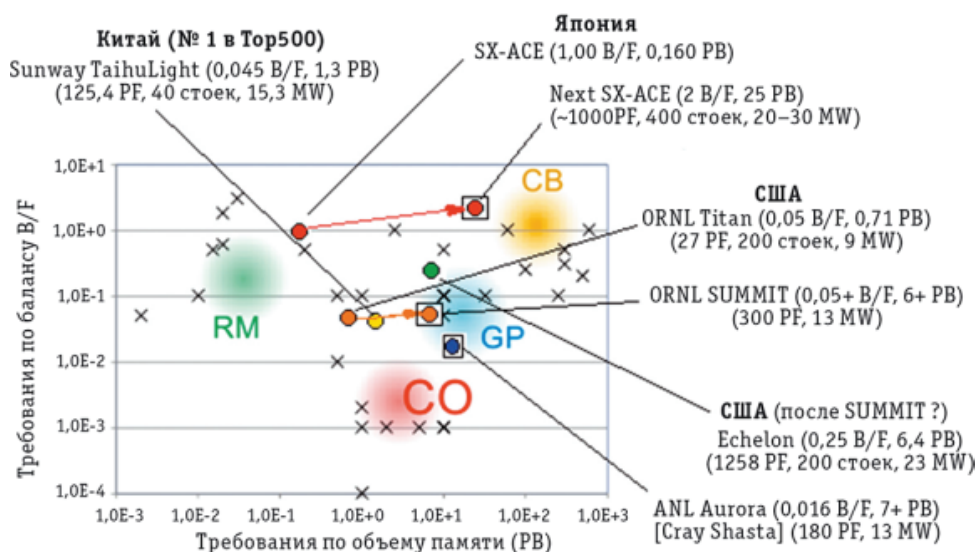


Рис. 1. Представительные образцы зарубежных суперкомпьютеров [1]

Среди технических проблем, для решения которых используются суперкомпьютеры, стоит выделить задачи аэрокосмической и автомобильной индустрии, ядерной энергетики, предсказания и разработки месторождений полезных ископаемых, нефтегазовой отрасли, конструирование новейших микропроцессоров, электронной компонентной базы и самих суперЭВМ. Несмотря на множество перечисленных областей, суперкомпьютеры изначально создавались как системы двойного назначения. Не считая задач, решение которых традиционно связывается с применением СК (разработка оружия массового поражения, конструирование летательных аппаратов и ракетного вооружения), можно упомянуть, к примеру, и разработку малошумных подводных лодок и других специфичных задач. Так, например, суперкомпьютеры Министерства энергетики США (Department of Energy – DoE) и ведущих научно-исследовательских организаций Китая в области создания ядерного оружия применяются и будут в дальнейшем применяться для моделирования ядерных взрывов, что позволяет не проводить ядерные испытания согласно достигнутым ведущими ядерными державами соглашениям.

В настоящее время лидирующие позиции по количеству суперкомпьютеров в мире занимают Китай и США. Согласно данным зарубежных источников, в КНР их насчитывается 206 шт., а в США – 124 шт., доли которых по количеству данных машин в мире составляют 41,2 и 24,8% соответственно (рис. 2). В табл. 1 приведено распределение суперкомпьютеров по странам [2].

Необходимо отметить, что, согласно данным статистического ресурса Top-500, посвященного суперкомпьютерам, число используемых в оборонных целях суперЭВМ, по всей видимости, незначительно (рис. 3, табл. 2) [3].

