

Аналитический метод сравнения и оценки производительности компьютеров и вычислительных систем*

А. А. РАКИТСКИЙ, Б. Я. РЯБКО, А. Н. ФИОНОВ

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск, Россия*

e-mail: rakitsky.anton@gmail.com, boris@ryabko.net, fionov@sibsutis.ru

Ракитский А.А., Рябко Б.Я., Фионов А.Н. Аналитический метод сравнения и оценки производительности компьютеров и вычислительных систем // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 4. С. 84–98.

Предлагается аналитическая методика оценки производительности компьютеров и вычислительных систем. Оценка производится при помощи определения вычислительной способности компьютера. Показаны результаты применения представленной методики к реально существующим процессорам Intel и AMD, а также возможность использования вычислительной способности для сравнения производительности суперкомпьютеров. Полученные результаты сравниваются с общепринятыми методами оценки производительности.

Ключевые слова: вычислительная способность, производительность, вычислительные системы, суперкомпьютеры, бенчмарки.

Rakitskiy A.A., Ryabko B.Ya., Fionov A.N. The analytical method for comparing and evaluating the performance of computers and computer systems // Computational Technologies. 2014. Vol. 19, No. 4. P. 84–98.

In this report we discuss the results of application of a new method for evaluation of the performance of processing units and supercomputers. This method is based on notion of Computer Capacity, which is determined only by the computer architecture and can be computed theoretically on a design stage. Computer Capacity is based on the number of different tasks, which can be executed by computer in particular time. We calculated the computer capacity for different Intel and AMD processors list and supercomputers, based on these processors, and compared the results with the recognized benchmarks. This results show that Computer Capacity is fully objective characteristic and can be used for performance evaluation of processing units, especially on the design stage. Moreover, presented method can be used as alternative to traditional theoretical peak performance of supercomputers and could help developers of the computing systems.

Keywords: computer capacity, performance evaluation, supercomputers, benchmarks, computer systems.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00125-а).

Введение

Компании, занимающиеся разработкой и производством процессоров, при проектировании новых процессоров сталкиваются с многими проблемами. Одна из них — проблема оценки производительности разрабатываемого процессора. В настоящее время не существует объективных аналитических способов произвести эту оценку. Для определения производительности процессоров их тестируют при помощи так называемых бенчмарков — некоторых наборов программ, выполняемых на тестируемом процессоре. При разработке новых процессоров приходится исследовать многочисленные варианты архитектур, причём для каждого из вариантов необходимо дорогостоящее и трудоёмкое построение рабочей модели процессора или написание его эмулятора. В работе [1] предложен метод аналитической оценки вычислительной способности компьютеров и подобных им устройств, основанный только на описании архитектуры исследуемого компьютера, куда входят список инструкций, время их выполнения, объём оперативной и кэш-памяти.

В настоящей работе рассматривается возможность практического применения предложенного в [1] метода при разработке процессоров и вычислительных систем для оценки и сравнения их производительности. В ходе исследования была произведена оценка вычислительной способности большинства процессоров Intel, некоторых процессоров AMD, а также суперкомпьютеров, построенных на их основе. Указанные процессоры были выбраны в силу их большой распространённости и доступности документации с описанием архитектур. Полученные данные сравниваются с аналогичными данными оценки при помощи общепризнанных бенчмарков, таких как ICOMP, SPEC и PassMark. В результате показано, что предлагаемый метод даёт оценку, сопоставимую с таковой бенчмарков, однако при этом для применения метода не требуется рабочего экземпляра процессора (или эмулирующей работу процессора модели), что делает его более предпочтительным для использования по сравнению с бенчмарками. Метод также показал хорошие результаты при оценке вычислительной способности суперкомпьютеров, что позволяет говорить о возможности его применения при проектировании вычислительных систем. Кроме того, предложенный метод может быть использован для выбора оптимальной архитектуры при построении облачных вычислительных систем.

1. Основные определения и понятия

Рассмотрим упрощённую модель компьютера, который состоит из набора инструкций I и доступной памяти M . Отметим, что под инструкцией $x \in I$ мы подразумеваем не только название этой инструкции, но и значения всех её операндов. Таким образом, если существуют две инструкции с одним именем, но с разными значениями операндов, то они считаются различными и обе включаются в набор I .

Определим процессорную задачу P как некоторую последовательность инструкций $\bar{x}(P) = x_1, x_2, \dots, x_i \in I$. При этом, если задача P , например, содержит цикл, который повторяется шесть раз, то последовательность $\bar{x}(P)$ будет содержать в себе тело этого цикла, повторяющееся шесть раз. Очевидно, что не все последовательности инструкций могут быть допустимы. Например, возможно существование пары инструкций, при последовательном выполнении которых в процессоре может произойти ошибка. Определим множество всех допустимых последовательностей инструкций как S_c , тогда любая процессорная задача в нашей модели может быть представлена как некоторая после-

довательность из S_c . При этом верно и обратное: любая последовательность из множества S_c является процессорной задачей в рассматриваемой модели компьютера.

