

# Использование вычислительной способности как характеристики для оценки и сравнения суперкомпьютеров

А. А. Ракитский<sup>1</sup>

В этой статье рассматривается применение метода теоретического определения вычислительной способности для оценки и сравнения между собой суперкомпьютеров и кластерных систем. В работе приводится подробное описание особенностей применения методики к оценке производительности суперкомпьютеров, а также полученные результаты сравниваются с результатами общепризнанных бенчмарков.

*Ключевые слова:* вычислительная способность, производительность, суперкомпьютеры, кластерные системы.

## 1. Введение

Каждый день в нашем мире появляется всё больше и больше различных задач, для решения которых настольных компьютеров оказывается недостаточно. Это и построение различных физических моделей, и сетевые задачи, которые возникают перед компаниями, обслуживающими сотни тысяч пользователей. Для решения подобных задач служат суперкомпьютеры. Под суперкомпьютером мы будем понимать вычислительные системы, чья производительность существенно превышает производительность обычного настольного компьютера. Такие системы распространяются повсеместно. Для решения своих задач их собирают различные компании, университеты и госучреждения. Поэтому перед всеми компаниями, которые используют подобные суперкомпьютеры, остро стоит вопрос оценки производительности устанавливаемых систем. Естественно, что каждый хочет получить как можно большую производительность при наименьших затратах. Однако необходимо заметить, что большинство суперкомпьютеров уникальны и собираются индивидуально для конкретного заказчика. Поэтому оценить производительности этих систем на основе имеющихся аналогов сложно, а большинство существующих оценок базируются именно на экспериментально полученных данных. В данной статье предложена методика теоретической оценки производительности вычислительных систем подобного вида. Эта оценка базируется на подходе, предложенном Рябко Б.Я. в [1]. В статье мы рассмотрим существующие методики оценки производительности и сравним их с предложенным здесь методом теоретической оценки.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках гранта по госконтракту № 8229 от 6 августа 2012 года.

## 2. Основные определения и понятия

Суперкомпьютер – вычислительная система, которая обеспечивает производительность, многократно превосходящую производительность обычных настольных компьютеров.

Основные виды архитектур суперкомпьютеров:

- SMP (symmetric multiprocessing) – многопроцессорная система с общей физической памятью. Процессоры взаимодействуют друг с другом через общую память, что существенно упрощает написание программного обеспечения для подобных систем. Однако пропускная способность шины соединения процессоров с памятью накладывает существенные ограничения на количество процессоров в данной системе.
- MPP (massive parallel processing) – архитектура с отдельной памятью. Это означает, что каждый процессор в данной системе имеет свою собственную память. Данная архитектура позволяет масштабировать систему до огромных размеров и добавлять очень большое количество процессоров, однако существенным недостатком является низкая скорость взаимодействия процессоров друг с другом, а также сложность написания программного обеспечения.
- Смешанная архитектура – самая распространённая архитектура в современном мире. Её распространение обусловлено простотой проектирования и сборки подобных систем. Суть заключается в том, что вычислительные узлы, каждый из которых является полноценным суперкомпьютером с архитектурой SMP, объединяют в одну общую систему с помощью архитектуры MPP.

Производительностью суперкомпьютера называют, как правило, величину, которая характеризует его способность решать те или иные задачи. Эта же величина позволяет сравнивать суперкомпьютеры между собой и с обычными компьютерами, определять пригодность для решения тех или иных задач и находить слабые места в архитектуре.

Вычислительная способность – мера, характеризующая количество различных задач, которые компьютер способен выполнить в течение определённого интервала времени. Данная характеристика для оценки производительности предложена и описана в работе [1] и более подробно рассмотрена на примере конкретных процессоров в работах [2] и [3].

## 3. Обзор существующих методик оценки производительности

Существует множество проектов, в рамках которых производится оценка и сравнение производительности самых мощных суперкомпьютеров современности. Рассмотрим два основных из этих проектов: TOP 500 (<http://top500.org/>) и HPC Challenge (<http://icl.cs.utk.edu/hpcc/>). TOP 500 каждые полгода выкладывают список 500 самых быстрых и производительных суперкомпьютеров по их версии. Для оценки производительности этих компьютеров используются ровно две характеристики. Первая – это теоретический максимум производительности, который может быть у данного суперкомпьютера. На самом деле, эта оценка не объективна и не учитывает множества факторов, влияющих на производительность. Эта характеристика вычисляется по следующей формуле:

$$P_{\text{суперкомпьютера в GFlops}} = P_{\text{узла}} \times N_{\text{узлов}},$$

где  $P$  – производительность,  $N$  – количество.

$$P_{\text{узла}} = F_{\text{CPU}} \times N_{\text{CPU cores}} \times V_{\text{CPU}} \times N_{\text{CPU в узле}},$$

где  $F_{\text{CPU}}$  – тактовая частота процессора в ГГц,  $N_{\text{CPU cores}}$  – количество ядер в процессоре,  $V_{\text{CPU}}$  – количество инструкций, которое выполняет процессор за один такт,  $N_{\text{CPU в узле}}$  – количество процессоров в узле. Данная характеристика совершенно не учитывает объёмы оперативной и кэш-памяти, а также межпроцессорное взаимодействие, плюс ко всему

характеристика  $V_{CPU}$  не является объективной и точной, т.к. разные инструкции имеют разное время выполнения.

Вторая характеристика, представленная в TOP 500, является одним из самых популярных бенчмарков для сравнения вычислительных систем. LINPACK – это бенчмарк, который определяет время, необходимое компьютеру для решения системы линейных уравнений  $Ax = B$ , что является очень распространённой задачей на практике. Производительность суперкомпьютера – весьма сложная величина и зависит от многих факторов. Выполнение этого бенчмарка состоит в основном из операций сложения и умножения, что делает оценку производительности гораздо менее объективной. Подробнее этот бенчмарк описан в [4].

Другой проект – HPCC сравнивает и оценивает суперкомпьютеры по гораздо большему количеству бенчмарков, однако является более субъективным как в силу того, что бенчмарки запускает сам владелец суперкомпьютера, так и того, что вносит все данные, что может обернуться в ошибки и недочёты из-за большого влияния человеческого фактора. Данные проходят проверку, однако теоретический максимум, например, предоставляется исключительно производителем и проверке не подлежит. Рассмотрим бенчмарки, на которых тестируются все системы:

- 1) HPL – это программный продукт, который решает случайно сгенерированную плотную систему линейных уравнений с двойной точностью (64 бита). Это некоторый аналог бенчмарка LINPACK. Подробное описание можно найти в [5].
- 2) DGEMM – основывается на вычислении произведения двух матриц. Однако, суть этого бенчмарка в том, чтобы оценить среднюю производительность отдельных процессоров, из которых состоит кластер. Этот бенчмарк не распараллеливает вычисления на все процессоры и/или ядра, а запускает на каждом процессоре одну и ту же задачу, после чего в качестве результата берётся среднее время решения задачи каждым из процессоров. Данный бенчмарк не оценивает производительности всей системы в целом, поэтому при сравнении с нашим методом учитываться не будет.
- 3) STREAM – простой комплекс программ, который позволяет оценить пропускную способность доступной суперкомпьютеру памяти. По большей части он необходим для оценки скорости работы с памятью и более детального описания системы.
- 4) PTRANS – бенчмарк для оценки скорости и качества взаимодействия между разными процессорами внутри кластера. Является хорошей оценкой пропускной способности коммуникационной сети.
- 5) RandomAccess – измеряет время изменения случайной ячейки памяти.
- 6) FFT – этот бенчмарк измеряет время выполнения дискретного преобразования Фурье с двойной точностью (64 бита). Данная характеристика оценивает работу всей системы целиком, а не отдельных её участков, поэтому является весьма интересной для нашей работы.
- 7) Communication bandwidth and latency – набор программ, которые оценивают задержку и пропускную способность коммуникационной сети при рассмотрении различных её топологий.