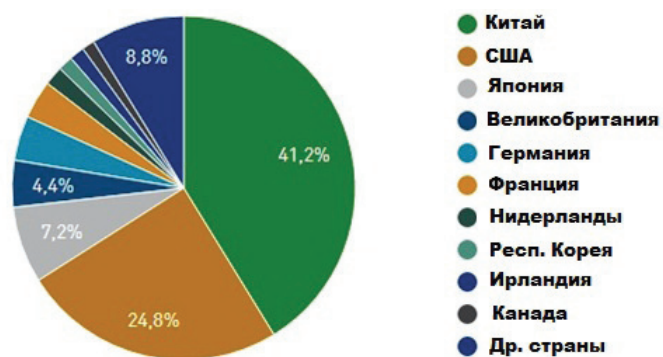


Рис. 2. Доля суперкомпьютеров в мире по странам

Таблица 1

Количество суперкомпьютеров в мире по странам

Страна	Количество, шт.	Доля в мировом объеме, %	Rmax (GFlops)	Rpeak (GFlops)	Количество процессорных ядер
Китай	206	41,2	354544958	624250649	25107680
США	124	24,8	458255257	709823079	15829720
Япония	36	7,2	110089811	172019040	7170408
Великобритания	22	4,4	42786556	54800461	1678220
Германия	21	4,2	44738135	64922252	1422814
Франция	18	3,6	42315366	64385359	1816720
Нидерланды	9	1,8	11729307	15639552	424800
Южная Корея	7	1,4	22104431	36436396	843300
Ирландия	7	1,4	9059315	12442522	334824
Канада	6	1,2	8163041	13869569	298144
Индия	5	1	9078216	10262899	310344
Италия	5	1	28126950	45240766	758968
Австралия	5	1	6370593	9879683	247736
Саудовская Аравия	4	0,8	10925709	14775718	366900
Польша	4	0,8	4604365	6216160	153128
Россия	4	0,8	5335750	9208368	200880
Швейцария	3	0,6	21716281	27674706	472224
Швеция	3	0,6	3599656	4613320	119744
Испания	2	0,4	7488800	11781642	172656
Сингапур	2	0,4	1834555	2345779	59712
Новая Зеландия	1	0,2	908892	1425408	18560
Норвегия	1	0,2	953571	1081651	32192
Южная Африка	1	0,2	1029320	1366810	32856
Бразилия	1	0,2	1123150	1413120	38400
Финляндия	1	0,2	1250000	1689293	40608
Тайвань	1	0,2	1325150	2088960	27200
Чехия	1	0,2	1457730	2011641	76896

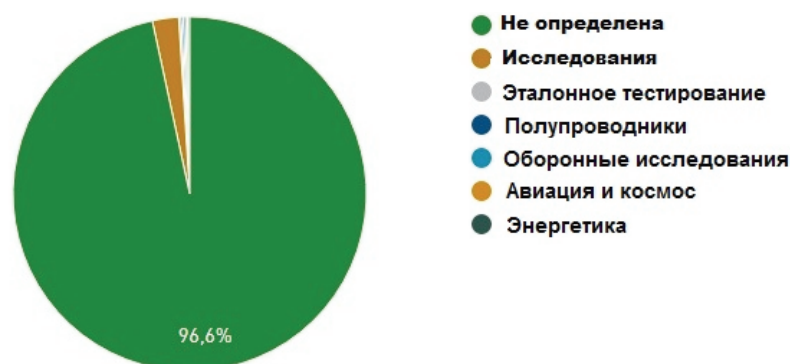


Рис. 3. Диаграмма областей применения суперкомпьютеров

Таблица 2

Область применения суперкомпьютеров

Область применения	Общее количество, шт	Доля, %	Rmax (GFlops)	Rpeak (GFlops)	Количество процессорных ядер
Не определена	483	96,6	1082320079	1750109894	45218714
Исследования и разработки	12	2,4	117600436	157618909	12319252
Эталонное тестирование	1	0,2	1587000	1931625	62944
Полупроводники	1	0,2	1462970	2507264	45680
Оборонные исследования	1	0,2	1050000	1254550	138368
Авиация и космос	1	0,2	5951550	7107149	241108
Энергетика	1	0,2	942829	1135411	29568

В то же время область применения подавляющей доли суперкомпьютеров не определена. Так, несмотря на данные, представленные на диаграмме (рис. 3), зарубежные эксперты отмечают, что, в частности, в Китае суперкомпьютеры используются для экспериментов и разработок оборонного и двойного назначения. В качестве примера приводятся применения суперкомпьютеров для моделирования ядерных взрывов. Данный факт можно объяснить строгой закрытостью китайских ядерных программ, а также необходимостью модернизации своего ядерного потенциала в кратчайшие сроки. Также отметим, что 100% суперкомпьютеров работают на операционной системе Linux.

Согласно докладу Китайской академии инженерной физики (КАИФ), за период с 2014 по 2017 год в КНР было произведено свыше 200 лабораторных экспериментов по моделированию ядерного взрыва. В США, по данным Ливерморской национальной лаборатории, с 2012 по 2017 год проведено не более 50 испытаний в этой области.