Пусть время выполнения инструкции x равно $\tau(x)$. Для простоты будем считать, что для всех инструкций время их выполнения является целым числом и наибольший общий делитель всех $\tau(x)$, $x \in I$, равен 1 (это уточнение верно для большинства процессоров, так как в качестве времени выполнения всегда можно рассматривать количество тактов процессора и всегда существует простейшая инструкция, время выполнения которой равно единице, т. е. $\tau(x) = 1$). В настоящей работе это допущение при описании вычислительной способности позволит использовать \lim вместо \limsup . Таким образом, время выполнения $\tau(\bar{x})$ последовательности инструкций $\bar{x} = x_1x_2x_3, \dots, x_t$ описывается формулой

$$\tau(\bar{x}) = \sum_{i=1}^t \tau(x_i).$$

Определим количество различных задач, время выполнения которых равно T , как $\vartheta(T)$, и пусть $N(T)$ будет размером множества всех допустимых последовательностей инструкций, чьё время выполнения также равно T :

$$N(T) = |\{\bar{x} : \tau(\bar{x}) = T\}|. \quad (1)$$

Основная мысль здесь заключается в следующем:

$$\vartheta(T) = N(T). \quad (2)$$

Отсюда следует

$$\log \vartheta(T) = \log N(T). \quad (3)$$

Считаем, что T — целое число, $\log x \equiv \log_2 x$, а $|Y|$ — количество элементов Y , если Y является множеством, либо длина, если Y является словом. Другими словами, количество различных процессорных задач, выполняемых за время T , эквивалентно (1).

Определение. Пусть есть некоторый компьютер с набором инструкций I и время выполнения инструкции $\tau(x)$, $x \in I$. Тогда вычислительная способность $C(I)$ задаётся следующим образом:

$$C(I) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log N(T)}{T}, \quad (4)$$

где $N(T)$ определено в (1).

Утверждение. Предел (4) существует, если I — конечное множество и время выполнения $\tau(x)$, $x \in I$, являются целыми числами и наибольший общий делитель всех $\tau(x)$, $x \in I$, равен 1.

Доказательство приводится в работе [1].

Рассмотрим случай, когда все последовательности инструкций допустимы. Это справедливо для большинства современных процессоров, в которых допускаются любые действия и операции, но в случае возникновения ошибки просто происходит прерывание. Иначе говоря, если рассматривать I как алфавит, то все последовательности букв (инструкций) могут быть выполнены. В таком случае можно применить методику для определения ёмкости канала без потерь, предложенную в работе [2]. Важно отметить, что рассматриваемый метод используется для получения верхней оценки вычислительной способности.

Пусть, как и ранее, имеется компьютер с множеством инструкций I , время выполнения которых составляет $\tau(x)$, $x \in I$, и все последовательности инструкций допустимы. Другими словами, если I представим как алфавит, то все слова, образованные этим алфавитом, могут рассматриваться как допустимые последовательности инструкций для компьютера. Основная задача, которую необходимо решить, состоит в оценке вычислительной способности (4). Решение предложено в [2], где было показано, что ёмкость $C(I)$ эквивалентна логарифму наибольшего корня следующего уравнения:

$$X^{-\tau(x_1)} + X^{-\tau(x_2)} + \dots + X^{-\tau(x_s)} = 1, \tag{5}$$

где $I = \{x_1, \dots, x_s\}$. Иначе говоря, $C(I) = \log X_0$. (Более подробно об этом см. в [1].)

2. Пример практического применения метода

Чтобы показать, как метод работает на практике, рассмотрим упрощённую модель компьютера. Пусть компьютер состоит из памяти и процессора, который выполняет все инструкции процессорной задачи последовательно. Память компьютера составляет 1024 однобайтовых ячеек. Помимо этого, процессор имеет четыре регистра (назовём их A, B, C, D) и аккумулятор для выполнения вычислений. Все регистры и аккумулятор также будут иметь размер 1 байт. Тактовая частота процессора 100 МГц. Список инструкций и их подробное описание представлены в табл. 1.

На основе приведённого списка инструкций построим уравнение (5):

$$\frac{4096}{X^5} + \frac{16}{X^2} + \frac{4096}{X^9} + \frac{4}{X^1} + \frac{4}{X^1} + \frac{4}{x^3} + \frac{4}{X^6} + \frac{1}{X^1} = 1.$$

Т а б л и ц а 1. Список инструкций примера модели компьютера

Наименование инструкции	Список операндов	Описание инструкции	Время выполнения, такт
Load	Регистр, ячейка памяти	Загружает данные из ячейки памяти в регистр	5
Mov	Регистр, регистр	Помещает данные из регистра в регистр	2
Save	Ячейка памяти, регистр	Сохраняет данные из регистра в ячейку памяти	9
MovA	Регистр	Помещает данные из регистра в аккумулятор	1
MovR	Регистр	Помещает данные из аккумулятора в регистр	1
Add	Регистр	Складывает данные из регистра с данными аккумулятора. Полученное значение сохраняется в аккумуляторе	3
Mul	Регистр	Умножает данные из регистра на данные из аккумулятора. Полученное значение сохраняется в аккумуляторе	6
Clr	—	Очистка аккумулятора	1

Здесь слагаемое $\frac{4096}{X^5}$ соответствует первой команде Load, которая в качестве операндов использует один из четырёх регистров и одну из 1024 ячеек памяти, откуда и получается 4096 возможных варианта данной инструкции. Относительно второго слагаемого считаем, что пересылка, где в качестве отправителя и получателя участвует один и тот же регистр, является допустимой. Решив это уравнение, получим $C(I) \approx \log_2 2.1332 \approx 1.093$ бит/такт. Умножив полученное значение на тактовую частоту, имеем $C(I) \approx 109.3$ Мбит/с.

Очевидно, что в реальных процессорах список инструкций гораздо больший и состоит из сотен различных команд. Чтобы построить подобное уравнение в автоматическом режиме и решить его, авторами был разработан программный комплекс и выбран наиболее удобный формат хранения и представления списка инструкций (подробнее см. в [3]).

