

Сравнительный анализ области применения тестовых задач оценки вычислительной мощности НРС систем¹

В.А. Васильев, А.Ю. Ницкий

Проведено экспериментальное сравнение производительности различных архитектур вычислительных узлов суперкомпьютеров на тестовых задачах HPL, NPB (NAS Parallel Benchmarks) и пользовательских тестовых задачах механики сплошной среды. Исследовано влияние используемых сетей межузловых соединений стандарта Infiniband и Ethernet 1G на тестах NPB и задачах механики сплошной среды.

Решение задач вычислительной гидроаэродинамики (ВГАД) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$Ax = f, \quad (1)$$

где A - матрица $m \times m$,

$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ - искомый вектор,

$f = (f_1, f_2, \dots, f_m)^T$ - заданный вектор.

Предполагается, что определитель матрицы A отличен от нуля, так что решение x существует и единственно.

При решении системы (1) используются прямые либо итерационные методы. Прямые или точные методы решения системы (1) характеризуются тем, что с их помощью принципиально возможно, проделав конечное число операций, получить точные значения неизвестных [1,2].

Итерационные методы, используемые в механике сплошных сред, состоят в том, что решение системы (1) находится как предел при $n \rightarrow \infty$ последовательных приближений x^n , где n - номер итерации. Как правило, за конечное число итераций этот предел не достигается. Обычно задается некоторое малое число $\varepsilon > 0$ (точность) и вычисления проводятся до тех пор, пока не будет выполнена оценка

$$\|x^{(n)} - x\| < \varepsilon \quad (2)$$

К итерационным методам решения систем линейных алгебраических уравнений можно отнести метод Якоби, методы Гаусса – Зейделя, метод верхней релаксации SOR, методы минимизации и т.д [3,4].

При решении сложных задач механики сплошных сред важным является оценка эффективности использования аппаратных и программных средств вычисления. В качестве инструмента такой оценки, как правило, используются различного рода тестовые задачи. Тестовые задачи можно разделить на три группы: тесты для оценки решения систем линейных уравнений прямыми методами (тесты Linpak [5] и связанные с ним тесты), тесты для оценки эффективности итерационных методов (NPB тесты – NAS Parallel Benchmark, здесь NAS – NASA Advanced Supercomputer division [6,7]) и пользовательские тесты для оценки эффективности итерационных методов, представляющие собой различные задачи ВГАД.

Тесты, основанные на прямых методах решения системы линейных уравнений

Использование классических тестов на основе алгоритма LINPAK не всегда оправдано, поскольку не дает возможности провести комплексную оценку эффективности архитектуры вычислительной системы. Поэтому для сложных систем предложен комплекс тестовых задач, каждая из которых (имеются в виду тестовые задачи) оценивает только одну из функций систе-

¹ Авторы статьи выражают благодарность официальному представителю Supermicro в России компании "Ниагара" (<http://www.niagara.ru>) за предоставленную вычислительную платформу на базе Supermicro X8DTH-6F на время проведения тестирования.

мы. Такой набор тестов предложен группой математиков под руководством Дж. Донгара и назван "HPC Challenge suite" [5]. Этот комплекс позволяет проводить исследование эффективности архитектуры HPC систем из списка Top500 как на уровне отдельного вычислительного ядра, так и системы (кластера) в целом осуществляя контроль доступа к памяти, и работу системы с высокопроизводительными алгоритмами типа Linpack (HPL). Разработанный набор программ "HPC Challenge suite" позволяет контролировать эффективность вычислений различных реальных приложений.

Набор состоит из нескольких известных вычислительных алгоритмов, реализованных программно: теста пропускной способности памяти STREAM, теста производительности операций с плавающей точкой HPL (основан на высокопроизводительном алгоритме Linpack – High Performance Linpack), теста перемножения матриц DGEMM, теста транспонирования матриц PTRANS, теста FFTE, реализующего алгоритм быстрого преобразования Фурье, теста RandomAccess, измеряющего скорость обновления ОЗУ по случайному адресу, и теста оценки полосы пропускания/времени ожидания в сети межузлового соединения, что позволяет оценить практически весь диапазон проблем, связанных с вычислительной эффективностью HPC систем.

Тесты, основанные на итерационных методах решения системы линейных уравнений NPB

При решении задач механики сплошной среды использование чистых тестовых задач, основанных на решении системы линейных алгебраических уравнений прямыми методами недостаточно для объективной оценки эффективности вычислительной системы уже хотя бы потому, что при решении задач гидроаэродинамики используются итерационные методы решения системы линейных алгебраических уравнений. В 90-е годы NASA были предложены специальные тестовые задачи, основанные на итерационных методах. В настоящее время существует целый комплекс тестов контроля эффективности параллельных вычислений - сокращенно NPB [6-8].

Тестовые задачи используют алгоритмы итерационных методов, применяемых при решении систем линейных алгебраических уравнений. С точки зрения гидродинамических задач можно выделить три теста: LU, SP, BT. Алгоритмы SP (от Scalar Pentadiagonal) и BT (от Block Tridiagonal) представляют собой решение трех несвязанных систем уравнений (в направлениях x, y и z). Отличие приложений состоит в структуре матриц: для SP — это пятидиагональная матрица, а для BT — блочная трехдиагональная матрица с размером блока 5x5.

Тестовая задача LU решает систему уравнений с равномерной разреженной блочной структурой (5x5) методом симметричной последовательной верхней релаксации (symmetric successive over-relaxation — SSOR). Последняя тестовая задача наиболее близка задачам вычислительной гидроаэродинамики.