Также помимо бенчмарков для каждого суперкомпьютера приводится информация о теоретически максимальной производительности, которая вычисляется по приведённой выше формуле, но в данном проекте предоставляется производителем/владельцем и не проверяется на корректность.

Представленная в этой статье характеристика для теоретической оценки вычислительной способности суперкомпьютеров описывает производительность всей системы целиком, поэтому из проекта HPCC мы будем рассматривать только те величины, которые характеризуют также всю систему, а не отдельные её компоненты. Такими характеристиками являются HPL, FFT и теоретический максимум.

#### 4. Вычислительная способность суперкомпьютеров

Определение вычислительной способности суперкомпьютеров базируется на определении вычислительных способностей узлов и процессоров, из которых они состоят, а также на учёте возможности взаимодействия между собой. Определять вычислительную способность обычных процессоров (в том числе и многоядерных) мы уже научились, и этот процесс подробно описан в [1], [2], [3]. В нашем случае необходимо рассмотреть структуру узла суперкомпьютера. Как правило, узлом в суперкомпьютере является блок из нескольких процессоров, имеющих общую память, возможно, графический процессор, а также сетевой коммутатор, с помощью которого осуществляется межузловое взаимодействие.

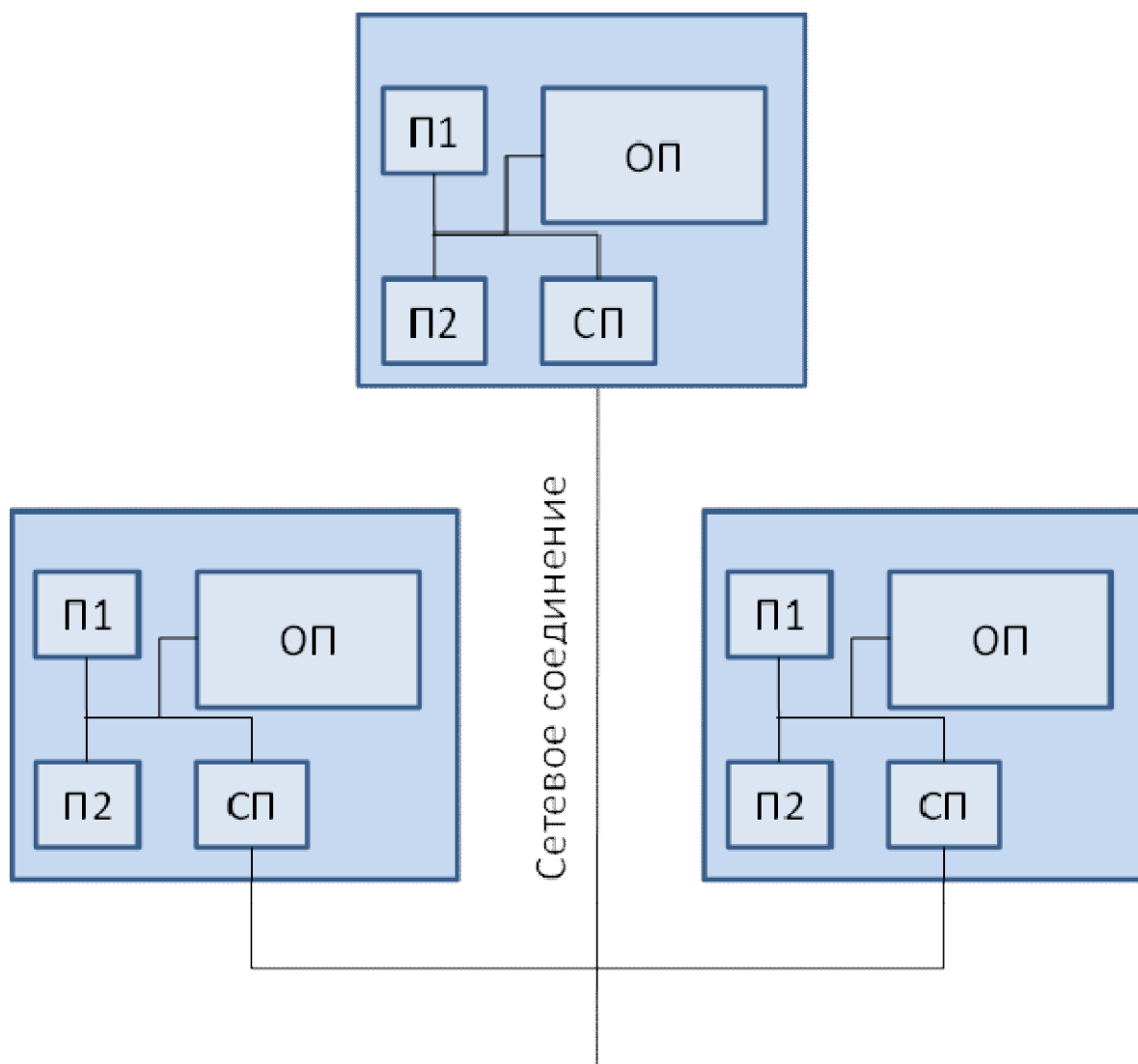


Рис. 1. Схематичное изображение суперкомпьютера

На рис.1 представлено схематичное изображение смешанной вычислительной системы, что, по сути, является обобщающей схемой большинства суперкомпьютеров. На данном рисунке П1 – это первый процессор узла, П2 – второй процессор, СП – сетевой процессор узла и ОП – оперативная память узла. Таким образом, на рис. 1 представлена схема суперкомпьютера, у которого каждый узел имеет два процессора, некий объем общей оперативной памяти и устройство, которое мы называем сетевым процессором. Сетевым процессором мы называем интерфейс сетевого взаимодействия между процессорами, находящимися в разных узлах. Это необходимо для корректного учета межузлового взаимодействия при оценке вычислительной способности суперкомпьютера.

