

Л. Н. Иванов, И. Я. Корчагин
(Новосибирск)

**ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ
ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУР
МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Обоснована проблемно-ориентированная концепция построения структур массово-параллельных вычислительных систем и предложена структура на основе данной концепции. Проведено исследование характеристик маршрутов в подобной структуре для топологии типа четырехмерный тор. Показано ее преимущество перед существующими топологиями.

Введение. Существующие массово-параллельные (МРР) вычислительные системы не обеспечивают линейного роста производительности при увеличении числа процессоров, решающих задачу. Этот факт является следствием несбалансированности скорости межпроцессорных обменов и обработки данных в процессорах с характеристиками решаемых задач [1]. Попыткой проблемной ориентации параллельных систем является введенная в [2] концепция уровней и форм параллелизма для отражения состава спецпроцессоров, что в некотором смысле совпадает с понятием вычислительного модуля (ВМ) переменной размерности. Обзор и анализ параллельных проблемно-ориентированных процессоров относительно малой размерности, оцениваемой числом процессорных элементов (ПЭ), для систем автоматизированного проектирования СБИС проведены в [3]. Однако рассмотренные в [2, 3] структуры проблемно-ориентированных процессоров не обладают свойством масштабируемости, не сведены в систему и имеют пониженное быстродействие вследствие выполнения операций обработки и обменов на общем оборудовании. В существующих вычислительных системах используются обладающие свойством масштабируемости графы межсоединений на основе гиперкубов в булевом и евклидовом пространствах [1], причем число уровней структуры в системах равно, как правило, единице. Суперкомпьютер nCube [4] представляет собой пример МРР с двухуровневой структурой, т. е. является шагом в направлении многоуровневой организации МРР: топологии связей в системе ввода/вывода и ядре суперкомпьютера независимы и обладают свойством масштабируемости.

Постановка задачи. Современная микроэлектронная технология позволяет довести число процессорных элементов в МРР до сотен тысяч, что еще более усугубит проблему несбалансированности. Поэтому исследование структур МРР и их развитие по-прежнему представляют актуальную задачу.

Эффективность параллельных вычислений можно, очевидно, повысить, если структура МРР будет адекватна структурной и поведенческой моделям основных классов исследуемых на системе объектов.

Важной сферой применения МРР является решение так называемых недетерминированных задач, достигаемое многократным процессом обработки. К ним относятся задачи проектирования в различных технических областях, такие, например, как проектирование машин и механизмов, а также СБИС, создания высокомолекулярных химических соединений, разработки сплавов, принятия решений и управления сложными системами [5]. Ключом к решению подобных задач является использование принципа иерархии (уровня) представлений для структурной и поведенческой областей объекта с числом уровней не более семи. Размерности задач для одного и того же исследуемого объекта отличаются не только между его уровнями представлений, но и в пределах каждого из уровней за счет декомпозиции вычислительных процессов на подпроцессы различной размерности [3, 6].

Структура эффективной МРР должна не только отражать многоуровневое представление объекта, но и включать подсистемы общего назначения для всех уровней представлений, такие, например, как процессоры и коммуникационные среды (маршрутизаторы) для ввода/вывода, баз данных, графических приложений, интерпретации языков проектирования и т. п. Поэтому число уровней структуры МРР, вообще говоря, превышает число уровней представлений объекта.

В данной работе предлагается структура подобных систем с улучшенными характеристиками, отражающая многоуровневое представление объекта, проводится исследование и анализ характеристик маршрутов сообщений на примере одного уровня.

Проблемно-ориентированная структура МРР. Предлагаемая структура МРР представляет собой многоуровневую структуру. Учитывая, что структурные и поведенческие модели объектов между уровнями представлений, как правило, различны, структура эффективной МРР должна удовлетворять следующим требованиям:

- проблемной ориентации вычислительных модулей по уровням представлений с учетом размерности решаемых задач;
- множественности маршрутизаторов и соответственно многослойности топологии связей (по аналогии с топологией СБИС) по числу уровней структуры;
- масштабируемости топологии связей для каждого слоя при любой размерности системы с учетом ослабления связей по мере повышения уровня ее конструктивных компонентов.

