

Литература

1. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1979.
2. Сурис Ю. Б. О сохранении симплектической структуры при численном решении гамильтоновых систем // Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: ИПМ. АН СССР, 1988. С. 148–160.
3. Sanz – Serna J. M. Runge – Kutta schemes for Hamiltonian system // BIT. 1988. Vol. 22, N 4.
4. Rosenbrock H. H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations // Comput. J. 1963. Vol. 5, N 4. P. 329–330.
5. Verlet L. Computer «experiments» on classical fluids. Thermodynamical properties of Lennard – Jones molecules // Phys. Rev. 1967. Vol. 159, N 1. P. 98–103.
6. Аржанцев И. В. Базисы Гребнера и системы алгебраических уравнений. М.: МЦНМО, 2003.
7. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.maplesoft.com>.
8. Софронов В. Н., Мокина К. С., Шемарулин В. Е. Разностные схемы молекулярной динамики. 1 Сравнительный анализ точности, устойчивости и экономичности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 2. С. 18–32.
9. Forest E, Ruth R. D. Fourth-order symplectic integration // Phys. D. 1990. Vol. 43. P. 105–117.
10. Candy J., Rozmus W. A symplectic integration algorithm for separable Hamiltonian function // J. of Computational Phys. 1991. Vol. 92. P. 230–256.
11. Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990.
12. Альшина Е. А., Закс Е. М., Калиткин Н. Н. Оптимальные схемы Рунге-Кутты с первого по шестой порядок точности // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 2007. Т. 47, № 9. С. 1538–1549.
13. Rougier E., Munjiza A., John N. W. M. Numerical comparison of some explicit time integration schemes used in DEM, FEM/DEM and molecular dynamics // International journal for numerical methods in engineering. 2004. Vol. 61. P. 856–879.
14. Шемарулин В. Е., Софронов В. Н., Мокина К. С. Разностные схемы молекулярной динамики. 2 Система двумерных тестов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 3. С. 3–14.
15. Lopez – Marcos M. A., Sanz – Serna J. M., Skeel R. D. Are Gauss-Legendre methods useful in molecular dynamics? // Journal of Computational and Applied Mathematics. 1996. Vol. 67. P. 173–179.
16. Sanz – Serna J. M., Calvo M. P. Numerical Hamiltonian problems. London: Chapman and Hall, 1984.
17. Норман Г. Э., Стегайлов В. В. Стохастическая теория метода классической молекулярной динамики // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 6. С. 3–44.
18. Bond S. D., Leimkuhler B. J. Molecular dynamics and the accuracy of numerically computed averages // Acta Numerica. 2007. Vol. 5. P. 1–65.

МЕТОД ПРОГНОЗНОГО РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СРЕД

С. А. Степаненко

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

Компьютерное моделирование является одним из основных современных средств исследований в различных областях естествознания.

Сложность этих исследований требует применения высокопроизводительной вычислительной техники, в частности, параллельных вычислительных систем.

Эти системы позволяют получать решение задачи посредством распараллеливания вычислительного процесса, т. е. одновременного выполнения нескольких процессов.

Вычислительная система содержит вычислительную среду и периферийные компоненты.

Вычислительной средой, следуя [1], будем называть совокупность одинаковых вычислительных устройств, соединенных каналами связи.

Среды, рассматриваемые в этой работе, предназначены для выполнения научных расчетов. Вычислительные устройства в этих средах, помимо средств связи, содержат арифметические процессоры и называются далее процессорными элементами. Каждый процессорный элемент имеет локальную оперативную память, недоступную для других элементов. Такие среды будем называть распределенными мультипроцессорными средами или просто средами.

Определяющим параметром вычислительной системы является производительность ее мультипроцессорной среды.

В идеале производительность среды в процессе вычислений является суммой производительностей ее процессорных элементов. Реальная производительность может быть сильно меньше идеальной; это следствие затрат времени на выполнение обменов информацией между процессорными элементами, отказов отдельных процессорных элементов и т.п. Отношение реальной производительности, достигаемой на заданной программе, к идеальной называется эффективностью среды (на этой программе).

Эффективность зависит от особенностей решаемой задачи и параметров мультипроцессорной среды.

К особенностям задачи, точнее – алгоритма ее решения, относятся длительности нераспараллеливаемых фрагментов, количество и тип операций обмена информацией, синхронность вычислительных процессов и т. п. Создание прикладных алгоритмов и программ, позволяющих максимально использовать возможности вычислительных систем, является специфичной, проблемно ориентированной областью математики и программирования [2, 3] и здесь не рассматривается.

Параметрами мультипроцессорных сред, определяющими их эффективность, являются количество процессорных элементов, соотношение между арифметической производительностью процессоров и пропускной способностью средств связи, топология связей среды, надежность и т. д.

Значения этих величин зависят от используемых аппаратных и системных программных компонент. Они могут изменяться в значительных пределах и соответственно влиять на эффективность среды, возможности ее применения.

Мультипроцессорные среды могут содержать тысячи процессорных элементов.

Задача прогнозирования производительности и эффективности создаваемых (проектируемых) мультипроцессорных сред является весьма актуальной. Последнее обусловлено большой стоимостью этих систем, трудоемкостью их создания.

Необходимо иметь средства, позволяющие для определенного класса задач уже на стадии проектирования оценить производительность и эффективность разрабатываемой вычислительной среды. Тем самым определяется возможность ее применения по назначению.

Опубликованные методы прогноза производительности мультипроцессорных сред как в ранних [4, 5], так и в последних [6, 7] работах, основаны на анализе свойств программ, выбранных в качестве эталонов, и значениях различных параметров вычислительной системы. Учитывается количество арифметических операций, интенсивность обращений к памяти, производительность процессора, емкость КЭШ и оперативной памяти, параметры коммуникационной среды и другие подробные сведения об аппаратных и программных системных компонентах.

Эти сведения требуют подробного тестирования и детального знания программных и аппаратных средств. Они не всегда доступны. Указанные методы сложны, их реализация трудоемка и требует профилирования программ.

