

УДК 004.272.43

**МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**С.А. Сорокин,
М.З. Бененсон[@],
А.П. Сорокин**

*АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева», Москва 117437, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: mz_ben@mail.ru*

Статья посвящена оценке производительности гетерогенных вычислительных комплексов (платформ). В ней обоснована актуальность использования проблемно-ориентированной конфигурации вычислительных комплексов для автоматизированных систем обработки информации и управления. Предложен механизм параллельно-конвейерной обработки данных, позволяющий повысить быстродействие системы. Для организации взаимодействия между модулями предложено использовать MPI-интерфейс передачи сообщений между процессами, выполняющими одну задачу. Измерение производительности выполнено с помощью общепризнанных тестовых наборов Intel «MPI Benchmark» и «HPLINPACK», которые позволяют максимально полно оценить эффективность вычислительной системы и ее соответствие задачам пользователя. Приведены графики производительности гетерогенного вычислительного комплекса «МВП», полученные при решении сложных задач линейной алгебры. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения «МВП» для решения различных прикладных задач.

Ключевые слова: вычислительная система, тест производительности, оценка производительности, управление параллелизмом операций, характеристики вычислительных систем.

**METHODS FOR EVALUATING THE PERFORMANCE
OF HETEROGENEOUS COMPUTER SYSTEMS**

**S.A. Sorokin,
M.Z. Benenson[@],
A.P. Sorokin**

*M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems, Moscow 117437, Russia
[@]Corresponding author e-mail: mz_ben@mail.ru*

Article is devoted to the performance evaluation of heterogeneous computing systems (platforms). The article substantiates the relevance of the use of problem-oriented configuration of computational systems for automated systems of information processing and management. The proposed mechanism is parallel and pipeline processing allowing to parallelize the task and thereby improve system performance. For interaction between modules it was proposed to use MPI-message passing interface between processes that perform a single task. The performance measurement was performed using recognized test kits Intel "MPI Benchmark" and "LINPACK HPL", which allow to fully assess the effectiveness of the computing system and its relevance for the user. Given the graphics performance of the heterogeneous computing complex "profit center" in dealing with complex problems of linear algebra. The results obtained confirm high efficiency of MVP for various applications.

Keywords: computing system, benchmark, estimation of computer systems performance, control of operation parallelism, characteristics of computer systems.

В последние годы широко и все более быстрыми темпами осуществляется разработка, выпуск и внедрение в автоматизированные системы обработки информации и управления разнообразных многопроцессорных вычислительных систем (платформ). Такие вычислительные системы отличаются повышенной гибкостью и характеризуются высокими показателями производительности, надежности и живучести. Актуальной задачей является разработка для них тестового программного обеспечения, которое позволяет определить исправность и функциональные характеристики системы.

Как известно [1], программирование для многопроцессорных систем связано с распараллеливанием и синхронизацией вычислений. Это выдвигает целый ряд сложных задач, среди которых наиболее важными представляются расчет характеристик времени, требующегося для выполнения параллельных программ на многопроцессорных вычислительных системах, и вычисление производительности таких систем.

В настоящее время в отечественных вычислительных системах типа «Эльбрус» [2] (разработчик и производитель АО «МЦСТ»), вычислительной платформе «ГРИФОН» [3] (разработчик ЗАО «Доломант») и вычислительной платформе «МВП» [4] (разработчик АО «НИИВК им. М.А. Карцева») широко используются параллельные методы обработки информации.

Гетерогенные вычислительные системы

Гетерогенным вычислительным системам сегодня уделяется большое внимание, поскольку эти системы, состоящие из вычислителей различной архитектуры, производят вычисления более эффективно, чем однородные системы, архитектура которых предназначена для решения конкретной задачи.

Предлагаемая нами многопроцессорная вычислительная платформа (МВП) рассчитана на построение вычислительных систем широкого спектра применения, а также систем, нацеленных на решение конкретных прикладных задач.