Эти требования так же, как и приведенные далее, для каждого уровня структуры МРР являются результатом анализа параллельных проблемно-ориентированных процессоров относительно малой размерности и современных МРР с учетом предлагаемой концепции.

Число уровней структуры (слоев топологии) равно суммарному числу уровней представлений объекта и подсистем общего назначения. В структуре функционально и аппаратно разделены между собой вычислительные процессы и информационный обмен. Взаимодействие между уровнями структуры осуществляется с помощью межуровневого интерфейса.

Рассмотрим структуру МРР на примере одного уровня. Здесь принято, что структура уровня МРР блочная; компонентами этой структуры в порядке усложнения являются: процессорный элемент, модули первого и второго ти-

пов (базовые модули), модуль третьего типа и т. д. Причем модули, начиная с первого типа, могут быть трехмерными или четырехмерными. Каждый ВМ включает в себя модули меньшей размерности (ПЭ логично отнести к модулям нулевого уровня). Считаем, что базовые модули содержат N_1 или N_2 ПЭ (каждый с локальной памятью) и разделяемую память. Размерность базовых модулей, как правило, повышается при переходе на более высокий уровень представлений объекта и зависит в пределах имеющейся элементной базы от размерности решаемых задач, возможностей их распараллеливания и требований по вычислительной мощности.

Блочная структура МРР, реализованная в МПС-100 [1], тоже содержит ВМ различной размерности. Однако используемая в этой системе топология связей не обеспечивает масштабируемость при типичных значениях числа ПЭ в системе N^* , не позволяет работать с интенсивным трафиком обменных процессов и ограничивает возможности по распараллеливанию процессов обработки.

Масштабируемая топология межпроцессорных связей на каждом уровне предлагаемой МРР позволяет:

- обеспечить повышенный объем трафика обменных процессов внутри ВМ первого и более высоких типов, причем количество дополнительных межпроцессорных связей по сравнению с базовой топологией не должно быть существенным;
- ориентировать межпроцессорные связи по разрядности на класс решаемых задач различных уровней структуры.

В данной работе предлагается топологию межсоединений на каждом уровне структуры МРР выполнять в виде комбинации топологии базовых связей для всех ПЭ уровня и дополнительных связей внутри ВМ того или иного типа. Назначение дополнительных связей состоит в относительном повышении числа коротких связей с единичной длиной внутри модулей.

В качестве базовой топологии нами принята топология типа n -мерный тор ($n = 4$), обладающая свойством масштабируемости и превосходящая топологию типа гиперкуб по диаметру d и среднему диаметру d_{cp} системы [7].

Принимаем, что вычислительные модули имеют трехмерную или четырехмерную структуру. Размерность ВМ (число ПЭ) в зависимости от i и n имеет вид

$$N_m = 2^m, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер типа ВМ внутри групп трехмерных и четырехмерных структур модулей, $n = 3, 4$.

Число ПЭ в базовых модулях, очевидно, удовлетворяет уравнению

$$N_{1n} = 2^n.$$

Размерность ВМ МРР в зависимости от его номера j с учетом монотонной зависимости этих параметров имеет следующий вид:

$$N_j = 2^j \text{ для четных значений } j, \text{ причем } j = 4i, \quad (2)$$

$$N_j = 2^{j + f(j)} \text{ для нечетных значений } j, \text{ причем } j = 3i; f(j) = \text{mod}_4 j.$$

Из выражения (1) следует, что размерность ВМ i -го типа в N_{1n} раз превышает размерность модуля $(i-1)$ -го типа при любом i , т. е. в 8 (16) раз для трехмерных (четырёхмерных) структур.

Дополнительными связями базовых ВМ являются связи ПЭ по главным диагоналям трехмерных структур (аналогичный прием использован в [1] для плоской структуры), а в остальных модулях межпроцессорные связи формируют n -мерный тор из структуры с числом ПЭ, равным N_m . Структуры ВМ на примере трехмерных структур модулей представлены на рис. 1.

Связи базовой топологии отражены на рисунке жирными линиями, а дополнительные связи – обычными линиями.