Исследуемый в этой работе метод прогнозного расчета производительности и эффективности проектируемой среды на заданной программе требует при выполнении определенных условий лишь

значений производительности и эффективности, достигнутых на этой программе определенными компонентами проектируемой среды и в специально оговариваемом случае – ранее созданной средой. Метод обобщается на гибридные мультипроцессорные среды, элементы которых содержат универсальные процессоры – MIMD компоненту и арифметические ускорители – SIMD компоненту.

Метод основан на использовании:

- принципа идентичности топологий мультипроцессорных сред;
- условия соблюдения баланса между пропускной способностью средств связи и арифметической производительностью среды.

Идентичность топологии мультипроцессорной среды часто встречается в современной практике. Это обусловлено модернизацией эксплуатируемых систем, применением программ маршрутизации, использующих топологические особенности среды, а также созданием гибридных мультипроцессорных сред посредством добавления в универсальные процессорные элементы (реализующие MIMD вычисления) арифметических ускорителей (реализующих SIMD вычисления).

Соблюдение идентичности топологий мультипроцессорных сред на различных уровнях параллелизма – позволяет упростить процесс расчета значений производительности и эффективности.

Баланс между пропускной способностью средств связи и арифметической производительностью среды необходим для сохранения постоянства доли длительности обменов при выполнении вычислительного процесса к общей длительности процесса, определяющей значение эффективности.

Достоинством излагаемого метода является сравнительная простота и небольшое количество требуемых исходных данных. Недостатком – весьма жесткие, не всегда приемлемые на практике условия идентичности топологии и соблюдения баланса, требуемые для его применения. Метод не заменяет известные средства анализа производительности и эффективности. Он дополняет их в определенных выше условиях.

1. Коэффициент ускорения вычислений и эффективность мультипроцессорной среды

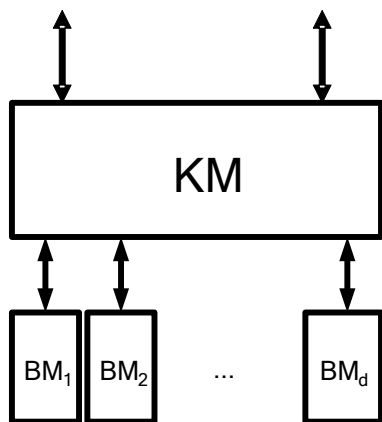


Рис. 1. Структура процессорного элемента

Эффективность мультипроцессорной среды определим через коэффициент ускорения для известных [8] метода деления вычислений (закон Амдаля) и метода умножения вычислений (закон Густафсона).

Мультипроцессорная среда состоит из процессорных элементов, соединенных между собой каналами связи. Структура процессорного элемента приведена на рис. 1. Он содержит d вычислительных модулей (BM) и полный матричный коммутатор (KM), имеющий q каналов, часть которых соединена с BM, а остальные – с другими элементами среды. Вычислительный модуль в общем случае представляет собой SMP систему, содержащую m процессоров, работающих на общей памяти.

В этой работе предполагается, что среда абсолютно надежна. Оценим коэффициент ускорения вычислений, достигаемый средой из ω элементов, в каждом из которых один процессор (и соответственно один модуль).

Пусть для выполнения вычислительного процесса одним процессорным элементом, содержащим один процессор, требуется интервал длительностью T_C .

Для метода деления этот процесс сегментируется на ω подпроцессов, каждый из которых выполняется отдельным процессорным элементом среды в течение интервала $\frac{T_C}{\omega}$. После окончания всех ω подпроцессов между ними выполняются обмены информацией, требующие интервала T_E .

Общее количество вычислений, выполняемых средой, остается неизменным по сравнению с одним процессорным элементом.

Коэффициент ускорения для метода деления:

$$K = \frac{T_c}{\frac{T_c}{\omega} + T_E} = \frac{\omega T_c}{T_c + \omega T_E}.$$

В идеале $K = \omega$. Эффективность мультипроцессорной среды есть:

$$E_f = \frac{K}{\omega} = \frac{T_c}{\frac{T_c}{\omega} + T_E}.$$

Для метода умножения вычислений каждый элемент одновременно с другими выполняет вычисления длительностью T_c , по окончании которых выполняется обмен длительностью T_E . Общее количество вычислений возрастает в ω раз по сравнению с одним процессорным элементом.

Для метода умножения вычислений коэффициент ускорения имеет вид:

$$K = \frac{\omega T_C}{T_C + \omega T_E} = \frac{T_C}{\frac{T_C}{\omega} + T_E}.$$

Эффективность мультипроцессорной среды:

$$E_f = \frac{K}{\omega} = \frac{T_c}{T_c + T_E}.$$

В обоих выражениях, определяющих E_f , присутствует величина T_c – длительность выполнения арифметических операций, которая не зависит от свойств среды, и величина T_E – длительность выполнения операций обменов информацией, зависящая от свойств среды и влияющая на E_f .

Величина $T_E = T_S + \frac{Q}{V}$ складывается из T_S – затрат времени на выбор маршрута передачи информации, конфликтов в процессе передачи, длительности формирования маршрута, длительности обработки информации в источнике и в приемнике и $\frac{Q}{V}$ собственно длительности передачи информации, где Q – количество передаваемой информации и V – пропускная способность канала связи.

И для метода деления, и для метода умножения значение E_f остается неизменным, если неизменно отношение $\frac{T_E}{T_C}$, именуемое далее балансом между пропускной способностью средств связи и арифметической производительностью среды.

Для сред с одинаковой топологией и одинаковым количеством элементов значения T_S – затраты времени на выбор маршрута, на конфликты при передаче и обработку информации в источнике и приемнике и т. п. полагаем одинаковыми. Они включены в T_E .

Эффективность среды в этих условиях при неизменности топологии будет для заданной программы определяться значением баланса. Сохраняя постоянным значение баланса при различных T_C и T_E имеем постоянное значение эффективности.

Воспользуемся этим для вычисления значений эффективности среды, используя значения эффективности ее компонент.