3. Оценка вычислительной способности процессоров Intel и AMD

Рассмотрим некоторые особенности определения вычислительной способности реально существующих процессоров. Прежде всего следует понять механизм работы с кэш-памятью. В современных процессорах существует такое понятие как кэш-память. Смысл его заключается в ускорении получения доступа к часто используемым данным. Принцип работы здесь состоит в следующем: кэш-память располагается в процессоре и поэтому время обращения к ней существенно меньше времени обращения к оперативной памяти, в силу чего при запросе каких-либо данных из памяти процессор обращается в кэш-память и определяет, нет ли там этих данных. Если требуемые данные в кэш-памяти не обнаружены, то процессор обращается к оперативной памяти. Тогда время работы инструкции, у которой в качестве операнда присутствует ячейка памяти и при этом помимо оперативной памяти у процессора есть кэш-память первого и второго уровней, будет определяться следующим образом. Пусть $\tau_M, \tau_{L_1}, \tau_{L_2}$ — время обращения к оперативной памяти, кэш-памяти первого уровня и кэш-памяти второго уровня соответственно. Тогда, если инструкция обращается только к кэш-памяти первого уровня, то время обращения будет τ_{L_1} , если инструкция обращается к кэш-памяти второго уровня, то время обращения будет уже $\tau_{L_1} + \tau_{L_2}$, т. е. представляет собой сумму времён обращения к кэш-памяти первого уровня (где данные не были обнаружены) и второго уровня. Если же в кэш-памяти данные не обнаружены, то время обращения составит сумму времен обращения ко всем уровням памяти $\tau_{L_1} + \tau_{L_2} + \tau_M$. Для рассматриваемого метода это особенно важно, так как все три типа обращений к памяти будут различными операциями, входящими в множество I . Таким образом, если некоторая инструкция в качестве операнда использует ячейку памяти, то в зависимости от количества уровней кэш-памяти она рассматривается как несколько различных типов инструкций. Каждый из этих типов инструкций обращается либо к кэш-памяти определённого уровня, либо к оперативной памяти, от чего зависит время её выполнения. Количество различных инструкций также будет зависеть от того, к памяти какого типа мы обращаемся для получения данных.

Отдельно необходимо рассмотреть конвейерную обработку инструкций в процессоре. Здесь самый важный вопрос — что считать временем выполнения инструкции, когда она проходит через конвейер. В самом простейшем случае принцип конвейерной обработки заключается в том, что процесс выполнения инструкции разбивается на относительно

простые этапы, например, этап декодирования инструкции или этап переименования регистров. Инструкции на этих этапах могут выполняться одновременно и независимо, т. е. двигаться по конвейеру друг за другом. В таком случае за время выполнения инструкции будем считать общую задержку, которая может произойти во время выполнения одной инструкции на всем пути по конвейеру. Естественно, это актуально только для самых первых процессоров, и в дальнейшем структуры конвейера и процессора существенно усложнились, что предполагает использование в качестве времени работы инструкции другие параметры, индивидуальные для каждого типа процессоров и рассмотренные подробнее в следующих разделах. В некоторых случаях в качестве времени выполнения инструкции будет использоваться количество микроопераций, на которые она разбивается, в других — общее время задержки, которая происходит в результате выполнения инструкции на конвейере.

Процессоры Intel 80286, 80486, Intel Pentium и Intel Pentium MMX были подробно исследованы в работе [4]. Здесь будут рассмотрены только результаты применения метода определения вычислительной способности для оценки и сравнения перечисленных процессоров. В табл. 2 приведены данные об этих процессорах, а на рис. 1 показаны гра-

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики и вычислительная способность ранних процессоров Intel

Название процессора	Частота процессора, МГц	Количество ядер	Объем ОЗУ, Мбайт	Размер L1 кэша, Кбайт	Размер L2 кэша, Кбайт	Вычислительная способность, Гбит/с
Intel 80286	12.5	1	1	—	—	0.075
Intel 80486	66	1	8	8	128	0.710
Pentium	100	1	32	16	512	2.556
Pentium	150	1	32	16	512	3.834
Pentium MMX	200	1	64	32	512	5.670
Pentium MMX	233	1	64	32	1024	6.606

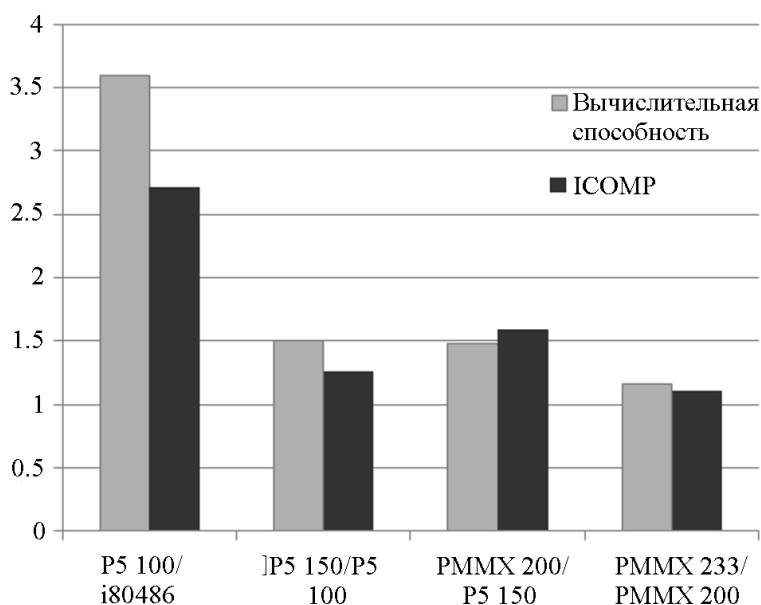


Рис. 1. Парное сравнение процессоров из табл. 1

фики сравнения процессоров при помощи вычислительной способности и результатов бенчмарка ICOMP. Процессоры сравниваются попарно: каждый относительно предыдущего в таблице (т.е. показатель каждого процессора делится на соответствующий показатель предыдущего), что необходимо и потому, что единицы измерения вычислительной способности и бенчмарков различаются и их нельзя сравнивать напрямую.