Научимся сначала определять вычислительную способность узла. Для этого определим вычислительную способность всех процессоров, входящих в состав узла, считая, что оперативная память – это оперативная память каждого процессора. Так как определять вычислительную способность обычного процессора мы уже умеем, то это не составит труда. Рассмотрим вычислительную способность узла из примера в рис. 1. Пусть  $C_1$  – вычислительная способность первого процессора,  $C_2$  – вычислительная способность второго процессора,  $C_{СП}$  – вычислительная способность сетевого процессора.

$$C_y = C_1 + C_2 + C_{СП}, \quad (1.1)$$

где  $C_y$  – вычислительная способность всего узла. Объяснение и доказательство этой формулы для многопроцессорных систем представлено в [1]. После этого определить вычислительную способность самого суперкомпьютера можно легко по формуле:

$$C_{СК} = C_y \times N_y, \quad (1.2)$$

где  $C_{СК}$  – вычислительная способность суперкомпьютера,  $C_y$  – вычислительная способность узла суперкомпьютера,  $N_y$  – количество узлов суперкомпьютера. Естественно, эта формула весьма упрощена и даёт только верхнюю границу оценки вычислительной способности суперкомпьютера, которая будет верной при идеальном распараллеливании. Основное различие между этим способом и теоретической оценкой производительности суперкомпьютеров, описанной выше, заключается в способе определения производительности узла. В нашем методе учитывается и объём памяти, и время доступа к ней, и скорость передачи данных, и обращения как к оперативной памяти, так и к памяти других процессоров (что определяется протоколом передачи данных между узлами).

Представленная формула для оценки вычислительной способности описывает упрощённую схему суперкомпьютера, у которого все узлы одинаковы. В более общем случае, когда все узлы различны, можно применить следующую формулу:

$$C_{СК} = \sum_{i=1}^{N_y} C_{y_i}, \quad (1.3)$$

где  $U_i$  –  $i$ -й узел суперкомпьютера.

#### 4.1. Вычислительная способность сетевого процессора

Возникновение сетевого процессора в нашей схеме обусловлено необходимостью описать и каким-то образом учесть все сетевые и межузловые взаимодействия. Скорость передачи данных в сети зависит напрямую от сетевого оборудования, способа соединения и протокола, по которому происходит обмен данными. Сетевое соединение может строиться как на массовых сетевых технологиях (например, Fast Ethernet), так и на основе специализированных высокоскоростных шин передачи данных (Infiniband, SCI, Myrinet, CLAN, Server-Net). Второй случай применяется, если от кластера требуется большая производительность при обмене данными между процессорами из разных узлов. Выделим основные характеристики этих соединений, интересующие нас в разрезе определения вычислительной способности сетевого процессора. Первая и одна из наиболее важных характеристик – это так называемая латентность. Эта величина характеризует длительность задержки, которая возникает при формировании пакета данных, отправляемого в сеть. Следующая важная характеристика – это скорость передачи данных. Зная эту характеристику и размер передаваемого пакета данных, мы легко сможем определить, сколько потребуется времени для передачи данных от одного узла к другому. Отсюда следует и третья важная характеристика – максимальный и минимальный размеры пакетов передаваемых данных.

Рассмотрев основные характеристики сетевых решений, мы можем описать подробнее наш виртуальный сетевой процессор, а точнее – список его инструкций. Будем считать, что сетевой процессор состоит только из инструкций приёма и передачи пакетов данных. Тогда все инструкции, у которых отличается размер пакета данных, будут представлены как различные и независимые друг от друга. Размеры будем рассматривать только кратные одному байту.

## 4.2. Пример определения вычислительной способности сетевого процессора

Рассмотрим один из наиболее простых вариантов, чтобы понять принцип построения списка инструкций и нахождения вычислительной способности сетевого процессора. Допустим, у нас есть кластер, состоящий из 10 одинаковых узлов, в каждом из которых находятся 2 процессора и 2 Гб общей оперативной памяти, а все эти узлы соединены между собой по технологии Gigabit Ethernet.

Минимальный размер пакета данных в сети Gigabit Ethernet составляет 512 байт, максимальный – 1518 байт. Рассмотрим команду передачи пакета данных минимального размера (512 байт). Латентность при создании пакета данных в данной сети составляет 170 мкс, скорость передачи данных – 10 Мбайт/с. Время передачи данных в микросекундах определим по формуле:

$$T_{\text{пд}} = \left( \frac{S_{\text{пакета}}}{V_{\text{передачи}}} \right) \times 10^6,$$

где  $T_{\text{пд}}$  – время передачи данных от одного узла к другому в микросекундах,  $S_{\text{пакета}}$  – размер пакета передаваемых данных,  $V_{\text{передачи}}$  – скорость передачи данных (мегабайт в секунду).

Помимо этого, команда запроса данных может обратиться к любой области оперативной памяти любого из узлов (кроме запрашивающего), а так как мы все инструкции, имеющие различные аргументы, считаем различными, то необходимо определить количество инструкций, запрашивающих тот или иной участок памяти заданного размера. Также необходимо учесть, что размер запрашиваемых данных не может превышать размер, отведённый под передаваемую информацию в пакете данных. Количество различных участков памяти заданного размера, к которым возможно обратиться, будем задавать по формуле:

$$N_{\text{уп}} = (N_{\text{узлов}} - 1) \times (S_{\text{опу}} - S_{\text{данных}}),$$

где  $N_{\text{уп}}$  – количество участков памяти, к которым мы можем обратиться,  $N_{\text{узлов}}$  – количество узлов в кластере,  $S_{\text{опу}}$  – размер оперативной памяти узла в байтах,  $S_{\text{данных}}$  – размер запрашиваемых данных в байтах. В случае нашего примера мы описываем команду, которая запрашивает минимальный размер данных в 46 байт, пакет при этом все равно будет минимально возможного размера 512 байт, тогда  $N_{\text{уп}} = 19327352418$ ,  $T_{\text{пд}} = 48$  мкс, а с учётом латентности создания пакета,  $T = 48 + 170 = 218$  мкс. Следовательно, если рассматривать данную инструкцию в разрезе уравнения, которое необходимо решить для нахождения вычислительной способности сетевого процессора, то у нас будет 19327352418 слагаемых со временем выполнения 218 мкс. Аналогичным образом мы сформируем все остальные инструкции и составим тем самым уравнение. Решив данное уравнение, получим  $C_{\text{СП}} \approx 0.1863$  Мбит/с.

## 5. Определение вычислительной способности суперкомпьютера на примере ASCI Red

ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) – это объединение нескольких лабораторий, включающее в себя Sandia, Los Alamos и Lawrence Livermore National Laboratories. Это объединение спонсируется Департаментом энергетики Соединённых Штатов Америки. Грубо говоря, задача ASCI заключалась в том, чтобы создать первую вычислительную систему, чья производительность превысит 1 TFLOPS. Первый вариант ASCI Red был собран в марте 1997 года. Он состоял из 3536 вычислительных узлов. Каждый вычислительный узел содержал в себе два процессора Intel Pentium Pro 200 MHz и 128 Мбайт оперативной памяти. Сеть для межпроцессорного взаимодействия имела структуру двунаправленной двухмерной ячеистой топологии. Соединение осуществлялось с помощью шин, имеющих пропускную способность 800 Мбайт в секунду. Такая конфигурация суперкомпьютера даёт производительность по теоретической оценке 1400 TFLOPS. После этого суперкомпьютер был доработан и количество вычислительных узлов подняли до 4536, что повысило производительность до 1800 TFLOPS.

В 1999 году суперкомпьютер был доведён до своего финального состояния, в котором каждый процессор был заменён на Intel Pentium II Xeon 333 МГц, и пиковая теоретическая производительность составила 3200 TFLOPS. Именно для этой финальной модели мы и посчитаем вычислительную способность. Начать необходимо с определения вычислительной способности узла суперкомпьютера. Мы знаем, что узел содержит 128 Мбайт общей оперативной памяти и два процессора Pentium II Xeon с тактовой частотой 333 МГц.