2. Метод прогнозного расчета эффективности мультипроцессорной среды

Эффективность мультипроцессорной среды зависит от значений эффективности компонент, образующих эту среду. Эта зависимость может быть представлена аналитически.

Структура среды представлена на рис. 2. Она содержит коммуникационную среду, объединяющую ω процессорных элементов, каждый из которых состоит из d вычислительных модулей (см. рис. 1).

Полагаем для простоты, что каждый вычислительный модуль содержит один процессор (одно процессорное ядро).

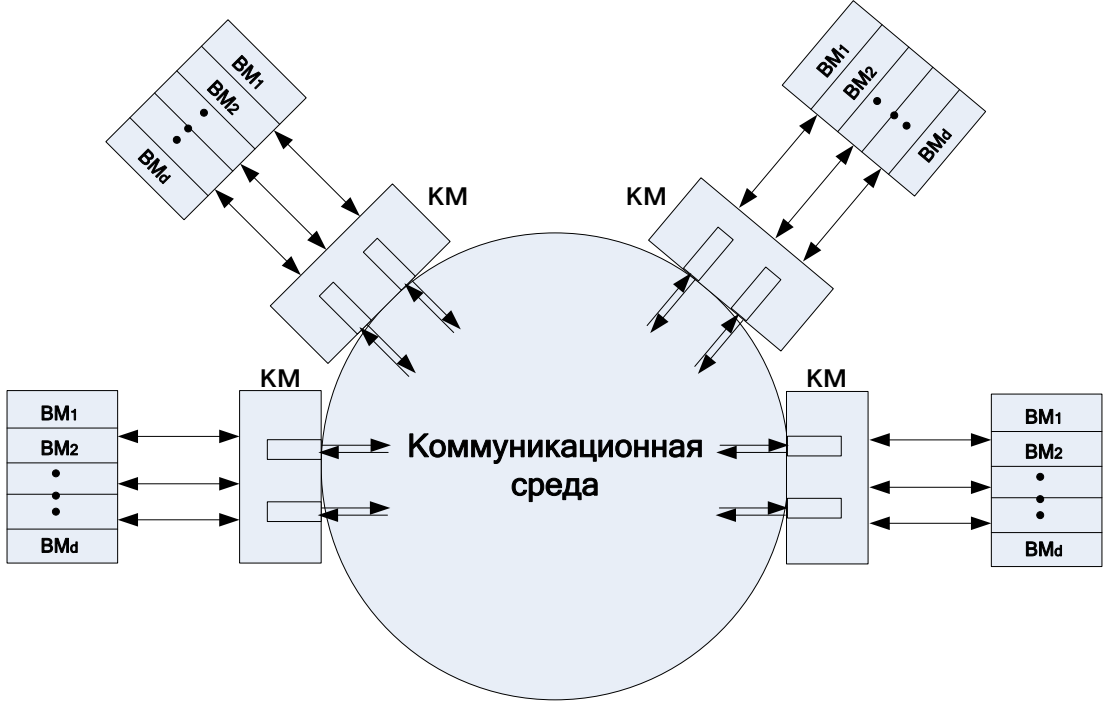


Рис. 2. Структура мультипроцессорной среды

Пусть E_f^Σ эффективность среды на заданном вычислительном процессе.

Фрагменты этого процесса выполняются в параллельном режиме отдельными процессорными элементами в течение интервала:

$$T_1^\Sigma = (T_{C1} + T_{E1}) = \frac{T_{C1}}{E_{f1}},$$

где T_{C1} – собственно длительность арифметических операций, выполняемых процессорным элементом (вычислительным модулем); $T_{E1} = T_s + \frac{Q}{V}$ – длительность обменов между вычислительными модулями данного процессорного элемента; $E_{f1} = \frac{K_1}{d}$ – эффективность процессорного элемента, K_1 – коэффициент ускорения, достигнутый применением процессорного элемента на заданном фрагменте вычислительного процесса, d – количество вычислительных модулей в процессорном элементе; в каждом модуле одно процессорное ядро.

Длительность выполнения средой всего вычислительного процесса обозначим T_2^Σ .

Очевидно, $T_2^\Sigma = T_{C2} + T_{E2} = \frac{T_{C2}}{E_{f2}}$, где $T_{C2} = T_1^\Sigma$ – длительность вычислений выполняемых от-

дельными процессорными элементами; T_{E2} – длительность обменов между элементами; $E_{f2} = \frac{K_2}{\omega}$ – эффективность среды на данном процессе, K_2 – коэффициент ускорения вычислений.

$$\text{Имеем } T_2^\Sigma = (T_{C2} + T_{E2}) = \frac{T_{C2}}{E_{f2}} = \frac{(T_{C1} + T_{E1})}{E_{f2}} = \frac{T_{C1}}{E_{f1}E_{f2}}.$$

$$\text{Итак, } T_2^\Sigma = \frac{T_{C1}}{E_{f1}E_{f2}}, \text{ откуда } \frac{T_{C1}}{T_2^\Sigma} = E_{f1}E_{f2}.$$

По определению $\frac{T_{C1}}{T_2^\Sigma}$ – отношение длительности собственно арифметического процесса к длительности всего вычислительного процесса, (включающего помимо вычислений еще и обмены информацией). Следовательно, $\frac{T_{C1}}{T_2^\Sigma}$ есть эффективность E_f^Σ всей среды на данном процессе.

$$\text{Таким образом, получаем } E_f^\Sigma = E_{f2}E_{f1}.$$

Очевидно, если процессор содержит несколько ядер, объединенных собственным коммутатором, и эффективность, достигаемая процессором, составляет E_{f0} , то $E_f^\Sigma = E_{f2}E_{f1}E_{f0}$.

Далее, для удобства изложения, конструктивные компоненты мультипроцессорных сред, реализующие различные уровни параллелизма, будем, согласно [9], именовать *кластерами*. Напомним, кластер $(i+1)$ -уровня состоит из кластеров i -ого уровня. Например, *кластер нулевого уровня* – процессорное ядро, *кластер первого уровня* – процессор, состоящий из нескольких ядер, *кластер второго уровня* – вычислительный модуль, содержащий несколько процессоров, объединенных либо в SMP, либо в MPP систему, *кластер третьего уровня* – процессорный элемент, содержащий несколько вычислительных модулей, взаимодействующих через коммутатор т. д.