Из рис. 1 можно получить следующее выражение для числа межпроцессорных связей в модулях типа второго и выше:

$$K_{ci} = 3 \cdot 2^{2n(i-1)}. \quad (3)$$

Исследование и анализ характеристик маршрутов. Проведем анализ зависимости параметров маршрутов: относительного числа маршрутов по шагам, средней длины маршрутов внутри ВМ, среднего диаметра (d_{cp}) системы от набора ВМ, входящих в систему, для топологии типа четырехмерный тор.

Определение числа маршрутов (m_v) с заданной длиной (v шагов) внутри ВМ и среднего диаметра системы представляет довольно трудоемкую комбинаторную задачу ввиду её большой размерности. Задача решается путем нахождения зависимости параметра m_v для структуры размерностью $N = 256$ от параметра m_{1v} для структуры размерностью $\sqrt{N} = 16$ и обобщением этой зависимости для любых значений N :

$$m_v = 2 \left[\alpha \sum_{\mu=1}^{v-1} m_{1,\mu} m_{1,v-\mu} + (1-\alpha) m_{1,\varepsilon}^2 + m_{1,v} \sqrt{N} \right], \quad (4)$$

где $\varepsilon = v/2$, $\alpha = 1(0)$ для нечетных (четных) значений v .

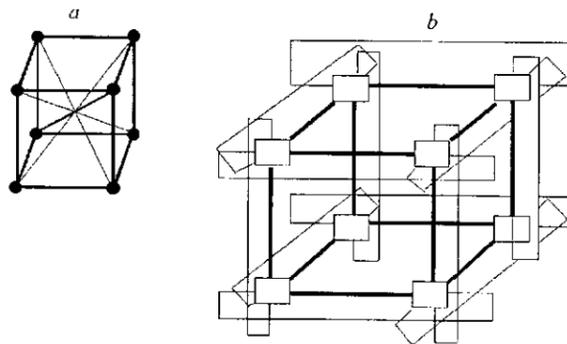


Рис. 1. Структура трехмерных ВМ: a – базовый модуль; b – модуль i -го типа ($i \geq 2$) (● – ВМ 0-го типа (ПЭ); □ – ВМ $(i-1)$ -го типа)

Используя формулу (4), получим следующее выражение для средней длины маршрутов внутри ВМ размером N :

$$l_{1cp} = 2 \sum_{v=1}^{2l_0} \left[\alpha \sum_{\mu=1}^{v-1} m_{1,\mu} m_{1,v-\mu} + (1-\alpha) m_{1,v}^2 + m_{1,v} \sqrt{N} \right] / M, \quad (5)$$

где $M = C_N^2$ – общее число маршрутов в ВМ, равное числу сочетаний из N по 2; l_0 – максимальная длина маршрута для структуры размерностью \sqrt{N} .

Средний диаметр системы, очевидно, равен:

$$d_{cp} = l_{1cp} + l_{2cp}, \quad (6)$$

где l_{2cp} – средняя длина маршрутов в межмодульном маршрутизаторе, причем каждый ВМ при этом сведен к одному составному узлу.

Учитывая, что топология межмодульных связей аналогична топологии внутримодульных связей, выражение для l_{2cp} можно получить из (5) после замены N на $N^* - N$. Результаты расчета зависимости характеристик маршрутов по формулам (4)–(6) от параметров ВМ, входящих в МРР, при $N^* = 2^{16}$ для топологии типа четырехмерный тор приведены в таблице.

Зависимость характеристик маршрутов от состава ВМ в структуре МРР с топологией типа четырехмерный тор

Модули, входящие в ВМ _g	Внутри ВМ наибольшей размерности									В МРР		
	Относительное число маршрутов по шагам m_v/M , %									$\frac{d_{cp,r}}{d_{cp,r}}$	$\frac{d_{cp,r}}{d_{cp,r}}$	$\frac{K_r}{K_r}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	–	–	–
ВМ ₀	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	$\frac{11}{8}$	1,0
ВМ ₂ – ВМ ₀	57,1	42,9	–	–	–	–	–	–	–	$\frac{3}{1,43}$	$\frac{11}{7,47}$	1,06
ВМ ₄ – ВМ ₀	4,7	21	42,3	32	–	–	–	–	–	$\frac{5,67}{3,20}$	$\frac{11}{7,30}$	1,19
ВМ ₆ – ВМ ₀	0,4	2,5	9,4	21	28,9	23,8	11	2,7	0,3	$\frac{8,33}{5,06}$	$\frac{11}{7,16}$	1,25