Одним из ограничений в использовании тестов LU NPB является требование количества процессов решателя – данный тест можно запускать на 2^x вычислительных ядрах, где x - целое число 0, 1 2 и т.д. Кроме того, размеры матриц тестовых задач фиксированы и разделены на несколько классов, которые приведены в таблице 1. Класс А - это самая маленькая тестовая задача, класс D и E соответствует сверхбольшим задачам гидроаэродинамики. Эти условия несколько затрудняют исследование влияния различной архитектуры на эффективность вычислений, так как не всегда возможно подобрать размер задачи под число вычислительных ядер кластера. Следует отметить, что существуют как MPI, так и OpenMP версии тестов, в данной работе использовалась версия NPB-3.3-MPI с применением библиотеки OpenMPI 1.3.1.

Таблица 1. Классы тестовых задач NPB

Тест	Класс А	Класс В	Класс С	Класс D	Класс E
LU	$64^3 =$	$102^3 =$	$162^3 =$	$408^3 =$	$1024^3 =$
SP	262 144	1 061 208	4 330 747	67 917 312	1 073 741 824
BT					

Пользовательская тестовая задача гидродинамики тонкого турбулентного слоя

При решении больших и сверхбольших задач механики сплошной среды важным вопросом является оценка эффективности работы конкретного пакета программ на многопроцессорных и многоядерных вычислительных системах. Для проведения такой оценки могут быть использованы тесты на основе пользовательских задач. В качестве тестовой использована задача гидродинамики тонкого турбулентного слоя, описанные в работах [9,10]. При решении стационарной задачи гидродинамики использовался пакет OpenFOAM 1.6 с решателем "simpleFoam" совместно с "k-ε" моделью турбулентности, ставшей промышленным стандартом. В основе этого решателя лежит ставший классическим метод SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Используемая задача, благодаря своей специфике, может быть легко увеличена до значительных размеров - решены задачи с размером вычислительной сетки 30 миллионов узлов. Одновременно с этим, задача в двумерной осесимметричной постановке может быть достаточно небольшой, до 20000-40000 узлов сетки. Это позволяет использовать задачу гидродинамики тонкого слоя для оценки эффективности как больших систем, с числом вычислительных ядер более 1000, так и малых систем, вплоть до отдельных узлов кластера, состоящего из двух многоядерных процессоров.

Сравнительный анализ использования различных тестов при оценке узлов кластера с различной архитектурой процессоров.

Сравнительный анализ проведен для двухпроцессорных вычислительных систем, предлагаемых фирмой Supermicro, с использованием различных процессоров: Intel Xeon E5520 (Nehalem), AMD Opteron 2427 (Istanbul), AMD Opteron 2354 (Barcelona) и двухъядерных AMD Opteron 2216, а также на базе двухпроцессорного узла кластера СКИФ Урал с процессорами фирмы Intel Xeon X5472 (Narpertown).

Результаты расчетов приведены на рис. 1-4. На рис. 1 показаны данные, полученные с использованием теста HPL. Здесь эффективность вычислительных систем практически пропорциональна тактовой частоте и количеству вычислительных ядер процессора. На рис. 1 приведены производительности в абсолютных величинах (Гигафлоп) одного вычислительного ядра, половины, и максимально возможного количества ядер для каждой платформы (4 – для AMD Opteron 2216, 12 – для AMD Opteron 2427, 8 – для остальных систем). Максимальную производительность показала система на базе шестиядерного процессора фирмы AMD. Благодаря большему количеству вычислительных ядер (2 x 6 ядер 2,2 ГГц) и хорошей масштабируемости теста HPL, новейший процессор AMD Opteron 2427 показал лучшие результаты, чем четырехъядерные процессоры фирмы Intel. Xeon E5520 отстает от процессора Xeon X5472 за счет более низкой тактовой частоты (2,27 ГГц против 3,0 ГГц Xeon X5472). В общем процессоры Intel показывают существенно лучшие результаты, чем двух и четырехъядерные процессоры AMD.

Результаты, полученные при использовании пользовательского теста на малой задаче (46 218 узлов, 29 204 элементов, осесимметричная постановка), приведены на рис. 2. Для задачи гидродинамики тонкого турбулентного слоя самым эффективным оказался процессор фирмы Intel Xeon E5520. Имея меньшую тактовую частоту, чем процессор предыдущего поколения Xeon X5472, производительность его выше почти в два раза. Измерения с использованием пользовательского теста не дают абсолютных значений производительности в операциях с плавающей точкой в секунду (Гигафлоп), для оценки производительности необходимо сравнивать количество итераций в минуту производимых той или иной платформой. Как видно из рис. 2, вычислительные платформы на базе процессоров фирмы AMD существенно эффективнее процессора Xeon X5472, но уступают процессору фирмы Intel Xeon E5520. После появления нового процессора фирмы Intel он стал явным лидером для решения задач вычислительной гидроаэродинамики.