Применение понятия кластера позволяет формализовать используемые в литературе термины – узел, блэйд, шасси, группа, стойка и т. п. [10]. В этой работе в каждом конкретном случае конструктивное исполнение кластера i -ого уровня уточняется.

Из предыдущего следует, что эффективность среды, представляющей собой кластер r уровня, есть $E_{fr}^\Sigma = \prod_{i=0}^{(r-1)} E_{fi}$.

Пусть π_0 – производительность кластера нулевого для данной среды уровня, зафиксированная на заданной программе. Согласно определению, производительность всей среды на этой программе $\pi^\Sigma = E_f^\Sigma \pi_0$.

Полученные значения π^Σ и E_f^Σ среды зависят только от значений π_i и E_{fi} , достигаемых кластерами i -го уровня – компонентами данной среды. Необходимый состав компонент отличается для различных классов сред; этот состав уточняется в следующем разделе. Значения π_i и E_{fi} могут быть получены на заданной программе экспериментально или теоретически для отдельных компонент и позволяют осуществить прогнозный расчет производительности и эффективности всей среды на этой программе.

3. Применение метода прогнозного расчета производительности и эффективности

Среды, имеющие одинаковую топологию на различных уровнях параллелизма, называются однородными; образующие их кластеры, реализуют одинаковые топологии.

Среды, реализующие на различных уровнях различные топологии, называются неоднородными; образующие их кластеры реализуют различные топологии.

Покажем особенности применения метода прогнозного расчета производительности и эффективности к обоим классам сред.

3.1. Расчет производительности и эффективности однородных сред

В однородных средах при определенных условиях достигается одинаковое значение эффективности на различных уровнях. При выполнении этих условий значение эффективности проектируемой среды можно оценить, установив значение эффективности кластера нижнего уровня, в частности, процессорного элемента; это можно сделать, например, экспериментально. Создания всей среды для этого не требуется.

i. Расчет среды с топологией Dragonfly

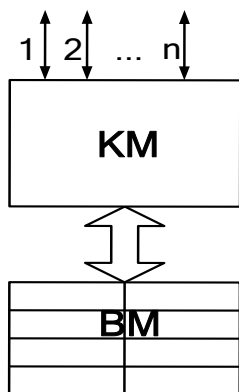


Рис. 3. Структура процессорного элемента

Применим предложенный метод для расчета значений эффективности однородной мультипроцессорной среды с топологией «Dragonfly» [9]; в отличие от [9] здесь на всех уровнях применяется одинаковая топология, поэтому среда однородна.

Пусть процессорный элемент среды содержит вычислительный модуль из m процессоров, работающих на общей памяти (SMP система), и n портовый коммутатор. Структура процессорного элемента представлена на рис. 3.

Процессорный элемент здесь является кластером нулевого уровня. Его производительность на данной программе составляет π_0 , его эффективность $E_{f0} = 1$.

Пусть восемь процессорных элементов объединены между собой в кластер первого уровня, реализующий топологию Dragonfly. Структура кластера показана на рис. 4.

Значение эффективности этого кластера на данной программе измеряется экспериментально; полагаем, оно составляет E_{f1} . Это означает, что на данной программе производительность кластера первого уровня в $8E_{f1}$ раз больше производительности процессорного элемента.

Построим из кластеров первого уровня кластер второго уровня. Его структура показана на рис. 5. Каждая вершина кластера второго уровня есть кластер первого уровня.

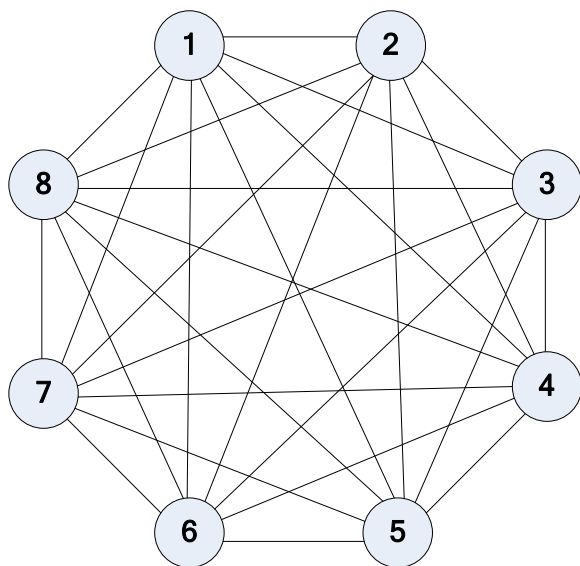


Рис. 4. Кластер первого уровня

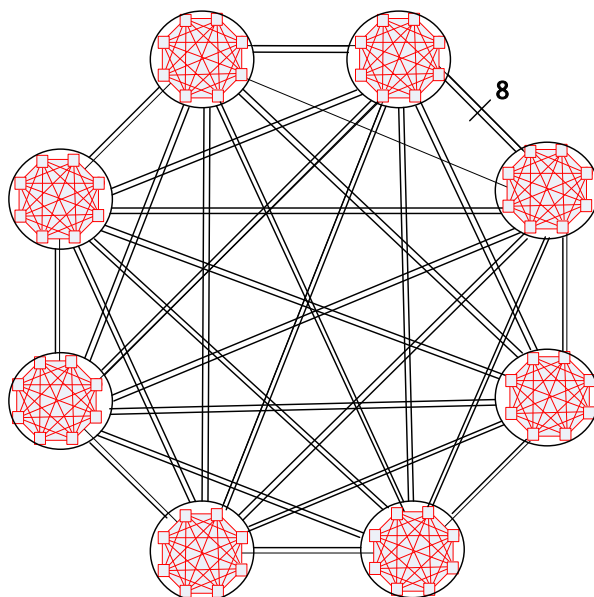


Рис. 5. Кластер второго уровня

Применим режим умножения вычислений. Производительность кластера первого уровня на данной задаче в $8E_{f1}$ раз больше производительности единичного процессорного элемента. Чтобы сохранить баланс, увеличиваем в $8E_{f1}$ раз производительность средств связи, соединяющих кластеры первого уровня. Для этого каждый элемент кластера первого уровня соединяется с идентичным (имеющим тот же номер) элементом в каждом другом кластере первого уровня. В результате каждый кластер первого уровня соединен с каждым другим кластером первого уровня восемью каналами (см. рис. 5).