Как видно из рис. 1, результаты работы рассматриваемых процессоров сопоставимы с бенчмарком ICOMP, что говорит об объективности вычислительной способности, по крайней мере, для ранних моделей процессоров Intel. Очевидно, что для подтверждения достоверности и объективности данной характеристики необходимо её применить к более современным процессорам с принципиально другой архитектурой.

В работе [4] подробно рассматривается архитектура процессоров семейства P5, в которой впервые используются два конвейера. Однако в этих процессорах имеются существенные ограничения, не позволяющие в полной мере утверждать о параллельной работе двух конвейеров. Процессоры семейства P6 в этом плане выгодно отличаются от предыдущего поколения. Архитектура процессоров семейства P6 радикально отличается от архитектуры всех предыдущих процессоров. К этому семейству относятся процессоры Pentium Pro, Pentium II и Pentium III. Более того, их архитектура стала базовой для большинства современных процессоров, поэтому ей следует уделить особое внимание. В процессорах семейства P6 появилось много важных нововведений, основное из которых состоит в разбиении инструкции на микрооперации. Смысл здесь заключается в том, чтобы разбить сложную инструкцию на простейшие действия, которые выполняются относительно быстро и вполне возможно одновременно. Рассмотрим пример. Допустим, есть операция ADD Ax, m32, которая складывает значение 32-битной ячейки памяти с регистром Ax. Тогда очевидно, что эту операцию можно представить как две более простые: операцию загрузки данных из памяти и операцию сложения. Подробно все этапы конвейера, а также методика оценки вычислительной способности рассмотрены в работе [5], где также объясняется, почему в этих процессорах в качестве времени выполнения инструкции используется количество микроопераций, на которые она разбивается. В табл. 3 для сравнения процессоров семейств P5 и P6 приведены характеристики вычислительной способности и трёх бенчмарков.

На основе данных табл. 3 построим график сравнения процессоров между собой. Так как величины измерения у всех характеристик различны, то для их сопоставления значения характеристик первого из списка процессора примем за единицу и будем делить на них значения характеристик остальных процессоров. На рис. 2 приведена диаграмма сравнения процессоров семейств P5 и P6 относительно процессора Intel Pentium. Как видно, по объективности вычислительная способность не уступает бенчмаркам SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation) и ICOMP. Все уравнения, программа для их решения и результаты находятся в открытом доступе [6]. Это касается как уже рассмотренных процессоров, так и описанных далее.

Особый интерес представляет сравнение процессоров Pentium III и Pentium IV, так как последний построен по принципиально новой архитектуре и вызвал много споров. Основная идея здесь в том, чтобы значительно повысить тактовую частоту процессора, что возможно за счёт существенного увеличения длины конвейера. Так, если длина конвейера процессоров семейства P6 составляла 9 этапов, то длина конвейера процессора Pentium IV составляет 20 этапов [5]. На рис. 3 приведены результаты сравнения процессоров Pentium III (тактовая частота 1266 МГц) и Pentium IV (тактовая частота 2600 МГц). Как и ранее, показатели характеристик процессора Pentium IV будем де-

Т а б л и ц а 3. Характеристики процессоров семейств P5 и P6

Название процессора	$C(I)$, бит/такт	Тактовая частота, МГц	Вычислительная способность, Мбит/с	ICOMP	SPECint95	SPECfp95
Pentium	25.56	150	3834	114	4.13	3.58
Pentium MMX	28.35	200	5670	182	6.37	4.87
Pentium Pro	36.62	200	7323.68	220	8.59	6.34
Pentium II	37.69	400	15076.55	440	15.6	12.9
Pentium III	42.02	500	21011.17	644	21.6	16.2

