

Для уменьшения разрядности чисел рекомендуется включать интеграторы после нерекурсивной части, так как входящий в эту часть дифференциатор обеспечит отсутствие постоянных составляющих на входе любого интегратора и предотвратит их накопление.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет строить рекурсивные фильтры общего вида с квазиконечной ИХ. В случае квазисимметричной или квазиантисимметричной ИХ фазовая характеристика будет квазилинейной. Эксперименты показали, что при компенсации остаточных БИХ их уровень соизмерим с погрешностями квантования чисел в процессоре (для процессора Intel Pentium – 10^{-6} и 10^{-15} соответственно для 32- и 64-разрядных чисел с плавающей точкой). Для ИХ в виде аппроксимации окна Хэмминга двумя отрезками полинома 3-й степени, $\alpha = 0.99999$, $M = 5000$, фазовая погрешность на частоте среза составила $0,05^\circ$, а среднеквадратическое значение этой погрешности в полосе пропускания – $0,02^\circ$.

Таким образом, в интеллектуальных системах автоматизированного проектирования при жестких ограничениях, накладываемых на время перестройки параметров, целесообразно использовать рекурсивные фильтры с конечной или квазиконечной импульсной характеристикой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воронцов В.Л., Лукин Р.П.* Повышение эффективности информационно-телеметрического обеспечения в условиях риска потерь информации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006, №3.
2. *Сарычев В.В., Ткаченко М.Г.* Использование цифровых фильтров в канальных процессорах информационно-измерительных систем. – М.: Естественные и технические науки. 2008, №1.

УДК 681.324

Ю.А. Цветкова

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОМАШИНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Введение. Современное развитие средств моделирования требует от компьютеров (ЭВМ) все большей производительности, повышение которой идет по пути создания разнообразных аппаратных ускорителей (акселераторов (АК)) вычислительного процесса и вычислительных систем (ВС) [1-5].

Среди ВС наиболее эффективны по набору показателей (производительность /стоимость; широкий класс приложений; надежность; масштабируемость и др.) многомашинные (кластерные) ВС на базе сетевых Switch-технологий, которые в настоящее время широко применяются при построении разнообразных Grid-систем [2, 6].

Статья посвящена комплексному подходу к повышению эффективности многомашинной ВС путем эволюции ее структуры (объединение кластера ЭВМ и кластера акселераторов на базе сетевой Switch-технологии) и оптимизация обработки соответствующего этой структуре класса задач. Данная структура ВС позволяет эффективно обрабатывать широкий класс практически важных задач.

1. Условия эффективности обработки задач в ВС. Задача с объемом счета (v) в простых операциях (ОП) может быть выполнена одним процессором (узлом)

с производительностью $P1$ [ОП/с] или кластером из N узлов с пиковой производительностью $P_{кл} = P1 * N$, но если узлы зависимы, то $P_{к}(N) < P1 * N$. Требуемое от ВС число узлов на определенном временном отрезке и логические зависимости по обмену данными задается графом задачи. Если ВС выделяет ресурс точно в требуемый момент (и не раньше и не позже) и в необходимом объеме (не меньше и не больше), то эффективность обработки $\eta=1$, а $P(N(t), t)=P1 * N(t)$. Это режим идеальной адаптивной обработки (идеальный динамический режим). Назовем ее графовым параллельным компьютером (ГПК). Для ГПК выполняются условия: $N(t)=n(t)$, где $n(t)$ – текущий параллелизм задачи, и время обмена $T_{обм}=0$. В статическом режиме (СР) $P_{кл}(N)=const$ и всегда $\eta < 1$. В статье рассматривается лишь статический режим. Для идеального СР существуют соотношения для параметров обработки, которые определяются только параметрами задачи и числом N ($1 < N \leq n_{max}$), где n_{max} – наибольший параллелизм задачи. При $N > n_{max}$ величина η резко уменьшается.

$$\eta = S(N) / N = 1 / (1 + \bar{T}_{изб}(N)); \quad (1 < N < n_{max}); \quad (1)$$

$$S(N) = T1 / T_{сч}(N), \quad \bar{T}_{изб}(N) = T_{изб}(N) / T1,$$

где $S(N)$ – ускорение обработки; $T_{изб}(N)$ – избыточный ресурс кластера; $\bar{T}_{изб}(N)$ – нормированное значение величины $T_{изб}(N)$; $T1$, $T_{сч}(N)$ – время счета программы соответственно одним и N узлами.

Значение $T_{изб}(N) > 0$ обусловлено только изменением параллелизма задачи $n(t)$ в ходе счета ($0 < t \leq T_{сч}(N)$).

По процессу счета можно выбрать оптимальный вариант по выбранным приемлемым значениям ускорения и эффективности ($N_{опт}$; $S(N_{опт})$; $\eta(N_{опт})$).

Учитывая, что зависимость (1) нелинейная и для каждой задачи своя, то оптимизация осуществляется методом целенаправленного подбора N по специальному алгоритму.