Оценим значение эффективности E_{f2} кластера второго уровня. Кластеры первого и второго уровней реализуют одинаковую топологию, сохраняя баланс между пропускной способностью и арифметической производительностью. Поэтому $E_{f2} = E_{f1}E_{f1}$. Производительность кластера второго уровня в рассматриваемом примере составит $\pi^\Sigma = 64E_{f1}^2\pi_0$.

Аналогично, кластеры второго уровня объединяются в кластеры третьего уровня. Повторяя топологию, задействованную в кластерах первого и второго уровня, получаем структуру кластера третьего уровня, представленную на рис. 6.

Каждый процессорный элемент имеет $n = 21$ канал, в частности:

- семь каналов для связи с элементами, образующими кластер первого уровня;
- семь каналов для связи с идентичными элементами в семи других кластерах первого уровня (другими словами – для образования кластера второго уровня);
- семь каналов для связи с идентичными элементами в семи кластерах второго уровня (в каждом из которых восемь идентичных кластеров первого уровня).

Количество каналов, соединяющих каждый кластер второго уровня с каждым другим кластером второго уровня, требуемое для сохранения баланса, не превышает 64.

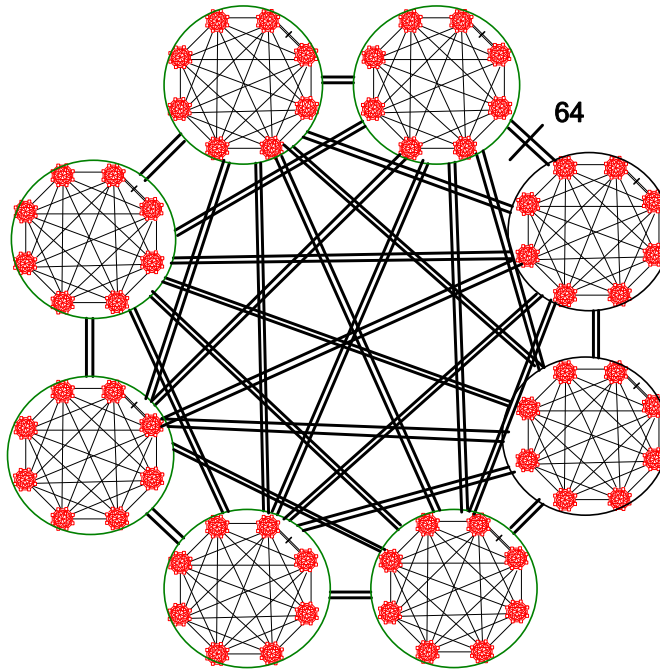


Рис. 6. Кластер третьего уровня

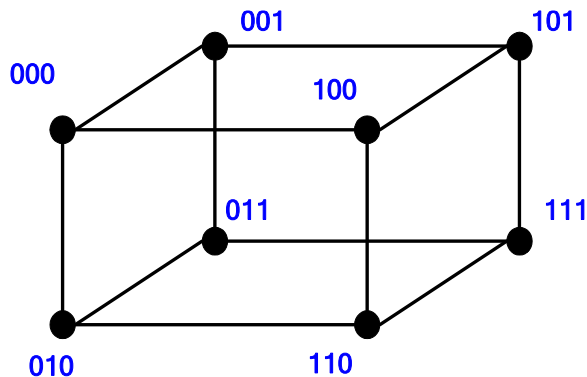
Эффективность кластера третьего уровня на данной задаче составит $E_{f3} = E_{f1}^3$; значение производительности $\pi^\Sigma = 512E_{f3}\pi_0$.

В общем случае для однородной среды, являющейся кластером r -ого уровня, при соблюдении баланса на всех уровнях имеем $E_f^\Sigma = (E_{f1})^r$ и $\pi^\Sigma = \omega E_f^\Sigma \pi_0$.

ii. Расчет среды с топологией гиперкуб

Рассмотренный метод может быть применен и к другим топологиям.

Пусть мультипроцессорная среда имеет топологию связей гиперкуб третьей размерности – Γ^3 , показанную на рис. 7.

Рис. 7. Кластер первого уровня с топологией Γ^3

Процессорный элемент этой среды на заданной программе имеет производительность π_0 . Эффективность среды имеет значение E_{f1} . Среду назовем кластером первого уровня.

Аналогично изложенному выше полагаем, что кластеры первого уровня объединяются в кластер второго уровня с топологией связей Γ^3 . Вершинами (процессорными элементами) кластера второго уровня являются кластеры первого уровня (см. рис. 8).

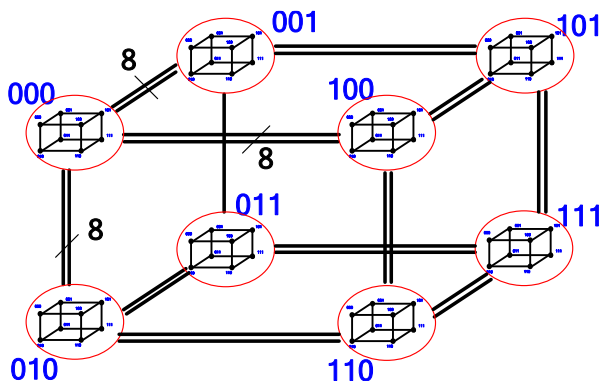


Рис. 8. Кластер второго уровня с топологией Γ^3

В свою очередь, объединяя кластеры второго уровня в кластер третьего уровня, получим, показанную на рис. 9, среду из 2^9 процессорных элементов.