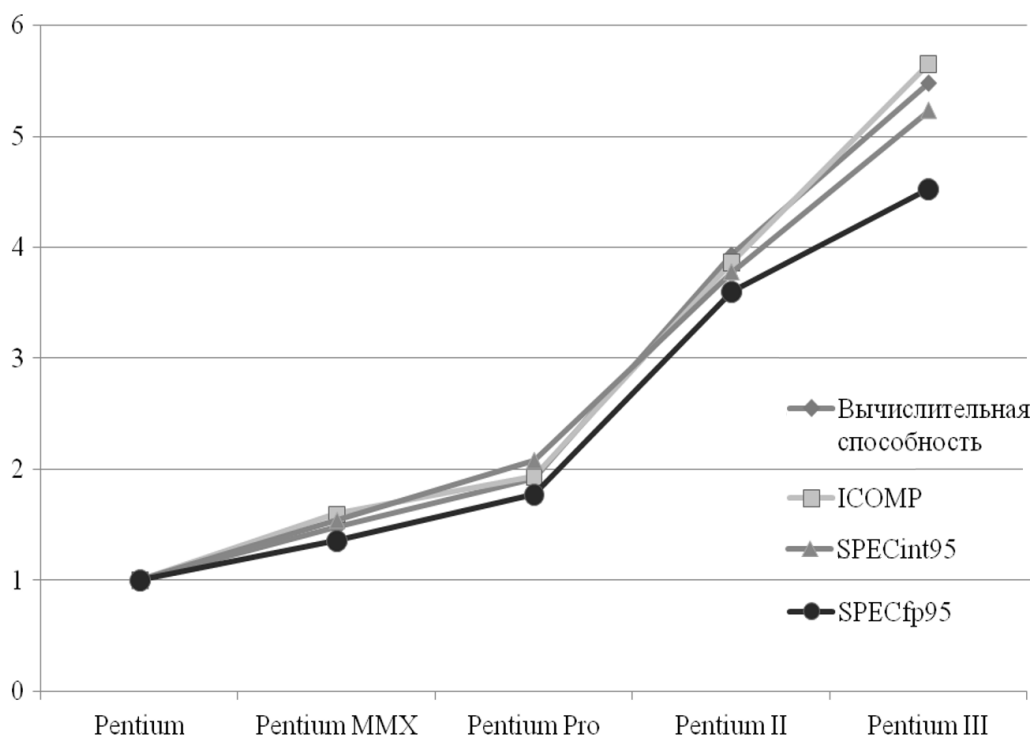


Рис. 2. Сравнение процессоров семейств P5 и P6

лить на соответствующие показатели характеристик процессора Pentium III. На рисунке результаты оценки вычислительной способности процессоров сравниваются с широко используемыми в настоящее время бенчмарками SPEC (CINT2000, CFP2000), SiSoft Sandra, PCMark, 3DMark и PassMark.

Следующими рассматриваются процессоры с микроархитектурой PМ (Pentium M, Intel Core). Эти процессоры базируются на микроархитектуре процессоров семейства P6 и являются по сути их модификацией. Так, был доработан блок предсказания переходов, внесены некоторые изменения в исполнительные модули, однако нас интересуют изменения, непосредственно влияющие на построение уравнения и расчёт характеристик. В процессорах семейства PМ появились так называемые спаянные микрооперации, суть которых заключается в том, чтобы повысить пропускную способность блоков, предшествующих исполнительным модулям и следующих за ними. Блоки переименова-

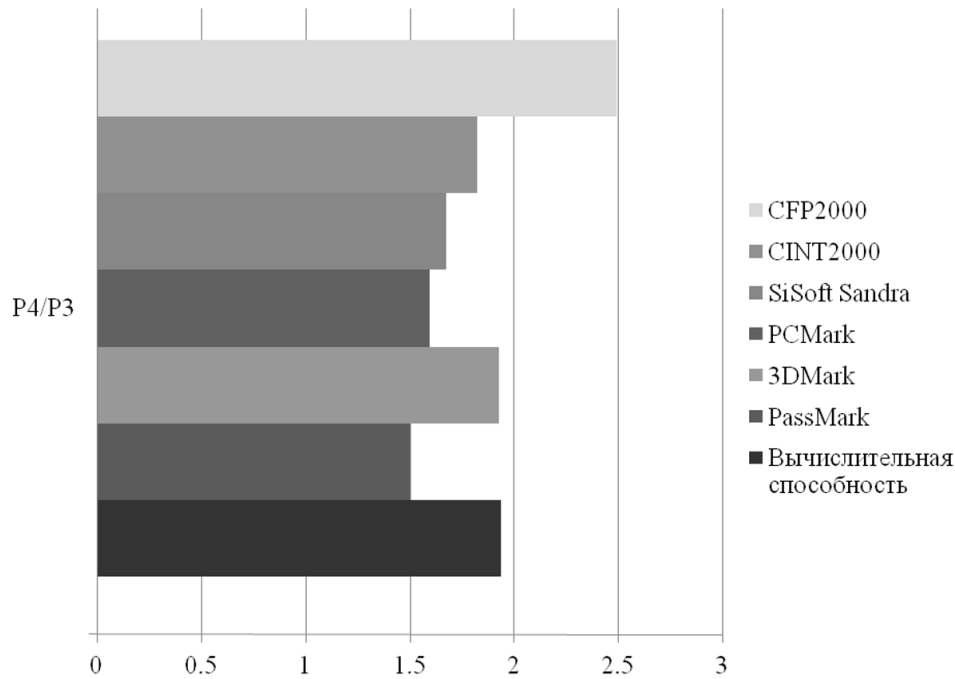


Рис. 3. Сравнение процессоров Intel Pentium III и Intel Pentium IV

ния регистров и восстановления имеют пропускную способность всего три микрооперации в такт. Чтобы преодолеть этот предел и повысить пропускную способность, были объединены некоторые микрооперации, которые в предыдущих процессорах осуществлялись раздельно. Остальные нюансы работы процессоров данного семейства приведены в работе [5].

Составив уравнения и решив их, получим для Pentium M $C(I) \approx 51.198$ бит/такт. Различия в архитектурах процессоров Pentium M и Intel Core Solo минимальны и на уравнения не влияют, списки инструкций с их характеристиками также практически не различаются (основные изменения в процессорах Core связаны с энергосбережением), поэтому результат для Intel Core Solo также будет $C(I) \approx 51.198$ бит/такт.

Далее рассмотрим процессоры семейства Intel Core 2. Последние являются существенной доработкой процессоров PM, в результате которой значительно улучшены технические характеристики, не связанные с радикальным изменением архитектуры, например, добавлен ещё один декодер, увеличены размеры кэша и буфера переупорядочивания. Кроме того, существенно увеличилась пропускная способность, которая стала составлять не три, а четыре микрооперации в такт.