Примечание. Набор модулей ВМ_j – ВМ₀ включает модули из подмножества ВМ₀, ВМ₁, ..., ВМ_{j-1}, ВМ_j. $d_{cp,r}$ ($d_{cp,r}$) – d_{cp} для топологии типа гиперкуб (четырёхмерный тор); $\frac{K_r}{K_r}$ – отношение числа связей в системе для топологий типа гиперкуб и четырёхмерный тор.

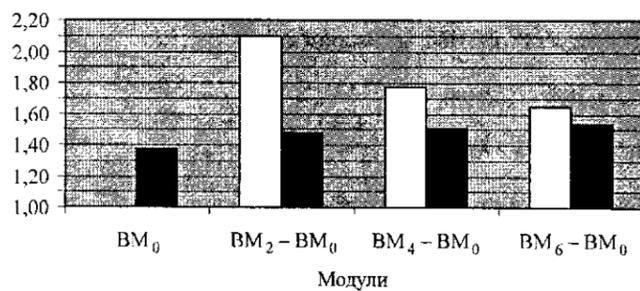


Рис. 2. Выигрыш по среднему диаметру системы: $\square - d_{cp} / d_{cp}$ (для модулей), $\blacksquare - d_{cp} / d_{cp}$ (для системы в целом)

Вариант маршрутизатора с топологией типа четырехмерный тор имеет ортогональные связи по каждой координате: вида 1–4 при безмодульной структуре (VM_0) и 1–2 при использовании базовых модулей (VM_1 и VM_2) [7]. Выигрыш по d_{cp} оценивается по сравнению с топологией типа гиперкуб.

Из анализа рис. 2, построенного по данным таблицы, следует, что выигрыш по d_{cp} : а) превышает рост числа дополнительных связей; б) увеличивается с ростом числа типов ВМ в МРР; в) внутри модуля больше, чем в МРР в целом (так, в базовом модуле VM_2 выигрыш по d_{cp} более двух).

ВЫВОДЫ

1. Предложенная структура массово-параллельных вычислительных систем позволяет повысить эффективность за счет расширения возможностей по выражению параллелизма, совместному использованию данных, проблемной ориентации вычислительных модулей на структурные и поведенческие модели исследуемых объектов.

2. Топология межпроцессорных связей типа четырехмерный тор с повышенной связностью внутри вычислительных модулей МРР позволяет повысить допустимую интенсивность трафика обменных процессов, особенно внутри ВМ, при увеличении количества межпроцессорных связей по сравнению с базовой топологией не более чем на 25 %, что соответствует требованию к масштабируемой топологии межпроцессорных связей на каждом уровне предлагаемой МРР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев В. В. Параллельные вычислительные системы. М.: Нолидж, 1999.
2. Бандман О. Л., Миренков Н. Н., Седухин С. Г. и др. Специализированные процессоры для высокопроизводительной обработки данных. Новосибирск: Наука, 1988.
3. Верник В. М., Корчагин И. Я., Боголюбов Ю. Е. Проблемно-ориентированные процессоры и их применение в системах автоматизированного проектирования СБИС. Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. Вып. 1 (1597). М.: ЦНИИ Электроника, 1991.

4. Дубова Н. Суперкомпьютер pCube // Открытые системы. 1995. № 2.
5. Осуга С. Обработка знаний. М.: Мир, 1989.
6. Армстронг Дж. Р. Моделирование цифровых систем на языке VHDL. М.: Мир, 1992.
7. Иванов Л. Н., Корчагин И. Я. Коммутационная сеть с повышенной эффективностью межсоединений для систем с массовым параллелизмом // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. Сер. 1. Математика. Информатика. Абакан, 1999. Вып.3.

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!