В этой среде каждый процессорный элемент содержит $n = 9$ каналов.

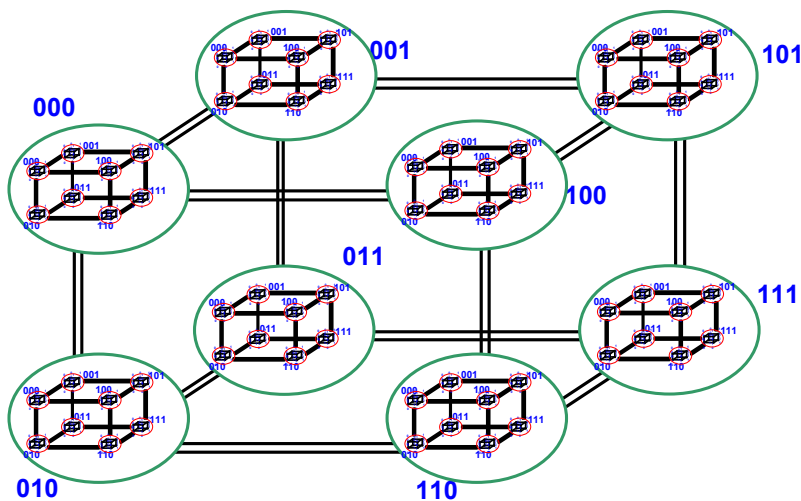


Рис. 9. Кластер третьего уровня с топологией Γ^3

Эффективность на данной задаче этой среды $E_f^\Sigma = E_{f1}^3$, ее производительность $\pi^\Sigma = 512E_f^\Sigma \pi_0$.

Аналогично предыдущему имеем эффективность однородного кластера r -ого уровня $E_f^\Sigma = E_{f1}^r$, производительность $\pi^\Sigma = \omega E_f^\Sigma \pi_0$.

б. Расчет производительности и эффективности неоднородных и гибридных сред

Для расчета неоднородных сред экспериментальные данные требуются от каждого уровня параллелизма ранее созданной среды, т. е. при каждом значении i . Значения эффективности, полученные для среды прототипа, могут быть использованы лишь при условии соблюдения идентичности топологии на соответствующих уровнях и сохранения баланса.

Пусть имеется среда S_1 , для которой на программе Z известны значение эффективности среды E_{f1}^Σ и эффективность ее процессорного элемента E_{f1} , содержащего l_1 процессоров. Производительность процессора на этой программе составляет π_1 . Процессорные элементы соединены в определенную топологию, пропускная способность всех каналов, соединяющих элементы, одинакова и равна V_1 .

Требуется создать среду S_2 , которая на программе Z и на одинаковом с S_1 количестве элементов имеет эффективность $E_{f2}^\Sigma > E_{f1}^\Sigma$ и в R раз большую по сравнению с S_1 производительность. Процессорный элемент среды S_2 содержит $q_2 > q_1$ процессоров, каждый из которых имеет производительность на данной программе $\pi_2 = K\pi_1$, где $K > 1$. Поскольку обе среды содержат одинаковое количество элементов, находим, что $q_2 \geq \frac{R}{K} q_1$.

Экспериментально устанавливаем, что данный вычислительный процесс выполняется в режиме умножения одним процессорным элементом среды S_2 (т. е. q_2 процессорами) в течение интервала T_2 . При этом необходимо, чтобы выполнялось $E_{f2} \geq E_{f1}$; последнее достигается, если длительность обмена T_{E2} между процессорами внутри элемента среды S_2 (включающая и T_S , и $\frac{Q}{V_2}$) в K раз меньше значения T_{E1} .

Требование $E_{f2} \geq E_{f1}$ означает, что процессорный элемент среды S_2 на программе Z в $R = \frac{q_2}{q_1} K$ раз производительней элемента среды S_1 , и, следовательно, требование $\pi_2^\Sigma = R\pi_1^\Sigma$ выполняется.

Кроме того, экспериментально либо из результатов ранее выполненного тестирования системы S_1 получаем значение интервала T_1 , в течение которого это же количество вычислений выполняется $l_1 = \frac{q_2}{q_1}$ элементами системы S_1 , содержащими в совокупности q_2 процессоров. Далее получаем $\gamma = \frac{T_1}{T_2}$.

Тогда, чтобы для сред S_2 и S_1 , имеющих одинаковые топологии и содержащих одинаковое количество элементов, выполнялось на программе Z соотношение $E_{f2}^\Sigma \geq E_{f1}^\Sigma$, необходимо, чтобы $V_2 \geq \gamma V_1$, где V_2 – пропускная способность канала связи процессорного элемента среды S_2 .

Последнее означает, что на программе Z баланс между пропускной способностью и арифметической производительностью среды S_1 равен балансу среды S_2 . Следовательно, на данном процессе $E_{f2}^\Sigma \geq E_{f1}^\Sigma$.

Применительно к гибридной среде S_2 , процессорный элемент которой содержит ядра универсальных процессоров и арифметические ускорители, изложенный метод дополняется оценками ускорения вычислений, достигаемого применением арифметических ускорителей. Эти оценки по-

лучены в [11]. Они позволяют оценить π_2 – производительность гибридного процессорного элемента на основе значений первичных параметров выполняемого вычислительного процесса и состава процессорного элемента.

Более того, применение этих оценок позволяет оптимизировать структуру гибридного процессорного элемента. Изменением количества задействованных ядер универсального процессора и количества ускорителей достигается наибольшее для определенных условий ускорение вычислительного процесса.

В остальном расчет производительности и эффективности гибридных мультипроцессорных сред не отличается от изложенного выше для однородных и неоднородных сред, элементы которых содержат только ядра универсального процессора.