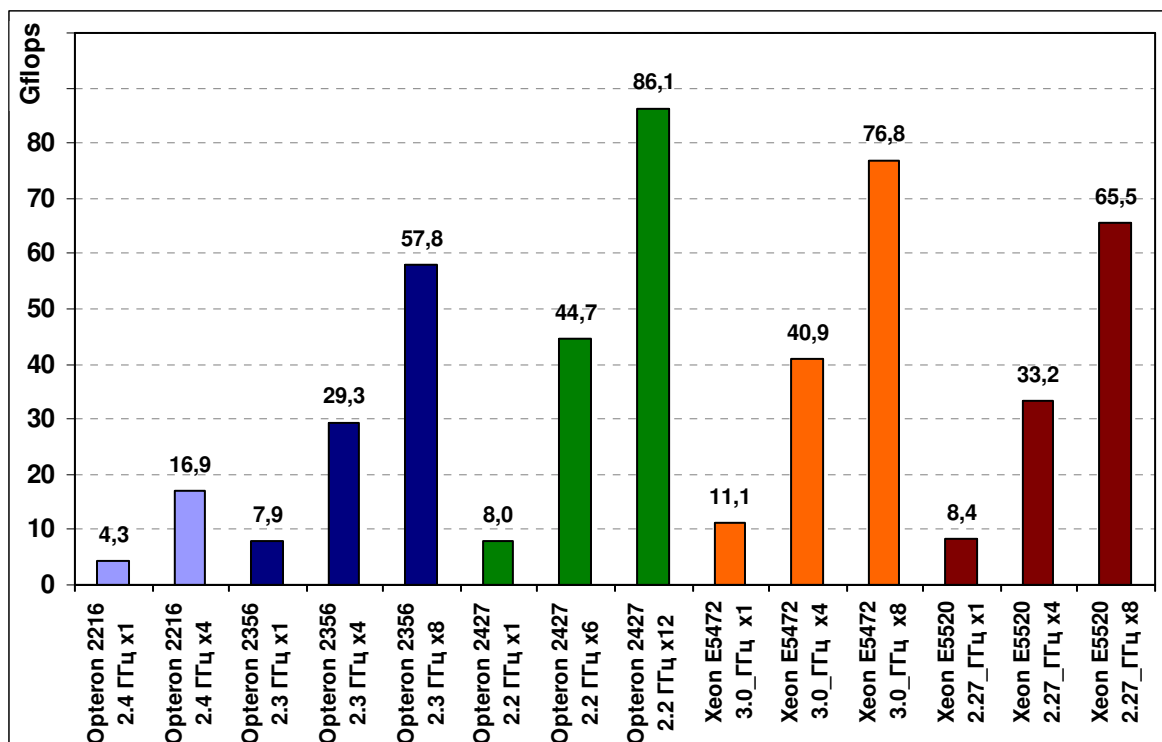


Рис. 1. Результаты тестирования производительности различных платформ на тесте HPL

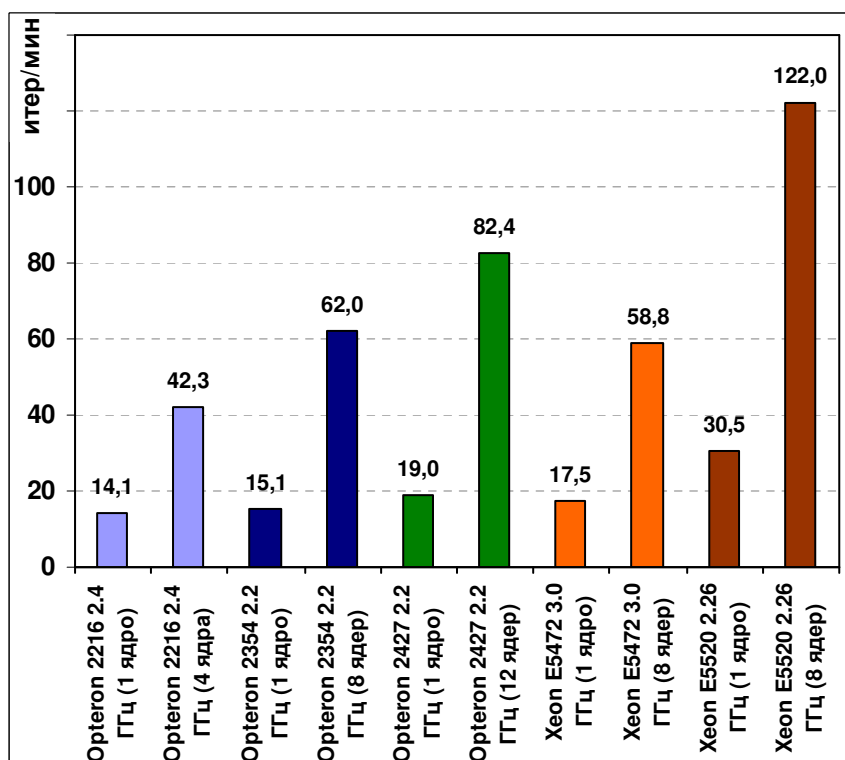


Рис. 2. Производительность различных платформ при решении малой задачи ВГАД

Аналогичные результаты были получены при использовании тестовых задач NPВ. На рис. 3. приведены абсолютные значения производительности (в гигафлопах), полученных на задачах различного размера (А, В, С) с применением теста LU. Тесты класса D и E внутри одного узла провести не представляется возможным ввиду существенных требований к объему ОЗУ, более 9 Гб.

Следует отметить, что уровень производительности, получаемый на тестах NPB, не соответствует гигафлопам HPL: на тесте HPL максимальное быстродействие ~85 гигафлоп для платформы на процессорах Istanbul, однако максимальное быстродействие на той же платформе не превышает 8 гигафлоп на тесте LU. Кроме того, масштабируемость теста LU отлична от практически линейной масштабируемости HPL и в большей степени соответствует поведению платформ на задаче ВГАД.

На рис. 4 приведены величины быстродействия LU в относительных величинах на 1 ГГц тактовой частоты. Вычислительная эффективность процессора Xeon E5520 на тестах NPB в два раза выше эффективности существующих платформ фирмы AMD и платформы Intel с процессорами предыдущего поколения.