В настоящее время Китай реализует в несколько раз больше программ НИОКР по созданию ядерных вооружений, чем США. В КНР осуществляется параллельная разработка трех семейств межконтинентальных баллистических ракет, семейства баллистических ракет для подводных лодок и семейства ракет средней дальности, а также разработка перспективной крылатой ракеты. Суперкомпьютеры позволяют применять методы математического моделирования, не прибегая к испытаниям [4].

Несмотря на существенные усилия Китая, США, пойдя по пути увеличения мощности суперкомпьютеров, а не их числа, в 2018 г., по сути, вновь стали ведущим государством в рассматриваемой области. Так, компанией IBM при участии Nvidia был разработан суперкомпьютер Summit, который оказался намного производительнее китайского Sunway Taihu Light, ранее являвшегося самой мощной системой. Например, пиковая производительность Summit – чуть менее 200 петафлопс, или 200000 трлн операций в секунду. У Sunway Taihu Light максимальная производительность равняется 93 петафлопс. А у третьего мощнейшего суперкомпьютера Tianhe-2A, установленного в Национальном суперкомпьютерном центре в Гуанчжоу (National Super Computer Center in Guangzhou), – 61,44 петафлопс. Тактико-технические характеристики (ТТХ) мощнейших суперкомпьютеров представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные ТТХ передовых суперкомпьютеров в мире

Наименование суперкомпьютера	Tianhe-2A – TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000	Summit – IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband	Sunway Taihu Light – Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway	Sierra – IBM Power System S922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband
Местоположение	Национальный суперкомпьютерный центр в Гуанчжоу (КНР)	DOE/SC/ Национальная лаборатория г. Ок-Ридж (США)	Национальный суперкомпьютерный центр в Уси (КНР)	DOE/NNSA/LLNL (США)
Производитель	NUDT	IBM	NRCPC	IBM
Ядро	4981760	2282544	10649600	1572480
Память, Гб	2277376	2801664	1310720	1382400
Процессор	Intel Xeon E5-2692v2 12C 2,2GHz	IBM POWER9 22C 3,07GHz	Sunway SW26010 260C 1,45GHz	IBM POWER9 22C 3,1GHz
Сеть	TH Express-2	Dual-rail Mellanox EDR Infiniband	Sunway	Dual-rail Mellanox EDR Infiniband
Производительность				
Rmax, TFlop/s	61444,5	122300	93014,6	71610
Rpeak, TFlop/s	100679	187659	125436	119194
Nmax	9773000	13989888	12288000	10321920
Потребляемая мощность				
Мощность, кВт	18482,00	8805,50	15371,00	–
Программное обеспечение				
Операционная система	Kylin Linux	RHEL 7.4	Sunway Raise OS 2.0.5	Red Hat Enterprise Linux
Компилятор	icc	XLC 13.1, nvcc 9.2	–	IBM XLC 13.1.7
Библиотека	Intel MKL-11.0.0	ESSL, CUBLAS 9.2	–	ESSL, CUBLAS 9.2
Интерфейс передачи сообщений	MPICH2 with a customized GLEX channel	Spectrum MPI	–	Spectrum MPI

Суперкомпьютер Summit установлен в Национальной лаборатории города Ок-Ридж (шт. Теннесси, США). Он занимает площадь в 930 км², а на его создание было потрачено около 200 млн долл. Суперкомпьютер способен моделировать ситуации, у которых могут быть триллионы возможных вариантов развития событий. Например, благодаря Summit ученые смогут моделировать ядерные взрывы с еще большими входными параметрами и условиями [5].

Основное направление оборонных приложений для суперкомпьютеров в США – поддержание ядерного арсенала и объектов ядерного оружейного комплекса. Оно реализуется через ряд программ, среди которых:

- программа усиленного контроля (Enhanced Surveillance Program – ESP);
- программа продления жизненного цикла ядерных боеприпасов (Life Extension Program – LEP);
- программа повышения надежности ядерного арсенала (Reliable Replacement Warhead – RRW) за счет замены устаревших ядерных боеприпасов (в настоящий момент приостановлена конгрессом США);
- программа повышения безопасности головных частей МБР (SERV – Safety Enhanced Reentry Vehicle).