а. Пример прогнозного расчета значений параметров мультипроцессорной среды

Проиллюстрируем изложенное примером. Пусть процессорный элемент среды S_1 имеет структуру, представленную на рис. 10. Он содержит вычислительный модуль, в котором задействованы два процессора на общей памяти и восьмипортовый коммутатор; один порт коммутатора подключен к вычислительному модулю, а остальные семь используются для связи с другими процессорными элементами. Пропускная способность канала связи составляет $V_1 = 25$ МБайт/с.

Среда S_1 состоит из 128 процессорных элементов, объединенных в топологию Γ^7 .

На программе Z процессор выполняет вычисления в течение $\hat{T}_1 = 27,7$ с. Процессорный элемент на этой программе в режиме умножения достигает эффективности $E_{f1} = 73\%$, длительность вычислений составляет $\hat{T}_1 = 38,3$ с. Среда S_1 из 128 процессорных элементов выполняет вычисления в режиме умножения с $E_{f1}^{\Sigma} = 65\%$, длительность вычислений составляет $T_1^{\Sigma} = 42,8$ с.

Рассмотрим возможность построения среды S_2 , содержащей 128 процессорных элементов, производительность которой на программе Z примерно в $R = 500$ раз больше производительности среды S_1 .

Полагаем, что для создания среды S_2 используется процессор, производительность которого примерно в 10 раз больше производительности процессора среды S_1 .

Чтобы процессорный элемент среды S_2 имел производительность в ~ 500 раз больше производительности среды S_1 , он должен содержать не менее 100 процессоров.

Необходимо следующее:

1. Эффективность процессорного элемента среды S_2 на программе Z была не меньше эффективности процессорного элемента среды S_1 .

2. Сохранялся баланс между пропускной способностью средств связи и производительностью процессорного элемента.

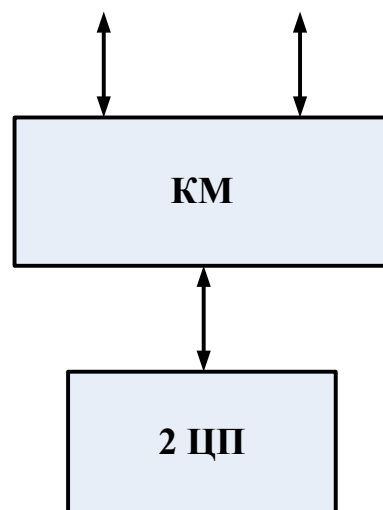


Рис. 10. Структура процессорного элемента среды S_1

Процессорный элемент среды S_2 также может быть средой, т. е. кластером r уровня, состоящим из элементов $(r-1)$ -уровня, объединенных в определенную топологию, возможно отличную от топологии среды S_2 .

Пусть процессорный элемент среды S_2 имеет приведенную на рис. 11 структуру. Он содержит шестнадцать вычислительных модулей, в каждом – восемь процессоров. Экспериментально устанавливаем, что на программе Z длительность вычислений одним процессором составляет $\hat{T}_0 = 2,8$ с, а одним процессорным элементом в режиме умножения $\hat{T}_1 = 3,3$ с. Следовательно, $E_{f2} = 85\%$ и $E_{f2} > E_{f1}$.

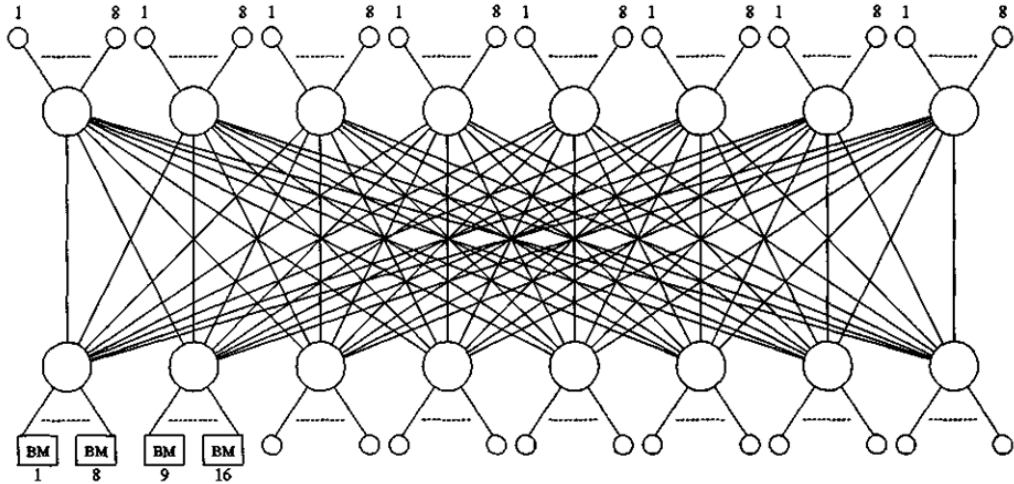


Рис. 11. Структура процессорного элемента среды S_2

Из результатов тестирования системы S_1 известно, что 64 элементам (128 процессоров) этой системы потребовалось $\hat{T}_{64} = 42,8$ с, чтобы в режиме умножения выполнить одинаковое с элементом среды S_2 количество вычислений.

Следовательно, $\gamma = \frac{\hat{T}_{64}}{\hat{T}_1} = 13$, процессорный элемент среды S_2 эквивалентен $\gamma 64 = 830$ процессорным элементам среды S_1 . Для сохранения баланса необходимо при прочих равных условиях увеличить в 830 раз пропускную способность канала элемента среды S_2 . Получаем $V_2 = 830V_1 = 20,5$ Гбайт/с. Показанная на рис. 11 структура процессорного элемента включает восемь 16-портовых коммутаторов. Полагаем, что каналы различных коммутаторов, имеющие одинаковый номер, объединяются в один общий канал из восьми линков. Пропускная способность одного общего канала $V_2 = 20$ Гбайт/с, пропускная способность линка $v = 2,5$ Гбайт/с. Оба эти значения вполне достижимы современными системами межпроцессорного обмена [9, 11].

Таким образом, представленный на рис. 11 элемент имеет восемь общих каналов (в каждом по восемь линков), из которых семь задействуются для создания мультипроцессорной среды S_2 , реализующей топологию Γ^7 ; восьмой канал может быть использован для соединения с резервными элементами или подключения внешней, например, файловой системы.