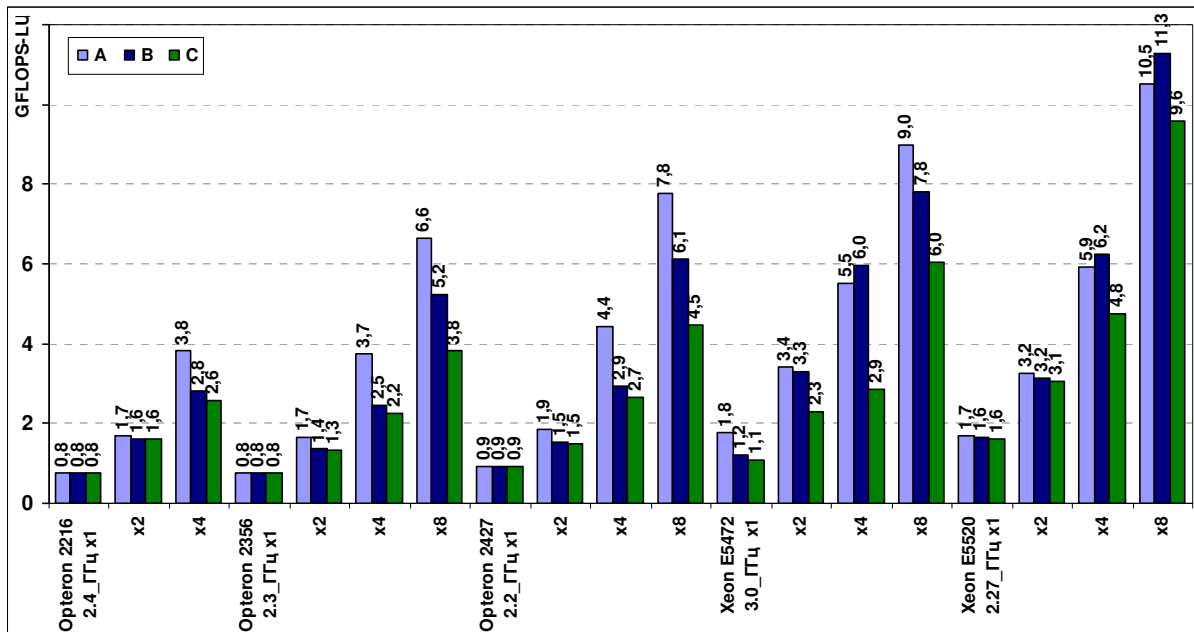


Рис. 3. Производительность различных платформ на тестах NPB LU для классов задач А, В и С

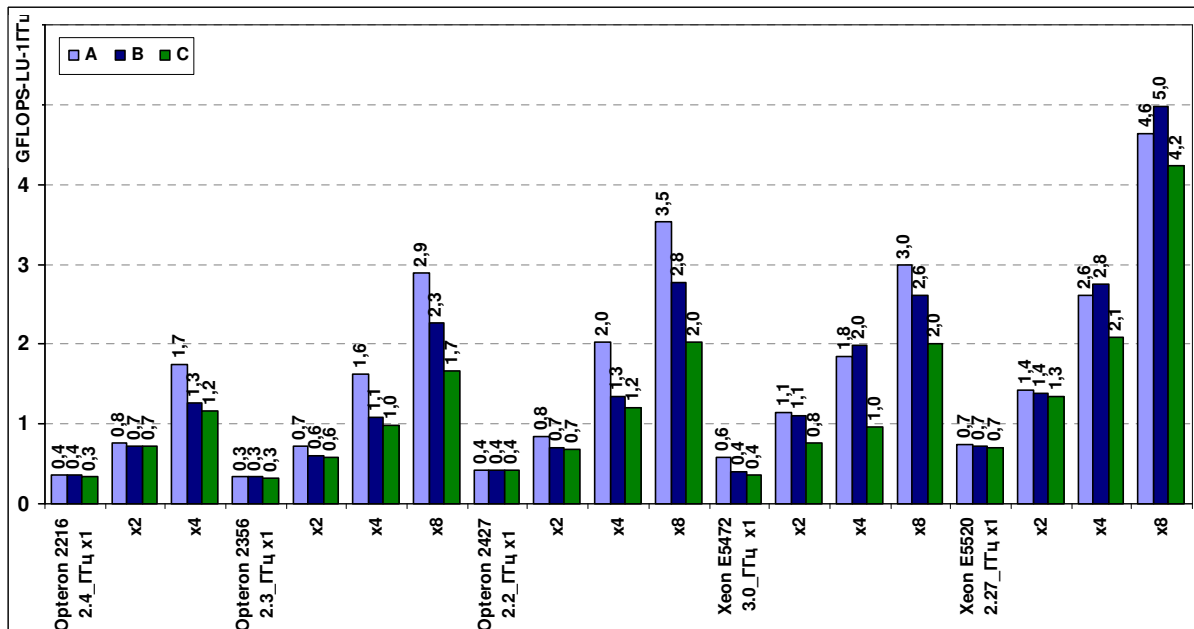


Рис. 4. Удельная производительность различных платформ на тестах NPB LU в пересчете на 1 ГГц

Сравнительный анализ эффективности использования сети Infiniband и Ethernet 1G кластера СКИФ Урал на тестах NPВ и задачах ВГАД

Особый интерес представляет оценка влияния интерконнекта на вычислительную эффективность кластера. Использование медленной, но дешевой сети Ethernet, позволяет строить достаточно большие кластеры, входящие даже в список TOP500. При этом кластеры, использующие эту вычислительную сеть, имеют показатели производительности на тесте NPВ десятки терафлоп. Например, кластеры фирмы Hewlett Packard с пиковой производительностью 46128 и 46272 гигафлоп, использующие сеть Ethernet, занимают соответственно 330 и 329 позицию в списке TOP500. Кластеры фирмы IBM занимают позиции с 331 по 359, имея пиковую производительность от 87221 до 53626 гигафлоп и производительность на тесте Linpak на уровне 24670 гигафлоп.