Финансирование ряда научно-исследовательских проектов, в которых используются методы высокопроизводительных вычислений, будет способствовать повышению надежности ядерных боеприпасов, их сертификации без проведения натурных испытаний, улучшению учебно-материальной базы ядерного оружейного комплекса, совершенствованию научной и инженерно-технической базы по программе «Сопровождение ядерного арсенала» (работы по модернизации инфраструктуры Лос-Аламосской национальной ядерной лаборатории и инфраструктуры объекта Y-12), а также обеспечению безопасности эксплуатации объектов ядерного оружейного комплекса.

В целом реализация научно-исследовательских проектов является важным направлением ядерной оружейной программы, на которое планируется выделить свыше 1,8 млрд долл. Наиболее крупным из числа проектов программы считается «Перспективное моделирование ядерных боеприпасов и высокопроизводительные вычисления» (620 млн долл.). Данный проект предусматривает разработку технологий сертификации ядерных компонентов, создание средств диагностики газодинамических и подкритических испытаний, а также изучение динамических свойств материалов. Для проведения соответствующих исследований продолжится наращивание вычислительных мощностей ядерных оружейных лабораторий Министерства энергетики США. Их возможности задействуются американскими специалистами для трехмерного моделирования всех стадий срабатывания ядерного боеприпаса (ЯБП).

Не менее важным считается проект «Управляемый термоядерный синтез с инерционным удержанием плазмы» (500 млн долл.), предполагающий проведение моделирования термоядерных реакций [6]. В этих целях в Лос-Аламосской национальной лаборатории (Los Alamos National Laboratory – LANL) вводится в строй высокопроизводительный суперкомпьютер с большим объемом быстродействующей оперативной памяти.

Лос-Аламосская национальная лаборатория установила тестовый суперкомпьютер, созданный на базе кластера из плат 750 Raspberry Pi, который в 2019 г. может быть наращен до 10 тыс. плат. Огромный кластер из ненагреваемых плат Raspberry Pi стал для LANL решением уникальной проблемы, с которой сталкиваются люди, разрабатывающие программное обеспечение (ПО) для эксафлопсных суперкомпьютеров, таких как установленный в LANL гигантский Cray Trinity – один из десяти самых быстрых суперкомпьютеров в мире. У разработчиков мало времени для тестирования своего ПО на таких дорогостоящих системах, поскольку те полностью заняты выполнением многих триллионов вычислительных операций для современных научных исследований.

LANL не сообщила точную стоимость кластера Raspberry Pi, но предполагается, что он существенно дешевле и энергоэффективнее, чем альтернативные решения.

На протяжении последних семи лет LANL использовала для разработки и тестирования программного обеспечения (ПО) устаревшие и выведенные из эксплуатации машины с множеством узлов. Однако они не масштабировались до размеров вычислительной среды Trinity, в которой насчитывается 20 тыс. узлов. Такие ЭВМ были дороги в использовании, требуя водонапорных башен для охлаждения и другого оборудования.

Согласно заявлениям руководителя подразделения высокопроизводительных вычислений LANL Г. Грайдера в СМИ, новый кластер Raspberry Pi способен обеспечить те же возможности тестирования, что и специализированный испытательный стенд, который может стоить 250 млн долл. и потреблять 25 МВт энергии. Покупка 750 плат Raspberry Pi по цене 25 долл. за штуку обошлась менее чем в 19 тыс. долл. Правда, эта цифра не включает в себя фактические затраты на настройку. Грайдер подчеркивает также эффективное расходование энергии. По его оценке, каждая плата в системе на базе Pi, состоящей из нескольких тысяч узлов, будет потреблять 2–3 Вт.

Нынешний кластер с 3 тыс. ядер Pi является пилотным. Фонд Raspberry Pi сообщает, что в следующем году LANL намерена нарастить его до 40 тыс. ядер. Такое увеличение означает, что в кластере будет около 10 тыс. плат Raspberry Pi. Пилотный кластер был создан австралийским разработчиком BitScore, а в роли дистрибьютора выступила американская фирма Sicorp. Он содержит пять монтируемых в стойку модулей Pi Cluster Module, которые состоят из 150 четырехъядерных плат Raspberry Pi с процессорами ARM. Всего 750 процессоров с 3 тыс. ядер.

LANL считает, что Pi-кластер найдет применение не только в разработке ПО для высокопроизводительных вычислений, но также в более точном моделировании крупномасштабных сетей датчиков и в изучении топологии сетей высокопроизводительных вычислений для повышения их производительности [7].