После решения уравнения для данного семейства получен результат $C(I) \approx 68.8469$ бит/такт для одноядерных процессоров и $C(I) \approx 137.6937$ бит/такт для двухъядерных.

Процессоры AMD построены по принципиально иной схеме. Процессоры Intel разбивают инструкцию на микрооперации, параллельность выполнения которых обеспечивается в силу переупорядочивания и за счёт того, что разные типы операций проводятся в разных исполнительных блоках. В отличие от них процессоры AMD состоят из нескольких полностью параллельных конвейеров, что хотя и обеспечивает однозначную параллельность выполнения инструкций, но существенно снижает скорость проведения одной отдельно взятой инструкции. Например, в процессорах AMD K10 находятся одновременно три конвейера. На самом деле, несмотря на то что из-за такой архитектуры

Т а б л и ц а 4. Значения вычислительной способности и результаты оценки бенчмарком PassMark для современных процессоров

Название процессора	Тактовая частота, МГц	PassMark	$C(I)$, бит/такт	Вычислительная способность, Мбит/с
Pentium III	1266	270	42.022	53200.284
Pentium M	2000	495	51.198	102396.063
Core Solo T1350	1860	443	51.198	95228.339
Pentium IV	2600	405	39.660	103115.507
Core 2 Solo U3500	1400	479	68.847	96385.618
Core 2 Duo T7300	2000	1232	137.359	274717.863
AMD Phenom 9500 X4	2200	2242	211.192	464623.325

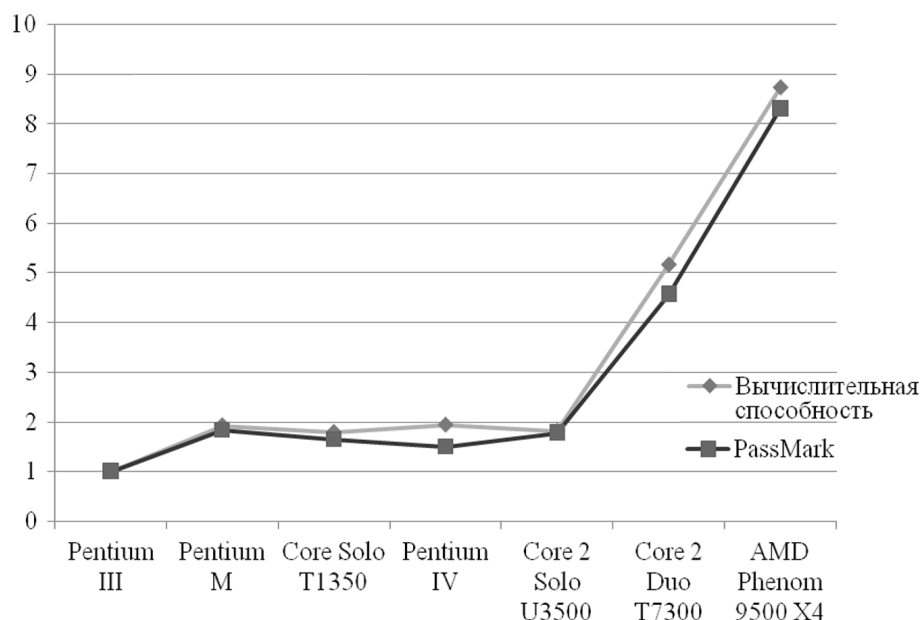


Рис. 4. Диаграмма сравнения вычислительной способности с бенчмарком PassMark для процессоров семейств Intel P6, P7, PM, Intel Core 2 и AMD K10

время выполнения операции увеличивается, её устройство проще, что позволяет существенно повышать тактовую частоту процессора и тем самым немного компенсировать разницу в производительности с процессорами Intel. Построив для этой архитектуры уравнение и решив его, получим $C(I) \approx 211.1924$ бит/такт для процессора AMD Phenom 9500 X4.

На рис. 4 приведены диаграммы процессоров Intel и AMD, которые сопоставляются при помощи вычислительной способности, при этом полученные результаты сравниваются со значениями бенчмарка PassMark (табл. 4). Так как обе характеристики имеют различные единицы измерения, то все процессоры оцениваются относительно первого в списке процессора Intel Pentium PIII. Как видно, предлагаемая характеристика является объективной и незначительно отличается от результатов бенчмарка.

4. Вычислительная способность суперкомпьютеров

Под суперкомпьютером мы подразумеваем вычислительную систему, производительность которой многократно превышает производительность обычных настольных компьютеров.

Имеется несколько основных типов архитектур суперкомпьютеров:

- 1) SMP — архитектура с общей физической памятью для нескольких процессоров;
- 2) MPP — архитектура с отдельной памятью;
- 3) смешанная архитектура — суть её заключается в том, что вычислительные узлы являются полноценными системами, построенными на SMP-архитектуре, которые в свою очередь объединены между собой при помощи MPP-архитектуры. На сегодня это самая распространённая архитектура.

Для оценки производительности суперкомпьютеров в настоящее время используются множество специализированных бенчмарков. С их помощью, как правило, определяют пригодность суперкомпьютера для решения того или иного типа задач. Объективных бенчмарков, которые оценивали бы все возможные задачи, на данный момент нет, к тому же их главный недостаток — необходимость в рабочей модели суперкомпьютера. Методика оценки теоретического максимума производительности, используемая повсеместно, в том числе и в двух основных рассматриваемых нами проектах, — является приближённой и сильно упрощённой. По сути теоретический максимум — это произведение количества процессорных ядер, которые используются в суперкомпьютере, на количество инструкций в такт, выполняемых одним ядром (эта информация обычно предоставляется производителем и не считается объективной).