В МВП могут входить модули, созданные на основе микропроцессоров общего назначения (x86, «Эльбрус», «Байкал»), модули графических процессоров NVIDIA и вычислительные модули, созданные на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Создание проблемно-ориентированной конфигурации МВП достигается,

исходя из максимальной эффективности выполнения алгоритмов решаемых пользователем задач, за счет выбора и установки в вычислительную платформу необходимого набора модулей [4].

В основе концепции МВП лежит решение, позволяющее на одной шине объединять процессорные модули, построенные на базе разнородных архитектур. Связь между процессорами осуществляется через открытый стандарт PCI Express [3] с помощью модуля коммутации KIC551. В аппаратуру МВП входит набор вычислительных модулей CPC512 отечественного производства с архитектурой x86, созданных на базе четырехъядерного процессора Intel Ivy Bridge, с установленной оперативной памятью 8 Гбайт. В качестве графических процессоров использованы модули VIM556 отечественного производства, реализованные на базе высокопроизводительной графической карты NVIDIA Quadro K2100M. В качестве базового программного обеспечения в МВП установлена ОС «Linux Debian 7» с драйверами, реализующими для шины PCI Express технологию TCP/IP. Эти драйверы создают между процессорами стандартное сетевое (Ethernet) соединение, обеспечивающее транспорт пакетов по шине PCI Express, и позволяют работать с контроллером шины PCI Express таким же образом, как с обычной сетевой картой.

Использование гетерогенных вычислительных платформ для решения прикладных задач

В качестве прикладной задачи рассмотрим программу обработки изображений, поступающих по каналам связи от разнородных специализированных информационных систем [5]. Программа должна работать в режиме жесткого реального времени.

Эта задача была реализована нами на основе концепции создания многомодульной архитектуры, в которой несколько вычислительных модулей с разнородной архитектурой могут параллельно обрабатывать информационные потоки. Элементы технологий машинного зрения представляют собой взаимосвязанную технологическую последовательность, которая включает в себя следующие звенья:

- получение изображения от видеокамеры;
- обработку (оцифровку) изображения;
- логический анализ цифрового изображения;
- выделение нужной информации;
- перемещение камеры в пространстве.

Видеокамера и устройство обработки изображения являются главными составляющими системы машинного зрения, их объединяет термин «техническое зрение». Для подобных систем характерно наличие нескольких потоков структурно-разнородных данных (в первую очередь, это видеопотоки от камеры высокого разрешения), необходимость приема данных в нестандартных форматах, необходимость максимизации быстродействия для отработки сценариев по предназначению системы в режиме реального времени. Для обработки каждого из потоков данных целесообразно использовать ту архитектуру, которая будет эффективнее.

Выбор конкретной гетерогенной конфигурации обусловлен комплексом исходных технических требований, типом данных и режимов их обработки. На базе МВП представляется возможным осуществлять конвейерную обработку данных с применением

гетерогенной архитектуры. Идея использования гетерогенных вычислительных конвейеров заключается в том, чтобы на каждом этапе последовательной обработки (участке конвейера) обработчик, выполнив свою работу, передал результат для дальнейшей обработки на следующий участок конвейера для обработки вычислителем другой архитектуры, и одновременно принял новый объем входных данных для следующей итерации цикла конвейерной обработки.

Исходя из постановки задачи, сначала был сконфигурирован аппаратный состав гетерогенного вычислителя, включающего в себя модуль графического процессора VIM301, модуль центрального процессора CPC512, модуль ПЛИС FPU512, модуль диска HDD, модуль источника питания PS510 (все модули отечественного производства). Кроме того, используется дополнительная аппаратура – 4 аналоговые камеры и электролюминесцентный дисплей. Схема параллельно-конвейерной обработки данных на базе ПЛИС представлена на рис. 1 а. ПЛИС позволяет реализовывать любую конфигурацию, поэтому в ней возможна реализация 4-х одинаковых блоков обработки данных, где каждый из блоков осуществляет обработку своего потока по одному из каналов цифрового видеоввода, а результаты обработки по каждому из каналов передаются в свою область ОЗУ. Это позволяет существенно снизить нагрузку центрального процессора и видеопроцессора, за счет реализации требуемых алгоритмов на ПЛИС.