Основные научно-технические проблемы использования суперкомпьютеров

Первая проблема – крайне низкая реальная производительность современных суперкомпьютеров (0,1–5% от пиковой), которую они развивают на многих стратегических задачах. При этом увеличение количества узлов только усугубляет ситуацию, что означает не только катастрофически неэффективное использование оборудования и напрасные затраты энергии, но и невозможность решения важнейших для государства задач.

Вторая проблема – низкая реальная продуктивность программирования суперкомпьютеров.

Третья проблема – ослабление прямого влияния закона Мура на рост производительности процессорных ядер (началось с 2002–2003 года) и ожидание прекращения его действия к 2020 году, если не будут приняты меры. Это означает, что роста производительности микропроцессоров просто за счет улучшения технологий уже не будет, нужны изменения в архитектуре и микроархитектуре. Появление многоядерности – первая реакция такого типа на ослабление действия закона Мура.

Четвертая и пятая проблемы – обеспечение масштабируемости производительности и отказоустойчивости, рост энергопотребления и сложности теплоотвода.

Причина падения реальной производительности заключается в том, что операции даже с внутриузловой памятью выполняются слишком долго, в сотни раз медленнее, чем операции в процессоре. Если же работать через единое адресное пространство с памятью многих узлов, как требуют современные задачи, то добавляются еще тысячи тактов на прохождение коммуникационной сети. Такая диспропорция времен выполнения операций с памятью и в процессоре получила название «стена памяти».

Для ряда задач эта «стена» себя не проявляет – при их решении можно эффективно использовать быструю кэш-память небольшого объема (задачи с хорошей пространственно-временной локализацией, Cache Friendly). Однако приложения, непосредственно связанные с обеспечением национальной безопасности, такой локализацией не обладают – это систе-

мы с интенсивным доступом к данным (DIS). В таких приложениях обращения к одним и тем же участкам памяти редки, а адреса обращений к памяти слабопредсказуемы. Именно на DIS-задачах и происходит падение реальной производительности из-за простоя процессоров при ожидании данных из памяти [8].

Помимо суперкомпьютеров, разработчики передовых образцов вооружения, военной и специальной техники, использующие технологии высокопроизводительных вычислений, проявляют интерес к квантовым методам обработки информации. В настоящее время широко обсуждаются квантовые вычислительные средства нового поколения, основанные на методах обработки информации с использованием отдельных фотонов как оптического, так и микроволнового диапазонов. Квантовые вычисления представляют собой одну из наиболее бурно развивающихся и перспективных областей. Скорость вычислений и обработки данных вычислительных систем на основе квантовых технологий определяют основные военные приложения квантовых компьютеров:

- быстрое дешифрование сообщений в закрытых каналах передачи «чувствительной» информации;
- решение задач прогнозирования поведения сложных автономных и человеко-машинных систем;
- усовершенствование работы военных роботизированных систем в боевых условиях;
- разработка новых материалов и конструкций для военных приложений.

К настоящему времени экспериментально реализованы различные кубиты и системы кубитов, удовлетворяющие большинству критериев Дивинченцо. Таким образом, существует разнообразие подходов к созданию квантового компьютера. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Среди этих подходов к реализации квантового компьютера так называемые сверхпроводящие кубиты общепризнанно являются наиболее перспективной и быстро развивающейся элементной базой. Эти кубиты представляют собой идеальную платформу для создания квантовых симуляторов. Во-первых, они масштабируемы, во-вторых, связь между ними контролируема. Так, единственный реализованный к настоящему моменту коммерческий квантовый симулятор, поставляемый канадской фирмой D-Wave Systems, использует именно сверхпроводящие кубиты [9].

Продукты D-Wave Systems приобретаются компаниями Google, Lockheed Martin, Национальным аэрокосмическим агентством (НАСА) (National Aeronautics and Space Administration – NASA), а также Лос-Аламосской национальной лабораторией США. Так, компания Google сообщила в конце 2015 года о выполнении ими алгоритма квантового отжига на квантовом симуляторе D-Wave Systems. По утверждению Google, для выбранной ими специально подобранной задачи выигрыш по эффективности расчета в сравнении с классическим алгоритмом неквантового отжига составил 10^8 раз [10].