Для сравнения в качестве основных были выбраны LINPACK (или G-HPL) — бенчмарк, основанный на решении суперкомпьютером системы линейных уравнений, и G-FFT — бенчмарк, основанный на преобразовании Фурье. Помимо этого в целях сравнения использован теоретический максимум.

Будем применять упрощённую модель и считать вычислительную способность как сумму вычислительных способностей всех узлов суперкомпьютера (при этом конфликты обращения различных процессоров к общей памяти не учитываются). Вместе с тем необходим учёт фактора как межузлового взаимодействия, так и взаимодействия узлов между собой. Если суперкомпьютер построен на архитектуре SMP, то будем считать, что это один компьютер со множеством процессоров и одной общей памятью. В этом случае для определения вычислительной способности достаточно знать лишь время обмена процессора с памятью данными, а для всех процессоров оно будет одинаковым.

Более интересной представляется архитектура MPP. Если у процессоров отдельная память, то они всё равно могут обращаться к содержимому памяти друг друга, однако этот процесс занимает определённое время. Поскольку по сути данная архитектура является сетью, то в зависимости от характеристик сети будет меняться и время обращения к памяти других процессоров/узлов. При построении уравнения необходимо учесть и это обстоятельство, и некоторые другие нюансы межузлового взаимодействия. Для решения указанной проблемы был использован так называемый сетевой процессор — некоторое виртуальное устройство, объединяющее все команды передачи и получения данных между узлами. Зная время передачи пакета данных по сети, время его построения и минимальный и максимальный размеры, для такого процессора можно построить систему различных команд и определить его вычислительную способность. Далее, чтобы помимо производительности одного узла учитывать также его

взаимодействие с другими узлами, к вычислительной способности узла будем прибавлять вычислительную способность сетевого процессора.

Для проверки предлагаемой характеристики полученные результаты сравнивались с результатами проектов TOP500 и HPCC. Рассмотрим сначала проект TOP500. В нём для оценки суперкомпьютеров используются теоретический максимум и бенчмарк LINPACK. В табл. 5 приведены технические характеристики исследуемых суперкомпьютеров.

Диаграмма сравнения вычислительной способности и бенчмарков суперкомпьютеров TOP500 представлена на рис. 5. Как видно, вычислительная способность, несмотря на схожесть с теоретическим максимумом, далеко не всегда с ним совпадает, приближаясь

Т а б л и ц а 5. Технические характеристики суперкомпьютеров из списка TOP500

Название суперкомпьютера	Тип процессора	Тактовая частота, МГц	Количество узлов	Количество процессоров в узле	Количество памяти в узле, Мб	Тип сети
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

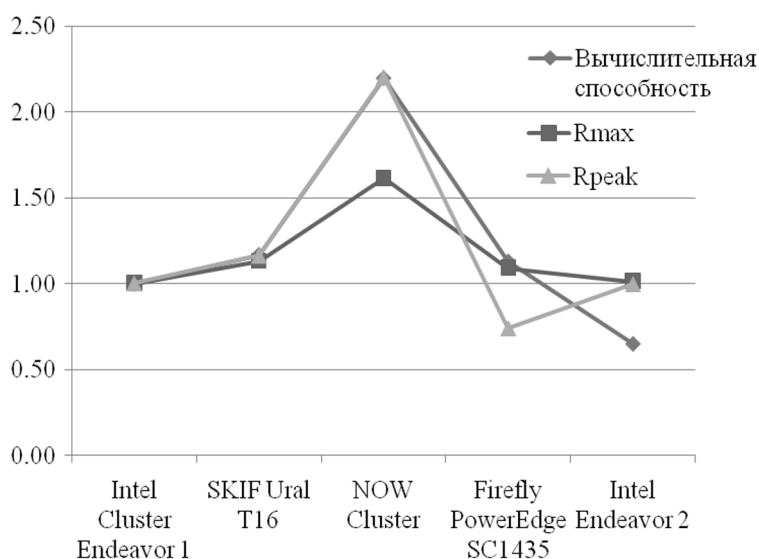


Рис. 5. Диаграмма сравнения вычислительной способности и бенчмарков при оценке производительности суперкомпьютеров из списка TOP500; R_{max} — значение бенчмарка, R_{peak} — теоретический максимум

к значению бенчмарка, а иногда не совпадая ни с тем, ни с другим. Это указывает на самостоятельность данной характеристики, а если учесть, что бенчмарк является узконаправленной задачей и не отражает способность системы решать все виды задач, то предложенная характеристика может быть более точной и объективной.

Чтобы подтвердить объективность вычислительной способности как характеристики производительности суперкомпьютеров, сравним её с результатами второго проекта НРСС. В табл. 6 приведены технические характеристики суперкомпьютеров, используемых для сравнения. Здесь теоретический максимум вычисляется по той же формуле, что и в случае TOP500, G-HPL основан на бенчмарке LINPACK, а G-FFT — на алгоритме быстрого преобразования Фурье. Описание всех формул и алгоритмов дано на сайтах проектов [7, 8].

Из рис. 6 видно, что среди рассмотренных характеристик вычислительная способность имеет усреднённое значение, что является вполне логичным. Вычислительная способность оценивает способность компьютера решать все возможные задачи, поэтому, если суперкомпьютер в одном типе задач даёт слабый результат, а в другом — достаточно сильный, то объективный показатель будет находиться где-то посередине, учитывая и слабые, и сильные стороны. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная характеристика применима для сравнения суперкомпьютеров и может стать хорошей заменой или дополнением для классического теоретического максимума.