При реализации обработки N каналов входных данных средствами графических процессоров скорость видеобработки значительно возрастает при увеличении количества процессоров, используемых для выполнения параллельных расчетов. Коммутация передаваемых данных осуществляется самостоятельным модулем коммутатора, установленного в систему (рис. 1 б).

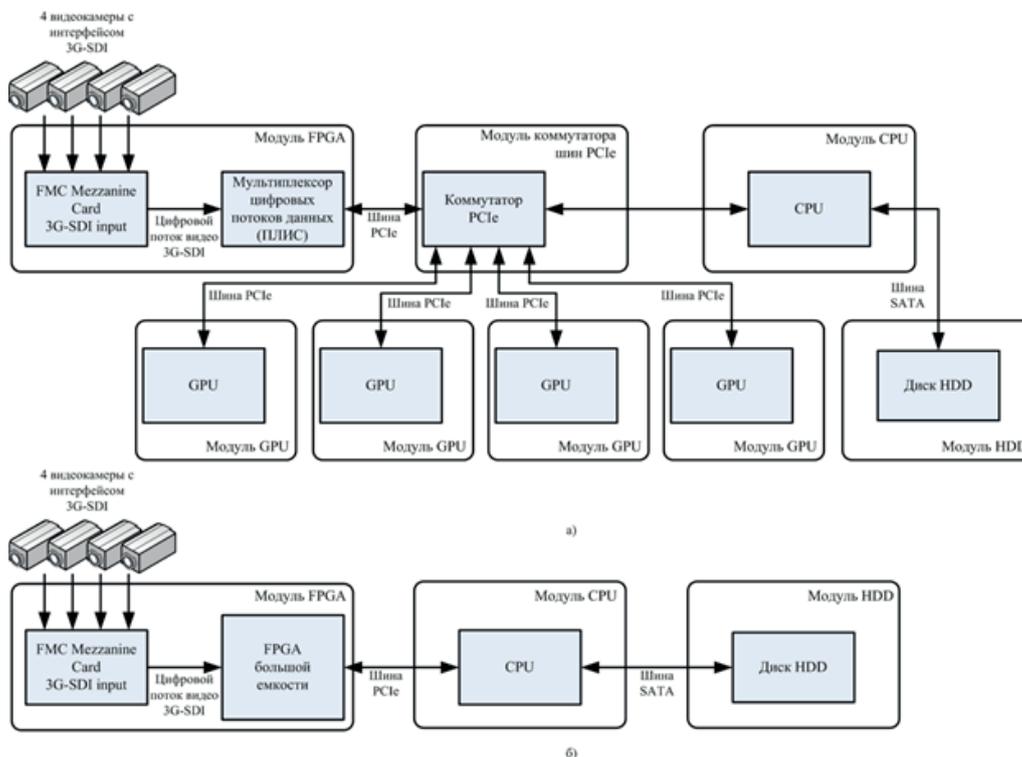


Рис. 1. Гетерогенные конвейерные системы параллельной обработки 4-х входных каналов видео высокого разрешения: а – на базе ПЛИС большой емкости; б – на базе 4 GPU и модуля коммутатора.

Механизм параллельно-конвейерной обработки является признанным классическим методом повышения быстродействия систем обработки данных, и если структура данных и алгоритм позволяют распараллеливать задачу, то это почти всегда повышает эффективность такой обработки. Так, гетерогенность, принятые схемотехнические и программные решения обеспечивают взаимодействие модулей различной архитектуры и позволяют эффективно применять МВП для гетерогенной параллельно-конвейерной обработки данных.

Методики оценки производительности гетерогенных вычислительных систем

Используемые методы оценки производительности вычислительных систем должны отвечать определенным требованиям. Прежде всего, они должны быть общепризнанными, максимально полно оценивать эффективность вычислительной системы и соответствовать задачам пользователя. Пользователю важно время, за которое решается его задача, поэтому в обычно применяемых тестах для измерения производительности вычисляется сумма пользовательского и системного времени.