В 2015 г. компанией D-Wave Systems был анонсирован процессор D-Wave 2, состоящий из более 1000 кубитов. В отличие от направления, избранного D-Wave Systems, текущие разработки компаний Google и IBM нацелены на построение универсальных квантовых процессоров и необходимых для их работы схем коррекции ошибок, без которых проблематично масштабирование этих устройств. К началу 2016 года максимальное число используемых кубитов в работающих прототипах устройств составило 9 и 4 кубита у Google и IBM соответственно [11]. Компания Microsoft финансирует исследования по квантовым вычислениям, направленные на решение задачи искусственного фотосинтеза.

Квантовые технологии

В Китае также уделяется серьезное внимание развитию квантовых компьютеров. Так, в частности, разработчики Китайского научно-технологического университета (г. Шанхай) разработали новый прототип квантовой вычислительной машины. Специалисты КНР работают над созданием квантового компьютера, превосходящего по скорости вычисления современные аналоги.

Процессоры D-Wave Systems представляют собой адиабатические квантовые симуляторы на сверхпроводящих кубитах, работающие по методу так называемого квантового отжига [12]. Этот метод позволяет «соединять» состояния с локальными минимумами энергии за счет квантового туннелирования между ними и тем самым находить искомое состояние с минимальной энергией всей системы. Следует отметить, что до настоящего времени в научном сообществе идут споры о «квантовости» и эффективности работы устройств, производимых компанией D-Wave Systems [13, 14]. Можно ожидать, что в ближайшие 3–5 лет на рынке появятся специализированные квантовые симуляторы новых типов, в частности для расчета новых материалов и решения квантовохимических задач.

Практическая реализация устройств, называемых универсальными квантовыми компьютерами, связана с использованием универсального набора квантовых операций (гейтов). Такие устройства позволяют реализовать широкий спектр квантовых алгоритмов. Однако они должны содержать не менее нескольких тысяч одинаковых кубитов с достаточно большими временами когерентности, а также большое количество управляющих низкочастотных и СВЧ-линий, линий считывания и управляющей электроники. Решение этих проблем может потребовать 10–15 лет интенсивной работы. К настоящему моменту лидирующие мировые научные группы и компании, разрабатывающие сверхпроводящие кубитные схемы, смогли реализовывать и контролировать квантовые логические устройства универсального типа, содержащие до десятка кубитов.

В целях разработки образцов вооружения, военной и специальной техники нового поколения на основе эффектов квантовой электроники для Сухопутных войск США был создан Центр квантовых исследований, основной задачей которого в настоящее время является решение проблемы повышения пропускной способности информационных сетей. Через этот центр осуществляется финансирование научно-исследовательских консорциумов, состоящих из ведущих университетов, НИИ, промышленных предприятий и отдельных исследователей, с целью изучения критических технологий в области квантовой информатики (Quantum Information Science – QIS).

Основные усилия при этом сосредоточены на создании первой в своем роде многоузловой распределенной квантовой сети (Multisite distributed quantum network) на основе систем квантовой памяти.

Научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы в данной области проводятся специально созданным Центром распределенной квантовой информации (Center for Distributed Quantum Information – CDQI). Основной целью работ является создание надежной квантовой информационной сети, обеспечивающей безопасную и защищенную передачу больших массивов информации в интересах Вооруженных Сил (ВС) США. Кроме этого, в целях скорейшего создания необходимого научно-технического задела и получения практических результатов в области квантовой информатики CDQI предполагает сформировать единую многопрофильную исследовательскую группу.

Также в рамках ряда научно-исследовательских программ ВС США применительно к целям квантовой электроники разрабатываются материалы с улучшенными характеристиками, новые технологии обработки материалов и необходимая контрольно-измерительная аппаратура.

Прикладные исследования направлены на создание новых технологий квантовых материалов, которые должны обеспечить:

– создание оптико-электронных (ОЭ) систем, устройств, приборов и элементов авиационного высокоточного оружия летательного аппарата (ЛА) в целом, включая детекторы инфракрасного излучения, сверхвысокочастотных устройств (СВЧ) устройств, систем радиоэлектронного противодействия и радиоэлектронной борьбы, систем целеуказания и активной защиты ЛА;

– создание ОЭ систем для увеличения производительности бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) ЛА, возможностей по скоростному поиску и обнаружению воздушных и наземных целей, повышение информированности экипажей ЛА об обстановке, увеличение рабочих диапазонов частот и чувствительности БРЭО, расширение динамического диапазона и диапазона рабочих температур устройств и систем, защита БРЭО от воздействия электромагнитного импульса, СВЧ-излучения и ударов молний;

– защиту экипажей, датчиков и систем ЛА от оружия направленной энергии (лазерного и СВЧ излучения большой мощности).