Как определять вычислительную способность процессоров Intel Pentium II, описано подробно в [2]. Составив уравнение и решив его для данного процессора, мы получим  $C_{PII} \approx 12551.225$  Мбит/с. Все файлы с данными для уравнений можно найти в [6]. Так как процессоры у нас одинаковые и объём оперативной памяти у них у всех одинаковый, то эта величина будет одинаковой для всех процессоров. Теперь, чтобы посчитать вычислительную способность узла, нам не хватает только вычислительной способности сетевого процессора. Составив уравнение на основе данных, описанных выше и в [7], мы решим его и получим в результате  $C_{СП} \approx 2.291$  Мбит/с.

Таким образом, подставив полученные данные в формулу (1.1), мы получим  $C_y \approx 25104.74$  Мбит/с. Количество узлов  $N_y = 4536$ , и подставив эти данные в формулу (1.2), получим  $C_{СК} \approx 113,875$  Тбит/с.

Очевидно, что одного суперкомпьютера недостаточно, чтобы показать состоятельность или несостоятельность представленной методики оценки производительности. Поэтому далее будут представлены результаты расчётов для множества других суперкомпьютеров с подробным их анализом и сравнением с результатами общепризнанных бенчмарков.

## 6. Анализ полученных результатов

Для начала рассмотрим список суперкомпьютеров, которые были выбраны для тестирования представленной характеристики и сравнения со списком TOP500:

- 1) ASCII RED [8] (на базе процессоров Intel Pentium II Xeon, 333 МГц) – финальная версия этого суперкомпьютера продержалась в списке 500 самых быстрых суперкомпьютеров с 1999 до 2005 года, поэтому заслуживает как отдельного рассмотрения, так и включения её в анализируемый список.
- 2) Netfinity Cluster [9] (на базе процессоров Intel Pentium III, 1 ГГц) – разработчиком кластера является компания IBM. Это был относительно небольшой кластер, который теоретически должен был выдавать производительность в 1 TFLOPS, однако на практике был немного слабее.
- 3) Intel Endeavor Cluster [10] (на базе процессоров Intel Xeon dual core, 3 ГГц) – разработчик Intel, данный суперкомпьютер уже существенно быстрее предыдущих моделей, однако последний раз встретился в списке 2007 года, после чего вылетел оттуда из-за появления большого количества более мощных систем. Впрочем, суперкомпьютеры подобного типа из списка не исчезли, и там появилась модель с чуть более новым процессором и большим количеством вычислительных ядер.
- 4) Intel Endeavor Cluster [11] (на базе процессоров Intel Xeon E54xx, 2.8 ГГц) – разработчик, как и у предыдущей модели, Intel. Данный суперкомпьютер является более доработанной версией предыдущей вычислительной системы с большим количеством процессоров.
- 5) SKIF Ural T16 Cluster [12] (на базе процессоров Intel E54xx, 3 ГГц) – разработчик T-Platforms. Суперкомпьютер установлен в Южно-Уральском государственном университете и интересен нам в первую очередь потому, что является одним из немногих представителей суперкомпьютеров в списке из Российской Федерации.
- 6) NOW Cluster [13] (на базе процессоров Intel Xeon 53xx, 2.33 ГГц) – разработчиком и владельцем является CERN, всемирно известная швейцарская научная лаборатория. В данной работе этот суперкомпьютер интересен тем, что собран самостоятельно, для соединения использовалась сеть Gigabit Ethernet и производительность, вычисленная

с помощью бенчмарка, оказалась существенно ниже теоретической производительности.

- 7) Firefly PowerEdge SC1435 [14] (на базе процессоров AMD Opteron Dual core, 2.8 ГГц) – разработчиком данного суперкомпьютера является компания DELL. Нам он интересен по той причине, что построен на процессорах AMD, в отличие от предыдущих систем, которые используют процессоры Intel. Помимо этого, Firefly находится в списке довольно близко с некоторыми из описанных выше суперкомпьютеров, а значит, их сравнение и анализ будет особенно интересным. Для определения вычислительной способности этого суперкомпьютера была проанализирована микроархитектура процессоров AMD K10, на основе которой и построен процессор Opteron. Однако анализ архитектуры процессоров AMD и полученных результатов – это довольно большой объём материала, и к данной статье он отношения не имеет, поэтому будет опубликован позднее со всеми подробными описаниями вычислений. Сами же уравнения можно найти по ссылке [6].

В табл. 1 представлены подробные технические характеристики всех суперкомпьютеров, которые необходимы для определения их вычислительной способности. В данной таблице Quad core означает, что это – четырёхъядерный процессор, Dual core – соответственно двухъядерный.

Таблица 1. Технические характеристики суперкомпьютеров из ТОП 500

Наименование	Тип процессора	Тактовая частота, МГц	Количество узлов	Количество процессоров в узле	Количество памяти в узле, Мб	Тип сети
Netfinity Cluster	Intel Pentium III	1000	512	2	512	Myrinet
ASCI Red	Intel Pentium II Xeon	333	4536	2	128	Proprietary
Intel Endeavor Cluster 1	Dual core Xeon	3000	285	2	8192	Infiniband
SKIF Ural T16	Quad core Xeon E54xx	3000	166	2	8196	Infiniband
NOW Cluster	Quad core Xeon E53xx	2330	470	2	16392	Gigabit Ethernet
Firefly	Dual core Opteron	2800	1151	2	8192	Infiniband
Intel Endeavor Cluster 2	Quad core Xeon E54xx	2800	287	2	8192	Infiniband

В табл. 2 представлены характеристики производительности для всех описанных выше суперкомпьютеров. Две из этих характеристик взяты с сайта top500.org, это пиковая теоретическая производительность (Rpeak) и результат работы суперкомпьютера на тесте LINPACK (Rmax). Третья характеристика – это вычислительная способность суперкомпьютера, вычисленная по описанной выше схеме.



Таблица 2. Характеристики производительности суперкомпьютеров.

Наименование	Вычислительная способность, Тбит/сек	Rmax, TFlop/сек	Rpeak, TFlop/сек
Netfinity Cluster PIII	43.03	594	1024
ASCI Red	120.90	2400	3200
Intel Cluster Endeavor 1	234.90	10800	13700
SKIF Ural T16 cluster	274.35	12200	15900
NOW Cluster - Intel Xeon 53xx, 2.33 GHz	602.46	19700	35000
Firefly - PowerEdge SC1435 Dual core Opteron 2.8 GHz	680.69	21500	25800
Intel Endeavor 2	442.71	21800	25700