С целью организации взаимодействия между процессорными модулями CISC 512 выбран наиболее распространенный в параллельном программировании стандарт интерфейса обмена данными MPI [6]. Интерфейс MPI позволяет скрыть от пользователя отображение логической структуры программы на аппаратные ресурсы и, таким образом, воспринимать сложную, возможно, неоднородную среду, как единый вычислительный ресурс. В MPI используются как точечные взаимодействия, при которых один процесс передает сообщение, а второй – его принимает, так и коллективные взаимодействия типа «один-ко-всем», «все-к-одному» и «все-со-всеми».

Программная реализация измерения производительности МВП

Для оценки производительности МВП на языке C++ была разработана система функциональных тестов. Разработку тестов измерения производительности проводили с помощью кроссплатформенных инструментариев: компилятора QT 5.2, библиотеки технической графики QWT, многофункциональной библиотеки boost и интерфейса разработки программных приложений для графических процессоров CUDA.

Функциональные тесты включают в себя тесты для измерения производительности линейки процессоров CISC 512, линейки графических процессоров NVIDIA, среды передачи данных между процессорами, модулей памяти и модулей дисковых накопителей. Общепринятой практикой измерения производительности процессоров x86 стало использование теста LINPACK, разработанного в Арагонской национальной лаборатории США [7].

LINPACK – это пакет фортран-программ, используемых для решения систем линейных алгебраических уравнений. Измерение производительности с помощью LINPACK представляет интерес для многих пользователей, так как алгоритмы линейной алгебры широко используются в самых разнообразных задачах. В основе алгоритмов LINPACK лежит метод декомпозиции. Исходная матрица размером 100×100 элементов сначала представляется в виде произведения двух матриц стандартной структуры, над которыми затем выполняется собственно алгоритм нахождения решения. В LINPACK выделен набор базовых

вых подпрограмм BLAS (*Basic Linear Algebra Subprograms*), каждая из которых выполняет элементарную операцию над векторами. Все операции выполняются над числами с плавающей точкой, представленными с двойной точностью, результат измеряется в Гфлопс.

В МВП предусмотрено использование нескольких графических модулей VIM556 отечественного производства, реализованных на базе высокопроизводительных процессоров NVIDIA. Графические карты соединяются мостами с помощью разработанной NVIDIA технологии масштабируемого интерфейса соединений – SLI [8], которая позволяет распараллелить выполнение прикладной программы на несколько графических процессоров.

Для измерения производительности среды передачи данных между процессорами CPC 512 используется набор тестов Intel MPI Benchmark. Максимальная производительность для данного пакета на тесте pingpong (отправка сообщения и прием его эха) составила 4/35 Гбайт/с, производительность коллективных операций MPI: All reduce и All total составила 0.72 Гбайт/с и 1.2 Гбайт/с, соответственно.

Тест HPL LINPACK предназначен для измерения производительности линейки процессоров CPC512 и используется для суперкомпьютеров с распределенной памятью. Он позволяет оценить верхний и нижний диапазоны реальной производительности для большинства прикладных задач. В случае линейки из 2-х процессоров на тесте HPL LINPACK получена максимальная производительность 376.2 Гфлопс.

Для измерения производительности линейки графических процессоров VIM 556 разработана многопоточная программа на языке Cuda СИ, предназначенная для выполнения скалярного произведения векторов в N-мерном действительном пространстве. При этом на каждом из n процессоров параллельно вычисляется k-ая часть скалярного произведения ($k=N/n$), где n – количество параллельно работающих графических процессоров, и с помощью функций Cuda СИ измеряется общее время выполнения скалярного произведения векторов. Результаты выполнения каждого теста анализируются и выводятся в текстовом и графическом виде. На рис. 2 приведен график работы теста LINPACK для 2-х процессоров МВП, на рис. 3 – результат работы теста pingpong из пакета Intel MPI Benchmark.