Кластер СКИФ Урал ЮУрГУ имеет в своем составе две вычислительные сети: Infiniband DDR и Gigabit Ethernet, что позволило провести сравнительный анализ с использованием тестовых прогонов как на сети Infiniband, так и сети Gigabit Ethernet. Расчеты проводились на 32 узлах кластера с использованием тестов NPВ для задач класса А, В, С и D (использование класса D возможно от 8 процессов из-за ограничения используемого компилятора Фортран на размер массива данных). Результаты расчетов сведены в таблицы 1 и 2: таблица 1 содержит данные полученные для производительности и ускорения отдельно для классов задач А, В, С и D с использованием сети Infiniband, таблица 2 - для сети Ethernet. Для каждого класса задач приведено графическое представление результатов расчета для производительности и ускорения.

Полученные результаты показывают связь производительности кластера с размером задачи, числом узлов вычислительной сети и числом используемых вычислительных ядер внутри узла кластера (process per node - PPN). Влияние загрузки вычислительных ядер внутри узла кластера подробно исследовано в работах [11-13].

Влияние типа вычислительной сети на производительность кластера на задачах различного размера приведено на рис. 5 (для сравнения здесь использованы максимальные производительности вне зависимости от количестве используемых ядер на разных интерконнектах при заданном количестве вычислительных узлов). На задачах класса D, большого размера, производительность вычислительной сети Ethernet при использовании до 32 узлов составляет 0,8-0,9 от производительности кластера с использованием сети Infiniband. При уменьшении размера задачи эффективность использования сети Ethernet существенно снижается. На задачах класса С использование 32 узлов вычислительной сети Ethernet дает производительность, равную половине от производительности на сети Infiniband. Класс задач С соответствует задачам вычислительной гидроаэродинамики с размером расчетной сетки порядка ~ 4 млн. элементов.

Таким образом, на производительность кластера влияет несколько взаимосвязанных факторов: производительность узла кластера, количество используемых ядер на узле, размеры задачи, производительность интерконнекта. Данные, приведенные в таблицах 1 и 2, позволяют рассмотреть влияние интерконнекта независимо от влияния остальных факторов. На рис. 6 и 7 приведено ускорение, полученное на 2-32 узлах кластера СКИФ Урал на тесте NPВ LU (class C), вычисленное относительно производительности одного узла с использованием вычислительных ядер от 1 до 8 на одном и на N узлах.

При использовании сети Infiniband (рис.6) характерно сверхлинейное ускорение для 32 узлов для любого количества используемых ядер. При работе с сетью Ethernet 1G (рис.7) также наблюдается сверхлинейное ускорение, но только при загрузке узла кластера до четырех ядер. При полной загрузке узла кластера (8 ядер) линейное ускорение сохраняется только на 8 узлах сети. На 32 узлах производительность Ethernet достаточна только при количестве используемых ядер ≤ 4 . Вследствие этого на Ethernet не достигается максимальная производительность, как на Infiniband при количестве используемых ядер, равном 8, и происходит падение относительной производительности при до 47% на 32 узлах (рис. 5).

Список TOP50 для задач вычислительной гидроаэродинамики

Результаты тестирования СКИФ Урал с использованием классических HPL тестов и тестов NPВ показали возможность использования последних для оценки вычислительной эффективности кластера на задачах вычислительной гидроаэродинамики. Данные, полученные на различных платформах с использованием процессоров различных производителей показывают, что наиболее эффективной в настоящее время являются системы, построенные с использованием процессоров последнего поколения фирмы Intel - Xeon 55xx (архитектура ядра Nehalem). На момент написания статьи в списке TOP50 отсутствовали кластеры, построенные на базе процессоров Nehalem, хотя эти кластеры уже введены в эксплуатацию и появились в списке TOP500.

Таблица 1. Производительность 32 узлов кластера СКИФ Урал на тесте NPВ, Infiniband DDR