Выводы

Несмотря на огромную пользу, которую приносят и будут приносить в будущем супер-ЭВМ, для большинства стран в отношении уровня развития техники и технологий данные технические средства являются избыточными как в гражданском, так и в военном деле. Избыточность характеризуется узостью сфер применения на современном уровне развития и возможностью решения подавляющего большинства задач с помощью простой и достаточно дешевой (в сравнении с суперкомпьютерами) вычислительной техники.

Согласно опыту разработки и применения суперкомпьютеров в США (распоряжение Президента США от 29 июля 2015 г.), ответственность за их использование и развитие разделена следующим образом: GP- и частично CO-суперкомпьютеры – это гражданский сектор научно-технических расчетов под управлением Министерства энергетики США; RM-, СВ- и частично CO-суперкомпьютеры – зона ответственности военных и разведывательных организаций США, подведомственных Министерству обороны США (Department of Defense – DoD) и Управлению перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA), приложения для которых (криптоанализ, Большие данные, целеуказание, сетевые методы управления и т.д.) требуют практически неограниченной памяти и быстродействия, что означает постоянный поиск прорывных технологий, особенно сегодня, в условиях достижения пределов возможностей кремниевых технологий.

Общими компонентами для всех классов суперкомпьютеров являются память и коммуникационные сети. Лидерами в области создания модулей памяти сегодня могут служить изделия компаний Micron и Samsung. Одна из главных задач здесь – обеспечить за счет высокой пропускной способности эффективную поддержку работы с физически распределенной по узлам памятью объемом до экзабайта, задержки обращения к которой имеют длительность от 100 до 100 тыс. тактов процессора. Особенно это важно для суперкомпьютеров СВ-типа.

Чтобы приблизиться к мировому уровню, в России необходимо освоить разработку кристаллов памяти DDR и NVRAM, 3D-модулей HBM-памяти (память с высокой пропускной способностью) со слоями в виде кристаллов памяти и логических кристаллов с блоками ввода-вывода и контроллерами. Соединения слоев в таких модулях осуществляются из внутренних точек кристаллов (TSV-соединения), что наряду с широким каналом подключения таких модулей к процессорам обеспечивает высокую пропускную способность и резкое снижение энергетических затрат. Дальнейшие работы по замене электрических TSV-соединений на нанофотонные значительно снизят энергетические затраты, что за рубежом в DARPA было достигнуто два года назад в лабораторных образцах по проекту РОЕМ. Большие перспективы сулит введение процессоров обработки данных (PIM) в логических слоях 3D-модулей памяти – заметный вклад в производительность вычислительных узлов от этих процессоров ожидается в 2023 году (на уровне 10%) и вплоть до 2030 г. Важна роль этих процессоров – в разделении работ с памятью, поскольку на них можно возложить выполнение нерегулярных интенсивных обращений «на лету». Такие работы ведутся, например, в компании Micron.

Разработка 3D-модулей HBM-памяти инициировала усовершенствование конструктивов плат: рассматриваются варианты 4D- и 5D-сборок, когда множество различных функцио-

нальных модулей собираются на единой керамической подложке – интерпозере. Этот вариант уже использован в GPU Volta и MCP Knights Landing, но наиболее впечатляющие результаты достигнуты в узлах суперкомпьютера NEC Next SX-ACE. Соединения между платами с подложками-интерпозерами в перспективе предполагается реализовать через специальные кристаллы с матрицами микролазеров и матрицами микролинз и светодиодов.

Статья выполнена в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по результатам работ в рамках Государственного задания по проекту № 2.12622.2018/12.1.