Рис. 2. График производительности линейки процессоров CPC512 на тесте HPL LINPACK.

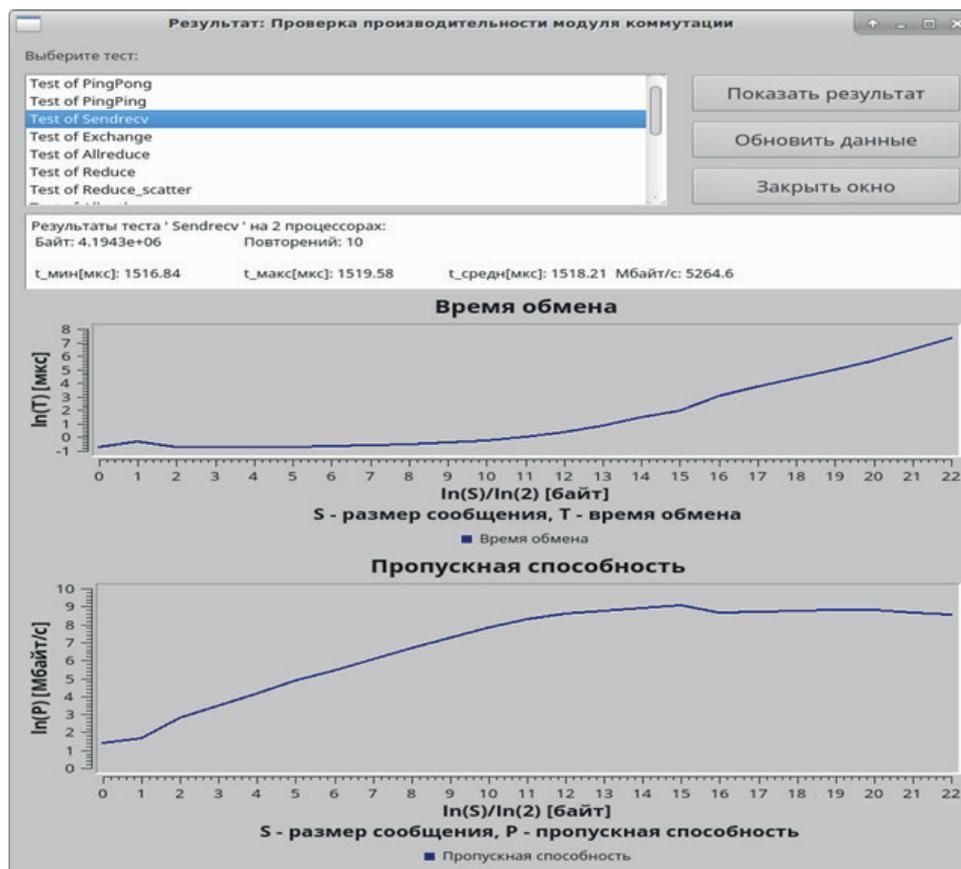


Рис. 3. График производительности среды передачи данных на тесте pingpong пакета Intel MPI Benchmark.

Так как в гетерогенных системах могут использоваться процессорные модули разных производителей, предназначенные для параллельного вычисления независимых задач, максимальная производительность МВП в целом рассчитывается как сумма максимальных производительностей групп однотипных узлов. На всех процессорах каждой группы параллельно решается одна задача, но с разными наборами данных.

Максимальная производительность МВП, включающей в себя два модуля CPC 512 и четыре модуля VIM 556, составила 3.8 Гфлопс.

Таким образом, результаты измерения производительности гетерогенного вычислительного комплекса «МВП» подтверждают высокую эффективность его применения для решения сложных прикладных задач.

Литература:

1. Сорокин С.А., Чудинов С.М., Сорокин А.П., Болгова Е.В. Методы оценки производительности вычислительных комплексов // Научные ведомости БелГУ. Экономика. Информатика. 2017. № 9 (258). Вып. 42. С. 89–97.