Для лучшего анализа результатов построим диаграмму (рис. 2). На ней мы будем последовательно сравнивать последующий суперкомпьютер с предыдущим, учитывая их расположение так, как оно представлено в табл. 2. На рис. 2 мы видим, что при переходе с ASCI Red на Intel Endeavor Cluster 1 произошёл резкий скачок, причем особенно сильный скачок был именно у максимальной производительности, которая замеряется с помощью бенчмарка LINPACK. Необходимо отметить, что LINPACK – это бенчмарк, который измеряет скорость решения системы линейных уравнений и алгоритм, по которому проходит распараллеливание и решение системы, постоянно перерабатывается и улучшается. Время получения результатов для ASCI Red и Intel Endeavor разделяет срок в 3-4 года. За это время алгоритм претерпел значительные изменения и улучшения, как и программное обеспечение суперкомпьютеров, и один из этих факторов оказал влияние, поэтому показывает большую производительность и превосходит даже теоретический максимум. Наша же характеристика показывает не такой огромный рост и в целом отражает изменения более объективно, ведь все-таки количество вычислительных ядер суперкомпьютера ASCI Red практически в 9 раз превосходит количество ядер Endeavor. Доказательством того, как изменяется значение результатов теста LINPACK, служит суперкомпьютер BladeCenter HS21 Cluster, собранный в Сибирском национальном университете. По ссылке <http://www.top500.org/system/175709> можно убедиться, что у компьютера не изменялось ни количество ядер, ни тип процессоров, ни объём оперативной памяти, однако производительность на тесте LINPACK выросла со значения 9.3 TFlops до 13.1 TFlops. Именно в 2008 году и вышла новая версия библиотеки LINPACK, которая используется на сайте top500. В дальнейшем вычислительная способность ведёт себя схоже с остальными характеристиками. Однако весьма интересный скачок наблюдается также при переходе от суперкомпьютера Firefly на процессорах AMD к Intel Endeavor 2 на процессорах Intel. На самом деле, здесь как раз сказывается необъективность теста LINPACK, который характеризует систему исключительно со стороны способности решать систему линейных уравнений, а не всех возможных задач. Наша характеристика рассматривает производительность процессора относительно всего возможного набора задач, а следовательно, между ней и узкоспециализированными бенчмарками всегда будут некоторые перепады.

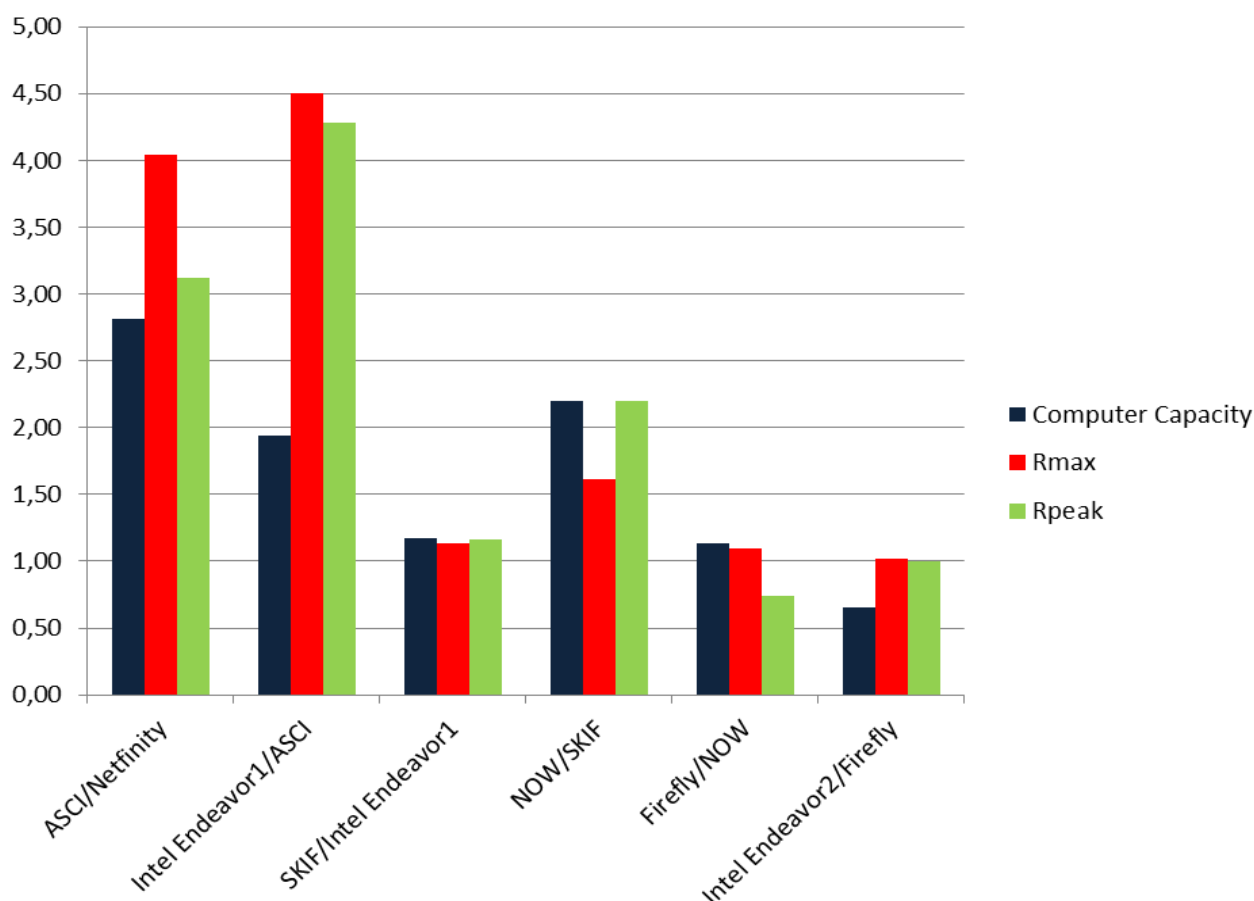


Рис. 2. Диаграмма попарного сравнения характеристик суперкомпьютеров

Таблица 3. Данные для диаграммы из рис. 2

	Computer Capacity	Rmax	Rpeak
ASCI/Netfinity	2.81	4.04	3.13
Intel Endeavor1/ASCI	1.94	4.50	4.28
SKIF/Intel Endeavor1	1.17	1.13	1.16
NOW/SKIF	2.20	1.61	2.20
Firefly/NOW	1.13	1.09	0.74
Intel Endeavor2/Firefly	0.65	1.01	1.00

Помимо представленного рис. 2, будет интересно также проанализировать диаграмму, где за единицу мы возьмём значение характеристики первого суперкомпьютера из списка, и построим график относительно этого значения. На рис. 3 представлена именно такая диаграмма. Для более объективного сравнения и оценки мы исключим из рассмотрения суперкомпьютеры Netfinity и ASCII Red, т.к. их от остальных отделяет большой промежуток времени и существенная разница в программном обеспечении, о чём уже было написано выше.

На рис. 3 видно, что предлагаемая нами характеристика ведёт себя очень неоднозначно, иногда совпадая с теоретическим максимумом, иногда приближаясь к практическому значению, а иногда не совпадая ни с тем, ни с другим. Это говорит о самостоятельности характеристики и о том, что она, несмотря на схожесть с вычислением теоретического максимума, всё же имеет существенные различия. Тем самым можно сказать, что представленная харак-

теристика, по сравнению с данными рейтинга ТОП 500, является вполне объективной и может быть применена для комплексной оценки систем.