Т а б л и ц а 6. Технические характеристики суперкомпьютеров из списка НРСС

Название суперкомпьютера	Количество процессоров	Вычислительная способность сетевого процессора, Мбит/с	Вычислительная способность суперкомпьютера, Мбит/с	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

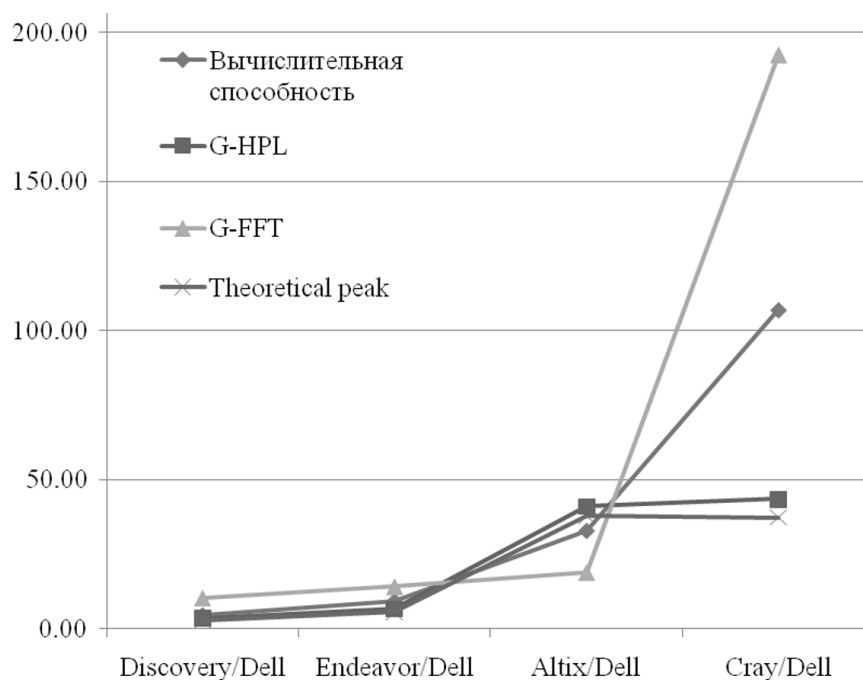


Рис. 6. Диаграмма сравнения вычислительной способности и бенчмарков при оценке производительности суперкомпьютеров из списка HPCC

Таким образом, результаты исследования показали, что вычислительная способность является достаточно объективной характеристикой и может быть использована как для оценки и сравнения уже существующих вычислительных систем, так и при создании новых процессоров. При наличии полной информации об архитектуре разрабатываемого процессора можно легко оценить его вычислительную способность и сравнить с уже существующими моделями. Кроме того, представленный метод может быть применён на этапе проектирования суперкомпьютеров, для выбора наиболее оптимальной архитектуры узлов и способа их соединения. Схожий процесс выбора архитектуры происходит и при выделении вычислительных ресурсов в облачной среде, что делает предложенный метод применимым в данной сфере.

Список литературы

- [1] РYАВКО В. An information-theoretic approach to estimate the capacity of processing units // Performance Evaluation. 2012. Vol. 69. P. 267–273.
- [2] SHANNON C.E. A mathematical theory of communication // Bell Sys. Tech. J. 1948. Vol. 27.
- [3] РАКИТСКИЙ А.А., РYАВКО Б.Я., ФИОНОВ А.Н. Программный комплекс для теоретической оценки и анализа производительности вычислительных систем // Материалы конф. “Индустриальные информационные системы”. Новосибирск, 2013.
- [4] РАКИТСКИЙ А.А. Практическое применение методов теоретической оценки вычислительной способности для процессоров Intel P5 // Вестник СибГУТИ. 2012. № 4. С. 50–61.
- [5] РАКИТСКИЙ А.А. Теоретическая оценка вычислительной способности процессоров Intel // Там же. 2013. № 3. С. 29–45.

- [6] ПРОГРАММА для определения вычислительной способности и уравнения всех исследованных процессоров. URL: <https://drive.google.com/folderview?id=0B023P6Ajk7nJckhpRmdGS1VtZlk> (дата обращения 10.10.2013).
- [7] TOP500. URL: <http://top500.org>
- [8] HPC Challenge Benchmark. URL: <http://icl.cs.utk.edu/hpcc/>
- [9] INTEL x86 Quick Reference Instruction Manual — 8086/80186/80286/80386/80486.
URL: <http://www.intel-assembler.it/portale/5/x86-instruction-reference-manual/x86-instruction-reference-manual.asp> (дата обращения 04.12.2012).
- [10] FOG A. The Microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs an Optimization Guide for Assembly Programmers and Compiler Makers. Copenhagen Univ. College of Eng. 2012.
URL: <http://www.agner.org/optimize/> (дата обращения 04.12.2012).
- [11] FOG A. Lists of instruction latencies, throughputs and microoperation breakdowns for Intel, AMD and VIA CPUs. Copenhagen Univ. College of Eng. 2012.
URL: <http://www.agner.org/optimize/> (дата обращения: 04.12.2012).
- [12] INTEL 64 and IA-32 Architectures Software Developers Manual. Vol. 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).
- [13] INTEL 64 and IA-32 Architectures Software Developers Manual. Vol. 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).

*Поступила в редакцию 27 ноября 2013 г.,
с доработки — 18 марта 2014 г.*