В результате проектируемая среда S_2 на программе Z имеет эффективность не менее $E_{f2} \geq E_{f1} = 65\%$. Процессорный элемент среды S_2 вследствие конструктивных особенностей содержит

128 процессоров вместо минимально необходимых 100. Эффективность процессорного элемента среды S_2 выше, чем элемента среды S_1 .

В результате расчетная производительность среды S_2 на данной программе в ~ 800 раз (вместо требуемых 500) больше производительности среды S_1 .

Необходимо отметить, что указанные значения параметров справедливы лишь для данной программы Z . Для другой программы возможно изменение соотношения производительностей процессоров среды S_1 и среды S_2 , и соответственно V_1 и V_2 .

Заключение

Рассмотренный метод позволяет, при выполнении определенных условий, оценить значения производительности и эффективности создаваемой (проектируемой) мультипроцессорной среды, которые могут быть достигнуты этой средой на заданной программе. Метод использует экспериментальные значения производительности и эффективности, полученные на заданной программе для определенных компонентов создаваемой (проектируемой) среды и в специально оговариваемых случаях для ранее созданных сред в результате их тестирования на этой программе.

Метод обобщается на гибридные мультипроцессорные среды, элементы которых содержат универсальные процессоры – MIMD компоненту и арифметические ускорители – SIMD компоненту.

Метод основан на использовании:

- принципа идентичности топологий мультипроцессорных сред;
- условия соблюдения баланса между пропускной способностью средств связи и арифметической производительностью процессорного элемента.

Достоинствами излагаемого метода являются сравнительная простота и небольшое количество требуемых исходных данных. Недостатком – весьма жесткие, не всегда приемлемые на практике условия идентичности топологии и соблюдения баланса, требуемые для его применения. Метод не заменяет известные средства анализа производительности и эффективности. Он дополняет их в определенных выше условиях.

Рассмотренный метод позволяет, оценив производительность и эффективность создаваемой (проектируемой) среды на заданной программе, сделать вывод о возможности применения этой среды по назначению.

Литература

1. Евреинов Э. В., Косарев Ю. Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск: Наука, 1966.
2. Воеводин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах. М.: Наука, 1986.
3. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. М.: Мир, 1991.
4. Софронов И. Д. Оценка параметров вычислительной машины, предназначенной для решения задач механики сплошной среды // Числ. методы мех. спл. среды. 1975. Т. 6, № 3. С. 86–112.
5. Бурцев В. С. Новые подходы к оценке качества вычислительных средств. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры суперЭВМ. М., 1997. С. 28–40.
6. Barker K. J., Davis K., Hoisie A. et al. Performance Analysis and Modeling: From Giga-to Petascale. [Electronic resource]. Mode of access: http://www.c3.lanl.gov/pal/publications/bibtex/KD_Davis04:BlueGeneL.bib.
7. Barrett B., Barrett R., Brandt J. et al. Report of Experiments and Evidence for ASC L2 Milestone 4467 – Demonstration of a Legacy Application’s Path to Exascale; Sandia Report, SAND2012-1750, Printed March 2012.
8. Цилькер Б. Я., Орлов С. А. Организация ЭВМ и систем. С.-Пб.: Питер, 2004.

9. Alverson B., Froese E., Kaplan L., Roweth D. Cray Inc. Cray XC Series Network. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.cray.com>.

10. Степаненко С. А. Оценки ускорения вычислений гибридными системами // V Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления РАСО 2010»: Сб. докладов, Москва. 26–28 октября 2010 г. М.: Учреждение Российской академии наук. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2011. С. 61–71.

11. Infiniband Roadmap. [Electronic resource]. Mode of access: http://www.infinibandta.org/content/pages.php?pg=technology_overview.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ЧИСЛЕННЫХ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ И ГЕОМИГРАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ

И. Л. Хархордин¹, И. В. Горев², В. В. Горев²

¹ОАО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ», г. Москва,

²Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

На протяжении последних двух десятилетий в практике гидрогеологических исследований все большую роль начинает играть численное моделирование [1]+. Так, если в 80-х годах прошлого века разработкой численных моделей гидрогеологических процессов занимались всего несколько научных организаций, то сейчас численное моделирование используется во многих проектных институтах, на горно-добывающих предприятиях и в геолого-разведочных и изыскательских организациях. Произошел быстрый рост рынка программного обеспечения в соответствующей области. Также в указанный период продолжался экспоненциальный рост производительности вычислительной техники. Существенные изменения произошли и в требованиях к программному обеспечению. Они коснулись как интерфейса пользователя, так и вычислительных возможностей программ.

В плане интерфейса пользователя произошла смена нескольких поколений программ. До последнего времени графический интерфейс пользователя строился по принципу Препроцессор-Вычислитель-Постпроцессор. Единственной задачей Препроцессора была подготовка в графическом режиме файлов исходных данных в графическом режиме, а Постпроцессора – экстракция и визуализация результатов счета. Программные комплексы для численного моделирования были, как правило, лишены инструментов для работы с первичной гидрогеологической информацией. Это предполагает, что информация поступает к расчетчикам в уже подготовленном для создания модели формате. Такая структура программ удобна, когда расчеты выполняет сторонняя организация или специальный отдел. Тем не менее, такая организация программ затрудняет их использование для выполнения оперативных расчетов, необходимых, например, при анализе данных мониторинга или при возникновении аварийных ситуаций на горных предприятиях. Перспективным направлением дальнейшего развития программного обеспечения для гидрогеологических расчетов является разработка комплексных систем, организующих не только выполнение численных расчетов, но и работу с первичной информацией.

С точки зрения вычислительных возможностей, важным требованием к гидрогеологическим программам является возможность учета взаимодействия гидрогеологической системы с гидрогеологическими объектами различных типов. Под **гидрогеологическими объектами** далее мы будем понимать природные тела или инженерные сооружения, оказывающие влияние на формирование