Таблица 4. Данные для сравнительной диаграммы из рис. 3

	Computer Capacity	Rmax	Rpeak
Intel Cluster Endeavor 1	1	1	1
SKIF Ural T16	1.17	1.13	1.16
NOW Cluster	2.20	1.61	2.20
Firefly PowerEdge SC1435	1.13	1.09	0.74
Intel Endeavor 2	0.65	1.01	1.00

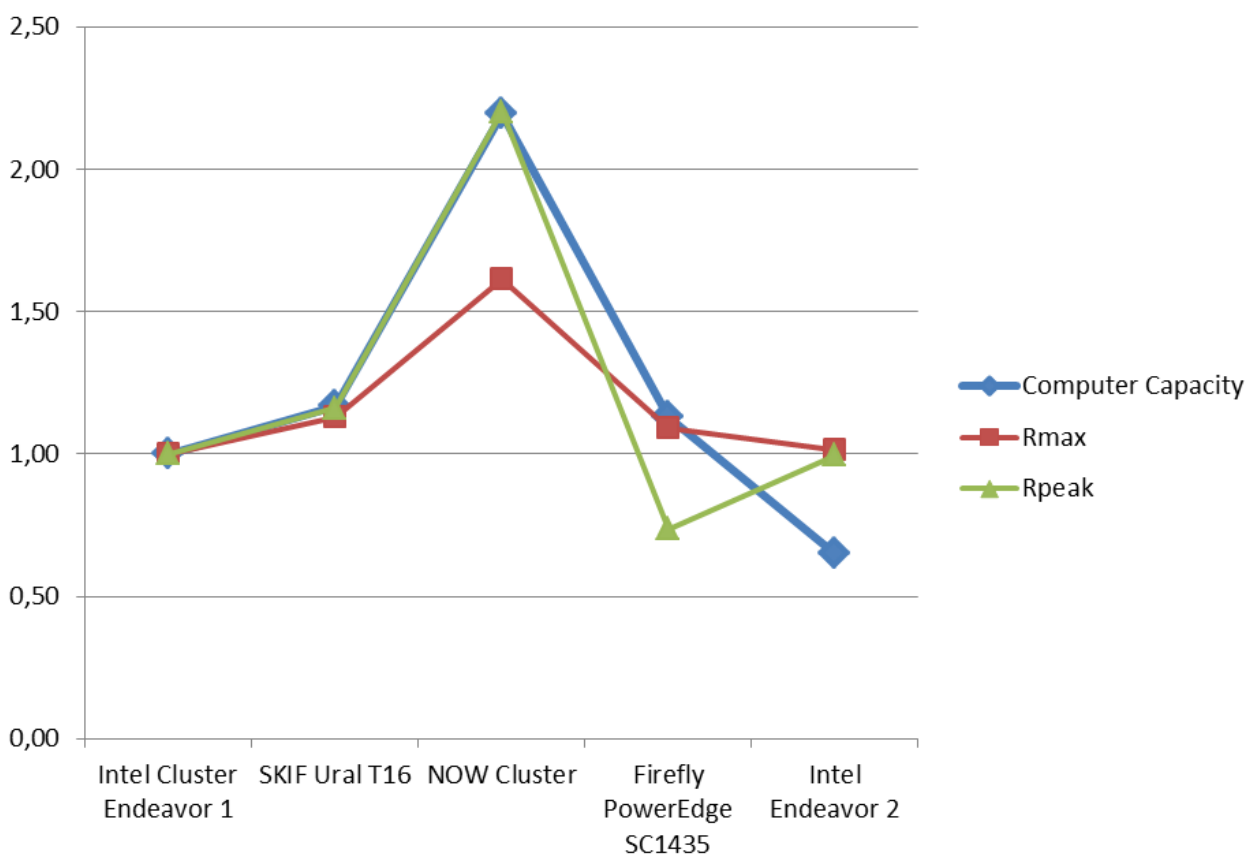


Рис. 3. Сравнительная диаграмма характеристик оценки производительности

Чтобы оценка была более объективной, необходимо провести комплексное сравнение суперкомпьютеров и на других бенчмарках. Для этого был выбран не менее популярный и в чём-то даже более информативный проект HPCC, в котором представлено множество различных бенчмарков. Этот проект даёт более разнообразную и полную оценку суперкомпьютера, исследуя его поведение на большем количестве задач.

Список суперкомпьютеров в этом проекте не совпадает со списком из ТОП500 по той причине, что владельцы вычислительных систем сами должны проводить испытания и предоставлять полученные данные, доказывая при этом их достоверность. Поэтому для оценки и сравнения характеристик были выбраны следующие вычислительные системы:

- 1) Dell PE850 на базе процессоров Intel Pentium 4. Подробное описание в [15];

- 2) Intel Discovery Cluster на базе процессоров Intel Core 2 Extreme X6800. Подробное описание в [16];
- 3) Intel Endeavor Cluster на базе процессоров Intel Xeon 5160. Подробное описание в [17];
- 4) Altix ICE 8200 на базе процессоров Intel Xeon EM64T. Подробное описание в [18];
- 5) Cray Inc. XT3 на базе процессоров AMD Opteron Single Core. Подробное описание в [19].

Таблица 5. Технические характеристики сравниваемых суперкомпьютеров

Наименование кластера	Количество процессоров	Вычислительная способность СП, Мбит/сек	Вычислительная способность, Мбит/сек	G-HPL	G-FFT	Теоретический максимум
Dell PE850 Intel Pentium 4	48	0.199	11422034.948	0.383	0.004	0.576
Intel Discovery cluster Core 2 Extreme X6800	128	23.519	51654607.101	1.269	0.044	1.500
Intel Endeavor cluster Xeon 5160	256	24.522	105497937.238	2.458	0.060	3.072
SGI Altix ICE 8200 Intel Xeon EM64T	512	25.019	375147955.308	15.699	0.080	21.790
Cray Inc. XT3 AMD Opteron	4128	6.508	1220550098.556	16.642	0.820	21.466

В табл. 5 приведены более подробные данные о суперкомпьютерах, которые мы будем далее сравнивать. Для сравнения, как и в предыдущем разделе, воспользуемся двумя способами: в первом мы будем сравнивать суперкомпьютеры попарно относительно друг друга, для этого отсортируем их по вычислительной способности и будем рассматривать соседние элементы в представленном списке; во втором случае мы возьмём характеристики первого суперкомпьютера за единицу и сравним остальные системы относительно этих характеристик. В табл. 6 представлены данные по первому способу сравнения, на основе которых мы построим диаграмму на рис. 4. В табл. 7 представлены данные сравнения суперкомпьютеров относительно системы Dell PE850 Intel Pentium 4, относительно которых строится график на рис. 5.