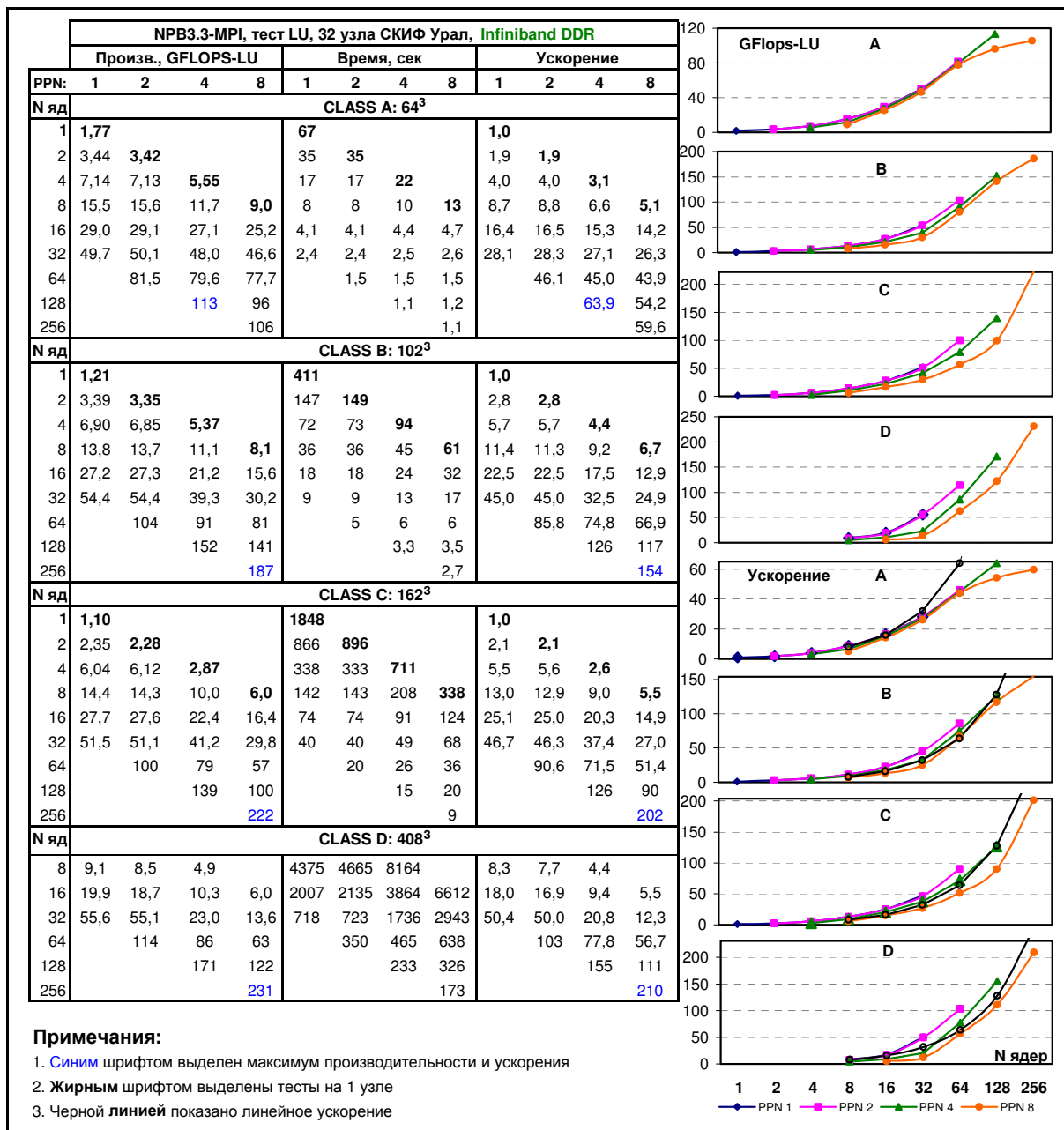


Таблица 2. Производительность 32 узлов кластера СКИФ Урал на тесте NPV, Ethernet 1G

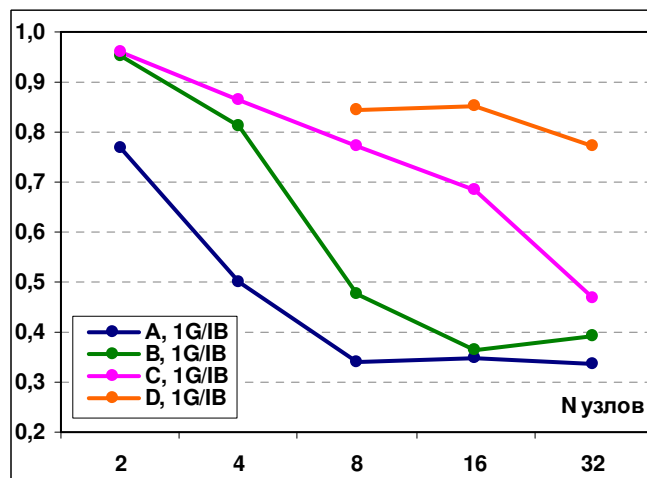
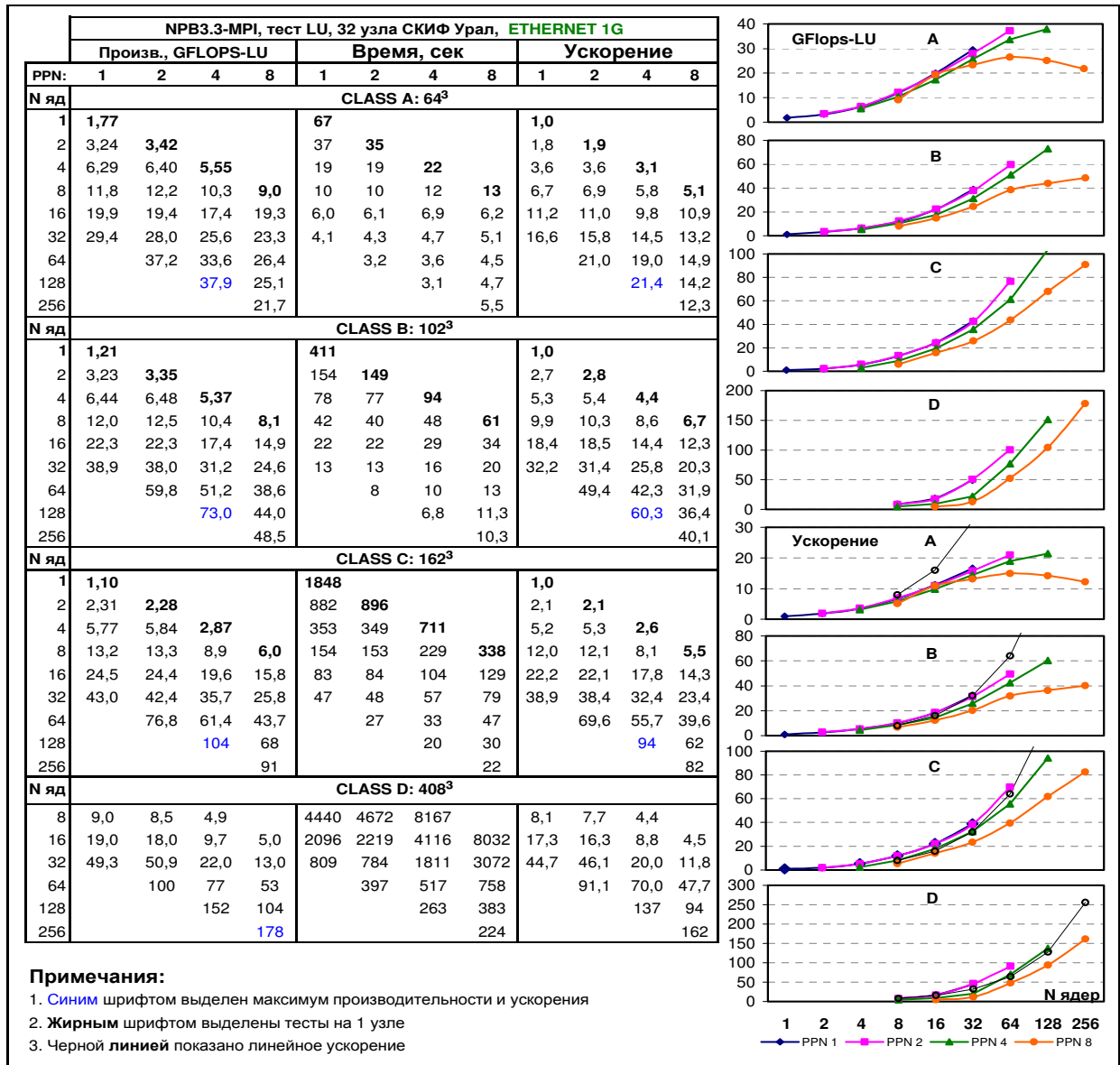