При обработке задачи в реальной ВС к $T_{сч}(N)$ добавляется время внешнего обмена $T_{обм}(N)$ и тогда время обработки задачи $T_{обр}(N) \leq T_{сч}(N) + T_{обм}(N)$. Знак ($<$) обусловлен возможностью процесса обмена на фоне процесса счета, что требует независимых каналов обмена и достигается установкой коммутаторов. Величина η снижается дополнительно также из-за несоответствия структур графа задачи и структуры ВС. Необходимость максимального соответствия структур для достижения η_{max} доказана практикой [1].

В [2] отмечается, что разброс величины $P_{кл}(N)$ от пиковой составляет от 90% до 2% и для ВС с $N > 10$ вопрос согласования структур выходит на передний план. Граф является информационным ядром задачи, т.е. содержит информацию о специфике, числе и объеме операторов, их связях в ходе выполнения задачи. Поэтому для согласования структур необходимо представлять граф в различных эквивалентных формах.

2. Эквивалентные формы представления графа задачи и их использование для повышения эффективности обработки задач в ВС. Математическая модель задачи представляется операторами различного уровня и каждому уровню соответствует свой граф. Каждый последующий уровень получается из предыдущего декомпозицией его операторов (разложением). При этом последний включает только самые простые (+, -, *, /).

Понятие оператора более общее, чем понятие функции и охватывает как простые операции, так и сложные. Над ними возможны различные преобразования,

при этом сложный оператор может представляться множеством простых [3]. Оператор связывает переменные причинно-следственной связью и может описывать различные связи (линейные, нелинейные, статические, динамические и другие). Практическая реализация операторов может быть программной, аппаратной или программно-аппаратной.

Для целей статьи представляют интерес следующие формы эквивалентного представления графа задачи:

- 1) функциональная форма (ФФ);
- 2) каноническая параллельная форма (КПФ);
- 3) гомоморфная свертка (ГС) [2].

Применим первую форму (ФФ), для чего разделим конечное множество операторов графа задачи $q_i \in Q$ ($i=1,2,\dots, I$) на три подмножества так, чтобы:

$Q^1 \cup Q^2 \cup Q^3 = Q$ и $Q^1 \cap Q^2 = Q^3$, при этом $q_i^1 \in Q^1$ будут обрабатываться только универсальными ЭВМ, $q_i^2 \in Q^2$ – только АК, а $q_i^3 \in Q^3$ – ЭВМ совместно с АК.

Повышение производительности ЭВМ с помощью АК осуществлялось всегда по мере развития больших интегральных схем (БИС) [3, 4]. АК разгружает центральный процессор ЭВМ от узкоспециализированных операторов, обусловленных спецификой задачи – вычисление элементарных и специальных функций, прямое и обратное преобразование Фурье, операции над матрицами и другие. Ускорение в выполнении операторов аппаратным путем по сравнению с программным может достигать для некоторых операторов до 100 [4]. Для повышения эффективности обработки задачи на кластере из универсальных совместимых ЭВМ объединим его с кластером из АК. Пример двухслойной структуры гетерогенного кластера из четырех ЭВМ с АК и двух коммутаторов K1, K2 представлен на рис. 1. Данная структура обладает новыми качествами. Повышается производительность кластера за счет ускорения счета в обоих слоях и ускорение обмена в слоях и между слоями. Коммутатор образует R/2 независимых каналов обмена, где R – число портов. Повышается надежность.

Управление обработкой задачи возлагается на одну из ЭВМ. Связь между ЭВМ и ее АК (оформлены в виде отдельной платы) осуществляется по внутренней шине. АК получает задания от ЭВМ, выполняет их самостоятельно (или коллективно в своем слое) и отправляет результаты ЭВМ.

Для выбора оптимального варианта обработки воспользуемся второй и третьей формами представления (КПФ, ГС). Форма КПФ позволяет представить граф задачи в виде групп (подграфов) независимых операторов от начала графа, а гомоморфная свертка – в виде подграфов операторов по их связности в порядке их обработки от начала графа.