Таблица 6. Данные попарного сравнения последовательных суперкомпьютеров в табл. 5

Наименование	Вычислительная способность	G-HPL	G-FFT	Теоретический максимум
Discovery/Dell	4.52	3.31	10.25	2.60
Endeavor/Discovery	2.04	1.94	1.37	2.05
Altix/Endeavor	3.56	6.39	1.33	7.09
Cray/Altix	3.25	1.06	10.25	0.99

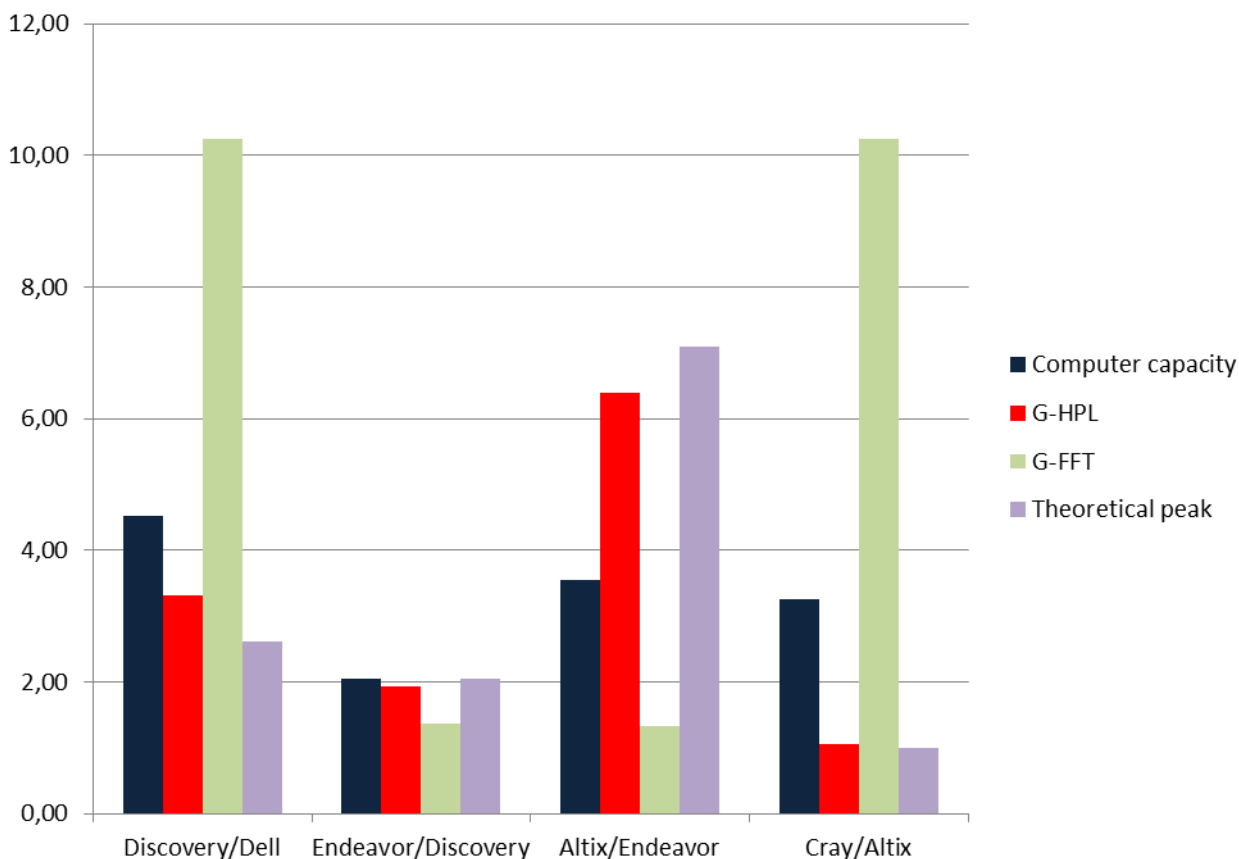


Рис. 4. Диаграмма попарного сравнения последовательных суперкомпьютеров

Таблица 7. Данные сравнения суперкомпьютеров относительно Dell PE850

Наименование	Вычислительная способность	G-HPL	G-FFT	Теоретический максимум
Discovery/Dell	4.52	3.31	10.25	2.60
Endeavor/Dell	9.24	6.42	14.07	5.33
Altix/Dell	32.84	41.00	18.76	37.83
Cray/Dell	106.86	43.46	192.26	37.27

Если внимательно посмотреть на рис. 4 и рис. 5, то можно заметить, что в обоих случаях вычислительная способность показывает усреднённое значение относительно всех остальных характеристик. Т.к. данная характеристика оценивает все возможные наборы задач, то такая закономерность является вполне логичной; ведь если на одних типах задач суперкомпьютер выдаёт слабый результат, а на других – достаточно высокий, то оценивая в комплексе все эти задачи, мы должны будем получить некоторое среднее значение, что и происходит с вычислительной способностью. Это показывает, что наша характеристика очень хорошо применима для сравнения суперкомпьютеров и может стать отличной заменой или дополнением для классического теоретического максимума. Необходимо отметить, что по своей структуре формула определения вычислительной способности во многом схожа с формулой теоретического максимума; тем не менее, в них есть существенные различия, которые и делают результаты более объективными и точными. Данная характеристика будет учитывать и объём оперативной памяти, и скорость доступа к ней, и скорость передачи данных между процессорами, и много других дополнительных факторов. Отметим, что особенно хорошие результаты вычислительная способность даёт при сравнении между собой суперкомпьютеров с различными процессорами и архитектурами.