Список литературы

1. Эйсымонт Л. Гибридная стратегия развития элементной базы. Открытые системы. 29.05.2017. URL: <https://www.osp.ru/os/2017/02/13052216>.
2. URL: <https://www.top500.org/statistics/list>.
3. URL: <https://www.top500.org>.
4. Скосырев В. Китай испытывает ядерное оружие нового поколения. Независимая газета. 29.05.2018. URL: http://www.ng.ru/world/2018-05-29/1_7234_china.html.
5. Грудцын И. Суперкомпьютер Summit: подробности о будущем лидере рейтинга TOP500. 22.11.2017. URL: <https://servernews.ru/961817>.
6. Вильданов М., Кузнецов А. Состояние, проблемы и основные направления развития ядерного арсенала США. Зарубежное военное обозрение. 2016. № 4. С. 11–16.
7. Танг Л. Лос-Аламос соберет суперкомпьютер из 10 тысяч Raspberry Pi, IT-Week. 30.11.2017. URL: <https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=198860¶m=rss>.
8. Эйсымонт Л., Забеднов П., Зотов П. Модернизация и стратегические ИТ. Открытые системы. 27.04.2010. URL: <https://www.osp.ru/os/2010/03/13001873/#2>.
9. Heim B., Ronnow T.F., Isakov D.V. and Troyer M. Quantum versus Classical Annealing of Using Spin Glasses. Cornell University Library, Science 348, 215 (2015).
10. Kelly J., et al. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. Nature 519, 66–69 (2015).
11. Corcoles A.D., et al. Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits. Nature Commun. 6, 6979 (2015).
12. Shin S.W., Smith G., Smolin J.A. and Vazirani U. How «Quantum» is the D-Wave Machine, Cornell University Library, ArXiv: 1401.7087.
13. Ronnow T.F., Wang Zh., Job J., Boixo S., Isakov S.V., Wecker D., Martinis J.M., Lidar D.A. and Troyer M. Defining and detecting quantum speedup, Science Express 10.1126 (2014).
14. Denchev V.S. et al. What is the Computational Value of Finite Range Tunneling, Cornell University Library, arXiv:1512.02206.

References

1. Eisymont L. (2017) *Gibridnaya strategiya razvitiya elementnoy bazy* [Hybrid Strategy for the Development of the Element Base] *Otkrytye sistemy* [Open Systems] 05/29/2017. Available at: <https://www.osp.ru/os/2017/02/13052216>.
2. Available at: <https://www.top500.org/statistics/list>.
3. Available at: <https://www.top500.org>.
4. Skosyrev V. (2018) *Kitay ispytyvaet yadernoe oruzhie novogo pokoleniya* [China is testing a new generation of nuclear weapons] *Nezavisimaya gazeta* [Nezavisimaya Gazeta] 05/29/2018. Available at: http://www.ng.ru/world/2018-05-29/1_7234_china.html.
5. Grudtsyn I. (2017) *Superkomp'yuter Summit: podrobnosti o budushchem lidere reytinga TOP500* [Supercomputer Summit: Details about the future leader of the TOP500 rating] 11/22/2017. Available at: <https://servernews.ru/961817>.

6. Vildanov M., Kuznetsov A. (2016) *Sostoyanie, problemy i osnovnye napravleniya razvitiya yadernogo arsenala SShA* [State, problems and main directions of development of the US nuclear arsenal] *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review]. No. 4. Pp. 11–16.
7. Tang L. (2017) *Los-Alamos soberet superkomp'yuter iz 10 tysyach* [Los Alamos will assemble a supercomputer from 10 thousand] *Raspberry Pi, IT-Week*, 11/30/2017. Available at: <https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=198860¶m=rss>.
8. Eisymont L., Zabednov P., Zotov P. (2010) *Modernizatsiya i strategicheskie IT* [Modernization and strategic IT] *Otkrytye sistemy* [Open systems] 04/27/2010. Available at: <https://www.osp.ru/os/2010/03/13001873/#2>.
9. Heim B., Ronnow T.F., Isakov D.V., Troyer M. (2015) Quantum versus Classical Annealing of Spin Glasses. *Cornell University Library, Science* 348, 215.
10. Kelly J., et al (2015) State preservation of the superconducting quantum circuit. *Nature* 519. Pp. 66–69.
11. Corcoles A.D., et al. (2015) Demonstration of a superconducting qubits. *Nature Commun.* 6, 6979.
12. Shin S.W., Smith G., Smolin J.A., Vazirani U. How «Quantum» is the D-Wave Machine, *Cornell University Library, ArXiv*: 1401.7087.
13. Ronnow T.F., Wang Zh., Job J., Boixo S., Isakov S.V., Wecker D., Martinis J.M., Lidar D.A., Troyer M. (2014) Defining and detecting quantum speedup. *Science Express* 10.1126.
14. Denchev V.S., et al. *Cornell University Library, arXiv*: 1512.02206.