2. Бычков И.Н., Молчанов И.А., Фельдман В.М., Юрлин С.В. Вычислительные комплексы на микропроцессорах с архитектурами «Эльбрус» и SPARC для построения автоматизированных систем управления // Качество и Жизнь. 2016. № 4(12). С. 74–81.

3. Галаган П.В. Платформа ГРИФОН для решения задач встраиваемых систем специального назначения // *Современные технологии автоматизации*. 2015. № 4(77). С. 16–23.
4. Барыбин А.К., Лобанов В.Н., Чельдиев М.И., Чучкалов П.Б. Реконфигурируемая вычислительная платформа с разнородной архитектурой // *Вопросы радиоэлектроники*. 2016. № 7. С. 70–77.
5. Сорокин А.П., Чудинов С.М. Научный подход к выбору высокопроизводительной гетерогенной вычислительной платформы (ВГВП) для обработки изображений // *Радио-промышленность*. 2017. № 3. С. 68–73.
6. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable parallel programming with the message passing interface (Scientific and Engineering Computation). 2nd Ed. MIT Press, 1999. 386 p.
7. Dongarra J.J. Performance of various computers using standard linear equations software. // *Electrical Engineering and Computer Science Department University of Tennessee CS- 89-85 September 9, 2007*.
8. Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология программирования CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров: пер. с англ. / ред. А.В. Боресков. М.: ДМК Пресс, 2011. 232 с. доступ к эл. версии книги открыт на сайте <http://c.lanbook.com>.

References:

1. Sorokin S.A., Chudinov S.M., Sorokin A.P., Bolgova E.V. Methods for evaluating the performance of computer systems // *Nauchnye vedomosti BelGU. Ekonomika. Informatika. (Belgorod State University Scientific Bulletin)*. 2017. № 9(258). V. 42. P. 89–97. (in Russ.)
2. Bychkov I.N., Molchanov I.A., Feldman V.M., Yurlin S.V. Computing microprocessor complexes with “Elbrus” and SPARC architectures for the automated control systems creation // *Kachestvo i zhizn' (Quality and Life)*. 2016. № 4(12). P. 74–81. (in Russ.).
3. Galagan P.V. The GRYPHON platform for solving problems of embedded systems special purpose // *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii (Contemporary Technologies in Automation)*. 2015. № 4(77). P. 16–23. (in Russ.).
4. Barybin A.K., Lobanov V.N., Cheldiev M.I., Chuchkalov P.V. A reconfiguration computing platform with diverse architecture // *Voprosy radioelektroniki (Questions of radio electronics)*. 2016. № 7. P. 70–77. (in Russ.).
5. Sorokin A.P. Chudinov S.M. Scientific approach to the election of designing computing platforms for image processing // *Radiopromeshlennost' (Radio Industry)*. 2017. № 3. P. 68–73. (in Russ.).
6. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable parallel programming with the message passing interface (Scientific and Engineering Computation). 2nd Ed. MIT Press, 1999. 386 p.
7. Dongarra J.J. Performance of various computers using standard linear equations software. // *Electrical Engineering and Computer Science Department University of Tennessee CS- 89-85 September 9, 2007*.
8. Sanders J., Kandrot E. CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming. M.: DМК Press Publ., 2011. 232 p.

Об авторах:

Сорокин Сергей Александрович, кандидат технических наук, генеральный конструктор АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева» (Россия, 117437, Москва, Профсоюзная ул., д. 108).

Бененсон Михаил Залманович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева» (Россия, 117437, Москва, Профсоюзная ул., д. 108).

Сорокин А.П., аспирант АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева» (117437, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 108).

About authors:

Sergey A. Sorokin, Ph.D. (Engineering), Chief Designer, M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems (108, Profsoyuznaya st., Moscow, 117437, Russia).

Mikhail Z. Benenson, Ph.D. (Engineering), Chief Researcher, M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems (108, Profsoyuznaya st., Moscow, 117437, Russia).

A.P. Sorokin, Postgraduate Student, M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems (108, Profsoyuznaya st., Moscow, 117437, Russia).