Рис. 5. Относительная производительность (Gigabit Ethernet/Infiniband) для задач различного размера в зависимости от количества вычислительных узлов

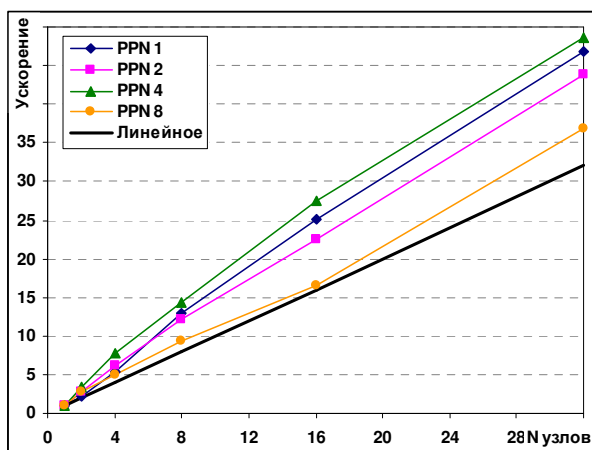


Рис. 6. Ускорение на узлах с Infiniband относительно производительности одного узла в зависимости от количества используемых ядер, NPB LU (C)

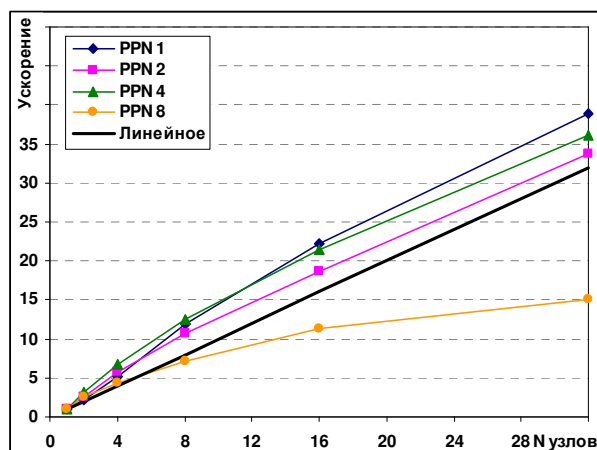


Рис. 7. Ускорение на узлах с Ethernet относительно производительности одного узла в зависимости от количества используемых ядер, NPB LU (C)

Для дальнейшего анализа построим ориентировочный список TOP50 суперЭВМ СНГ применительно к задачам ВГАД, смоделировав его на основе списка TOP500 ноября 2009. В список TOP500 2009 года уже включены новейшие суперЭВМ России, такие как "Ломоносов" (МГУ) и СКИФ Аврора (ЮУрГУ). Модельный список TOP50 приведен в таблице 3. В этой таблице 4 и 5 позиции занимают кластеры, использующие в своем составе сеть Gigabit Ethernet. Остальные используют либо сеть Infiniband или более производительные сети.

Принимая во внимание, что процессоры Nehalem в два раза более производительны на задачах ВГАД, чем процессоры предыдущих поколений, и тот факт, что сеть Gigabit Ethernet эффективна лишь на 8-16 узлах, можно предложить первые десять самых производительных кластеров модельного списка TOP50 CFD 2010 года (таблица 4) на основе тестов задач ВГАД.

Здесь первое место по прежнему занимает кластер Ломоносов МГУ, но с эквивалентной производительностью 700,2 терафлоп. Кластер СКИФ Аврора ЮУрГУ занимает 4 позицию с эквивалентной производительностью 43,68 терафлопа. На десятой позиции кластер Росгидромет (Москва) с производительностью 16,03 терафлоп. Кластеры с сетью Gigabit Ethernet в списке отсутствуют, поскольку на задачах вычислительной гидроаэродинамики эффективно можно использовать лишь до 16 (до 32х для сверхбольших задач) вычислительных узлов из общего количества.

Таблица 3. Список TOP50 СНГ 2010

№	Организация	Вычислительная платформа	Произв-ть HPL	Пиковая произв-ть	Тип интерконнекта
1	Москва, МГУ "Ломоносов", 2009 г.	2xXeon 55xx	350100	414419	Infiniband
2	Москва, МСЦ РАН	4xXeon 54xx	107448	140160	Infiniband
3	Москва, МГУ, "Чебышев", 2008 г.	2xXeon 54xx	47320	60000	Infiniband
4	Banking, 2009 г.	2xXeon 55xx	38097	66792	Ethernet 1G
5	Government, 2009 г.	2xXeon E5570	32648	57238	Ethernet 1G
6	Москва, РИЦ Курчатовский институт, 2008 г.	2xXeon 5345	25080	34268	Infiniband
7	Москва, МГУ, 2008 г.	IBM Power PC 850	23215	27600	
8	Челябинск, ЮУрГУ, СКИФ Аврора, 2009 г.	2xXeon 55xx	21840	24002	3D top, Infiniband
9	Уфа, УГАТУ, 2007 г.	2xXeon 5345	15328	19858	Infiniband
10	Москва, Росгидромет, 2008 г.	16xOpteron 8356	14508	18841	Infiniband