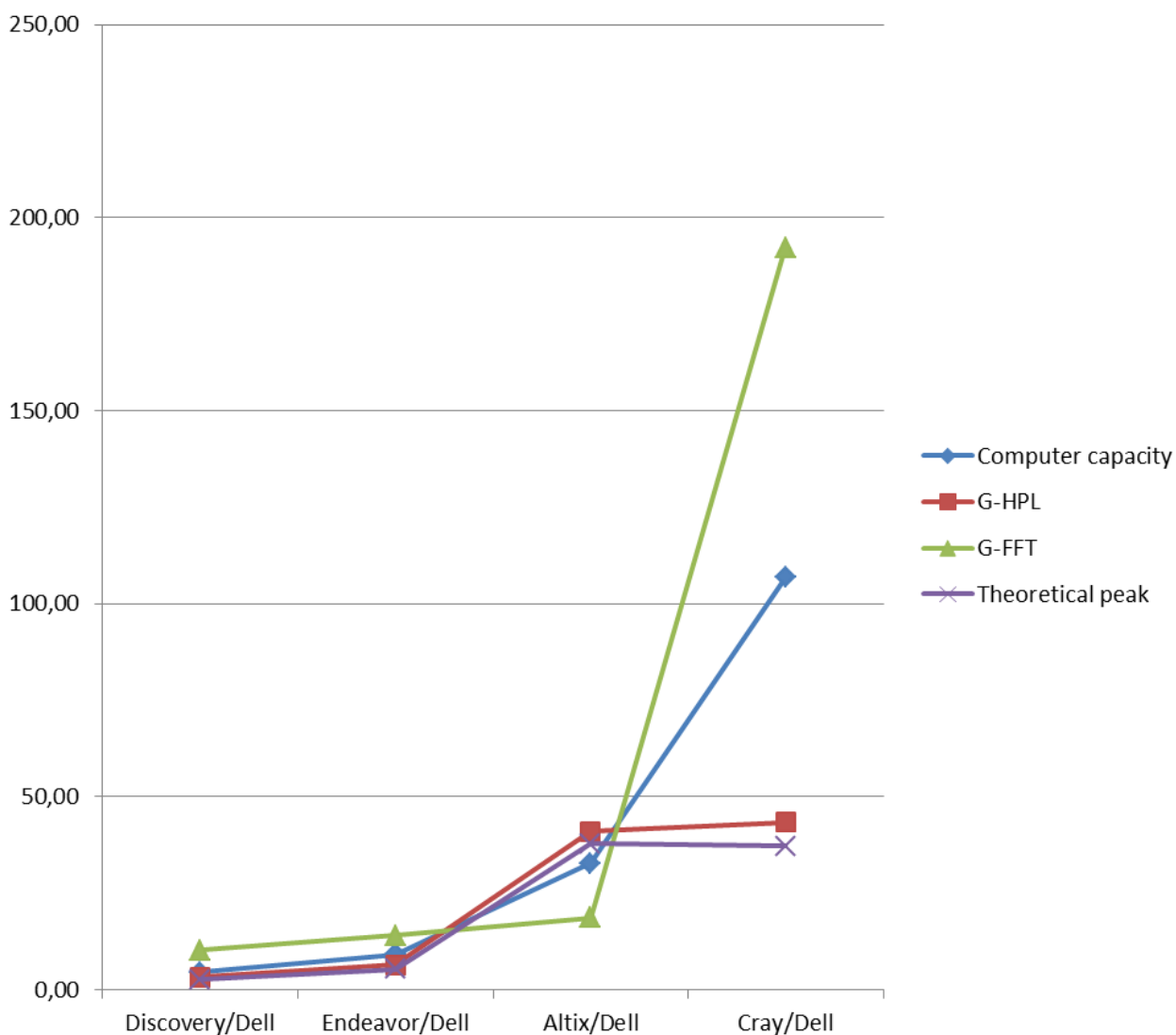


Рис. 5. График сравнения суперкомпьютеров относительно Dell PE850

## Литература

1. *Ryabko B.* An information-theoretic approach to estimate the capacity of processing units // Performance Evaluation. 2012. V. 69, P. 267-273.
2. *Ракитский А. А.* Практическое применение методов теоретической оценки вычислительной способности для процессоров Intel P5 // Вестник СибГУТИ. 2012.4. С. 50-61.
3. *Ракитский А. А.* Теоретическая оценка вычислительной способности процессоров Intel // Вестник СибГУТИ. 2012.3 С. 29-45.
4. The Linpack Benchmark [Электронный ресурс].  
URL: <http://www.top500.org/project/linpack/> (дата обращения: 10.06.2013).
5. *Petit A., Whaley R. C., Dongarra J., Cleary A.* HPL - A Portable Implementation of the High-Performance Linpack Benchmark for Distributed-Memory Computers [Электронный ресурс].  
URL: <http://www.netlib.org/benchmark/hpl/index.html> (дата обращения: 10.06.2013).
6. Программа для определения вычислительной способности и уравнения всех исследованных на данный момент процессоров [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/folderview?id=0B023P6Ajk7nJckhpRmdGS1vtZ1k> (дата обращения: 10.06.2013)

7. *Christon M., Crawford D., Hertel E., Peery J., Robinson A.* ASCI Red – Experiences and Lessons Learned with a Massively Parallel TeraFLOP Supercomputer // Proceedings of the Supercomputer, 1997.
8. ASCI Red [Электронный ресурс]. URL: <http://www.top500.org/system/168753> (дата обращения: 10.06.2013)
9. Netfinity Cluster [Электронный ресурс]. URL: <http://www.top500.org/system/167471> (дата обращения: 10.06.2013)
10. Endeavor Intel Cluster, Xeon 3GHz [Электронный ресурс]. URL: <http://top500.org/system/175068> (дата обращения: 10.06.2013)
11. Endeavor Intel Cluster, Xeon E54xx 2.8 GHz [Электронный ресурс]. URL: <http://top500.org/system/175633> (дата обращения: 10.06.2013)
12. SKIF Ural T16 Cluster [Электронный ресурс]. URL: <http://top500.org/system/175584> (дата обращения: 10.06.2013)
13. NOW Cluster, Intel Xeon 53xx [Электронный ресурс]. URL: <http://top500.org/system/175588> (дата обращения: 10.06.2013)
14. Firefly – PowerEdge SC1435 Dual core Opteron [Электронный ресурс]. URL: <http://top500.org/system/175188> (дата обращения: 10.06.2013)
15. Dell PE850 [Электронный ресурс]. URL: [http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc\\_record.cgi?id=146](http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc_record.cgi?id=146) (дата обращения: 10.06.2013)
16. Intel Discovery Cluster [Электронный ресурс]. URL: [http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc\\_record.cgi?id=238](http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc_record.cgi?id=238) (дата обращения: 10.06.2013)
17. Intel Endeavor Cluster [Электронный ресурс]. URL: [http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc\\_record.cgi?id=245](http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc_record.cgi?id=245) (дата обращения: 10.06.2013)
18. Altix ICE 8200 [Электронный ресурс]. URL: [http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc\\_record.cgi?id=257](http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc_record.cgi?id=257) (дата обращения: 10.06.2013)
19. Cray Inc. XT3 [Электронный ресурс]. URL: [http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc\\_record.cgi?id=135](http://icl.cs.utk.edu/hpcc/hpcc_record.cgi?id=135) (дата обращения: 10.06.2013)
20. *Shannon C. E.* A mathematical theory of communication // Bell Sys. Tech. J. 1948. V. 27, P. 379-423, P. 623-656.
21. Intel x86 Quick Reference Instruction Manual - 8086/80186/80286/80386/80486. URL: <http://www.intel-assembly.it/portale/5/x86-instruction-reference-manual/x86-instruction-reference-manual.asp> (Дата обращения: 04.12.2012).
22. *Fog A.* The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs An optimization guide for assembly programmers and compiler makers. Copenhagen University College of Engineering. 2012-02-29. URL: <http://www.agner.org/optimize/> (Дата обращения: 04.12.2012).
23. *Fog A.* Lists of instruction latencies, throughputs and microoperation breakdowns for Intel, AMD and VIA CPUs. Copenhagen University College of Engineering. 2012. URL: <http://www.agner.org/optimize/> (Дата обращения: 04.12.2012).
24. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developers Manual Volume 1: Basic Architecture. Intel Corp. URL: <http://www.intel.ru/content/www/ru/ru/architecture-and-technology/64-ia-32-architectures-software-developer-vol-1-manual.html> (Дата обращения: 04.12.2012).
25. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developers Manual Volume 2. Intel Corp. URL: <http://www.intel.ru/content/www/us/en/architecture-and-technology/64-ia-32-architectures-software-developer-vol-2a-2b-instruction-set-a-z-manual.html> (Дата обращения: 15.03.2012).

*Статья поступила в редакцию 09.09.2013;  
переработанный вариант — 31.10.2013*

**Ракитский Антон Андреевич**

Старший преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики СибГУТИ,  
тел.+7-923-101-1936, e-mail: rakitsky.anton@gmail.com

**Application of computer capacity as a characteristic for evaluation and comparison  
of super-computers**

**A. Rakitskiy**

In this paper we describe how to use the method of theoretical estimation of computer capacity for evaluation and comparison of super-computers and cluster systems. We present a detailed description of peculiarities of applied method to estimation of super-computers. The results are compared with the results of different benchmarks.

*Keywords:* computer capacity, performance evaluation, super-computers.