Таблица 4. Список TOP50 CFD 2010

№	Организация	Вычислительная платформа	Произв-ть HPL	Пиковая произв-ть	Тип интерконнекта
1	Москва, МГУ "Ломоносов", 2009 г.	2xXeon 55xx	350100 эквивалентная по тесту CFD 700200	414419	Infiniband
2	Москва, МСЦ РАН	4xXeon 54xx	107448	140160	Infiniband
3	Москва, МГУ, "Чебышев", 2008 г.	2xXeon 54xx	47320	60000	Infiniband
4	Челябинск, ЮУрГУ, СКИФ Аврора, 2009 г.	2xXeon 55xx	21840 эквивалентная по тесту CFD 43680	24002	3D top, Infiniband
5	Москва, РИЦ Курчатовский институт, 2008 г.	2xXeon 5345	25080	34268	Infiniband
6	Москва, МГУ, 2008 г	IBM Power PC850	23215	27600	
7	Уфа, УГАТУ, 2007 г.	2xXeon 5345	15328	19858	Infiniband
8	Таганрог, РОЦ НИТ	16xOpteron 8356	14508	18841	Infiniband
9	Киров, ВГУ	2xXeon 5345	13957	17894	Infiniband
10	Москва, Росгидромет, 2008 г.	Xeon E5440	13680	16029	Infiniband

Выводы

Оценка эффективности мощных вычислительных систем может быть проведена различными тестовыми задачами: тестами на основе прямых методов решения системы линейных уравнений, тестами на основе итерационных методов и пользовательскими тестовыми задачами.

Тесты на основе прямых методов (тесты LINPAK) являются стандартными тестами оценки эффективности кластерных систем списка TOP 500 и TOP50, но не отражают производительности различных систем на задачах ВГАД и других инженерных задачах [14].

Тесты на основе итерационных методов (тесты NPВ) – специальные тесты оценки эффективности решения больших и сверхбольших задач механики сплошной среды на кластерных вычислительных системах, позволяющие проводить тестирование как отдельных вычислительных узлов, так и систем в целом, с учетом влияния интерконнекта.

Вычислительные системы, построенные на базе новых процессоров фирмы Интел архитектуры Nehalem при равной пиковой производительности имеют в два раза большую производительность на задачах ВГАД по сравнению с системами, построенными на процессорах фирмы AMD или Intel предыдущего поколения.

При построении списка TOP50 СНГ с использованием тестов NPВ можно получить более точную оценку эффективности кластеров на задачах ВГАД и существенную перестановку списка по производительности.

Литература

1. И.С. Березин, Н.П. Жидков Методы вычислений, т2 – М.:Наука, 1962, 639 с.
2. А.А. Самарский, А.В. Гулин, Численные методы – М.:Наука, 1985, 430 с.
3. Дж. Ортега Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем, М.:Мир, 1991, 364 с.
4. H.R. Schwarz, N. Kloeckler Numerische Mathematik, 7 Auflage - Vieweg+Teubner, 2009, 586 с.
5. Jack J. Dongarra, Piotr Luszczyk, Antoine Petitet. The LINPACK benchmark: Past, present, and future // Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2003, 15:1–18.
6. D. H. Bailey, E. Barszcz, J. T. Barton, D. S. Browning, R. L. Carter, L. Dagum, R. A. Fatoohi, P. O. Frederickson, T. A. Lasinski, R. S. Schreiber, H. D. Simon, V. Venkatakrishnan, S. K. Weeratunga The NAS Parallel Benchmarks, International Journal of Supercomputer Applications, Vol 5, No.3 (Fall1991), pp. 63-73.

7. D. H. Bailey, J. Barton, T. Lasinski, and H. D. Simon, eds. The NAS Parallel Benchmarks // NASA Technical Memorandum 103863, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035-1000, July 1993.
8. Rob van der Wongaart. The NAS Parallel Benchmarks 2.4. Report NAS-02-007, October, 2002.
9. Васильев В.А., Ницкий А.Ю. Практика решений задач вычислительной гидродинамики тонких турбулентных слоев в щелевых уплотнениях питательных насосов на суперкомпьютерах и в распределенных вычислительных средах // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009): Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. -С. 72-81
10. Васильев В.А., Ницкий А.Ю., Крапошин М.В., Юскин А.В. Исследование возможности параллельных вычислений задач гидроаэродинамики с использованием открытого пакета программ OpenFOAM на кластере СКИФ Урал ЮУрГУ // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2010): Труды международной научной конференции (Уфа, 30 марта - 3 апреля 2010 г.)
11. М.В. Кудрявцев, В.В. Мошкин, М.А. Полуниин, Л.К. Эйсымонт Оценочное тестирование кластеров на базе процессоров AMD Barcelona и Shanghai с сетями Infiniband DDR и QDR // Вычислительные методы и программирование. 2009, т. 10, стр. 69-77.
12. А.В. Снытников Сравнительный анализ производительности кластерных суперЭВМ на примере задачи о релаксации электронного пучка в высокотемпературной плазме // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2010): Труды международной научной конференции (Уфа, 30 марта - 3 апреля 2010 г.)
13. В.А. Васильев, А.Ю. Ницкий Исследование масштабируемости задач вычислительной гидроаэродинамики на различных многоядерных и многопроцессорных архитектурах. // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2010): Труды международной научной конференции (Уфа, 30 марта - 3 апреля 2010 г.)
14. Результаты тестов ANSYS Benchmark Suite , интернет-ресурс <http://ansys.com>.