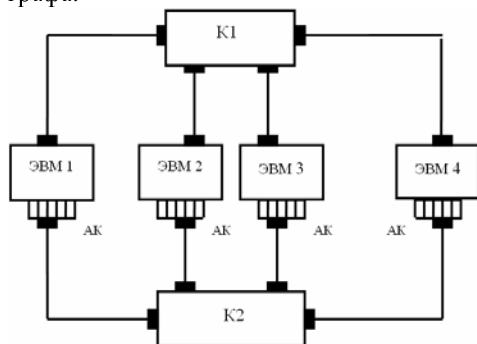


Рис. 1. Двухслойная структура гетерогенного кластера

Форма КПФ позволяет определить внутренний параллелизм задачи в группах (n^k), где $k=1,2,3 \dots K_{\max}$ – (число групп) и максимальный параллелизм задачи $n^{K_{\max}}$. Общее число узлов в ЭВМ должно быть $N \geq n^{K_{\max}}$. КПФ позволяет также с помощью отображения операторов групп на конкретное число узлов ЭВМ ВС составлять расписание их работы по специальным алгоритмам без учета и с учетом обмена, моделировать процесс обмена отдельно. КПФ составляется по матрице смежности графа задачи с помощью ЭВМ, начиная со входных операторов. При этом множество Q разбивается на упорядоченные подмножества (группы) Q_k ($k=1,2,3 \dots K_{\max}$) так, что $Q_1 \cup Q_2 \cup Q_3 \dots \cup Q_{K_{\max}}=Q$ и $Q_1 \cap Q_2 \cap Q_3 \dots \cap Q_{K_{\max}}=\emptyset$. Число “ K ” есть порядковый номер оператора q_i от начала графа по логическим связям $q_i^k \in Q^k$ ($k=1,2,3 \dots k_{\max}$). Если некоторому q_i соответствует несколько различных чисел k , то применяется специальный способ “фиктивных операторов” для выбора одного значения. Изложение этого способа не входит в план статьи. После преобразования граф примет линейную групповую форму (КПФ) удобную для параллельной обработки и будут представляться уже не матрицей смежности $V(I \times I)$, а числом $(k_{\max}-1)$ матриц смежности V_k^{k+1} ($k=1,2,3 \dots (k_{\max}-1)$) значительно меньшего размера. Матрицы V_k^{k+1} связывают смежные группы операторов Q_k и Q^{k+1} , а число ‘ k ’ указывает на последовательность их обработки. Операторы одной группы независимы между собой и могут обрабатываться параллельно или последовательно.

Выбирается оптимальный вариант обработки по счету путем ряда итераций, начиная с $N=n^{K_{\max}}$ и постепенно уменьшая число узлов. На каждой итерации осуществляется распределение операторов по ЭВМ. Для этого с помощью третьей формы (ГС) по матрицам V_k^{k+1} ($k=1,2,3 \dots (k_{\max}-1)$) множество Q разделяется на подмножества, в которых универсальные операторы обрабатываются только последовательно, а специальные операторы могут обрабатываться одновременно в своем слое с универсальными.

Число вариантов разбиения, как правило, выражается очень большим числом. Из них можно выбрать оптимальный вариант по загрузке ЭВМ и времени внешнего обмена. Распределение подмножеств Q^l ($l=1,2,3 \dots L$) по ЭВМ осуществляется с учетом их производительности. Если Q^l соответствует общее число операций V^l [оп], то каждой m -ой ЭВМ набирается объем

$$V_m = \frac{P_m}{\sum_{m=1}^M P_m} * \sum_{l=1}^L V^l, \quad (2)$$

где P_m – производительность отдельной ЭВМ ($m=1,2,3 \dots M$); M – число ЭВМ; $\sum_{l=1}^L V^l = V[on]$ – общее число операций в задаче; $V = \sum_i^I V_i$, где V_i – объем отдельного оператора q_i .

При таком распределении обработка задачи будет закончена всеми ЭВМ примерно одновременно. Аналогичная оптимизация при необходимости может выполняться для обработки подграфов в ЭВМ, в качестве которых могут выступать SMP-серверы с различным числом процессоров.

После оптимального распределения объема V по ЭВМ моделируется процесс внешнего обмена между ЭВМ и выбирается оптимальный вариант, при котором $T_{обм} = T_{обм \min}$. При моделировании берутся реальные характеристики коммуникационной системы кластера и сетевой Switch-технологии. Моделирование осуществляется по тому же алгоритму, что и для процесса счета. Затем можно выполнять полное моделирование – одновременно для всех процессов счета и обмена, которое проводится по более сложному алгоритму.

3. Применение разработанной структуры ВС. Данная структура может успешно применяться для моделирования процессов в сложных системах, операторы которых разнообразны по своей физической природе и описываются различными системами уравнений большой размерности и специальными уравнениями. Системы уравнений большой размерности для решения разбиваются по всем узлам кластера, включая АК. Структура ВС позволяет осуществлять внешние обмены типа: ЭВМ-ЭВМ, ЭВМ-АК, АК-АК. При решении частных задач они разбиваются по ЭВМ, а АК выполняют спецоператоры и вспомогательные операции по заданию ЭВМ. Кластер комплектуется из готовых элементов – ЭВМ, коммутаторов, линий связи, интерфейса и программного обеспечения. Для АК также существуют программы для широкого класса задач, а при необходимости могут быть выполнены по заказу. Данная ВС может быть применена: в системах автоматизированного проектирования, в технологических и диагностических комплексах; для замены части натуральных испытаний сложных объектов испытанием на математических моделях в различных режимах и обработки полученных численных результатов; в качестве тренажерного комплекса для подготовки операторов; для моделирования групповых действий объектов (роботов, боевых машин) – с ЭВМ тогда связываются отдельные объекты, которые взаимодействуют в своем слое.

На основании изложенного можно сделать вывод: объединение кластера ЭВМ и кластера акселераторов, и согласование структур графа задачи и кластера выбором оптимального варианта обработки задачи повышает эффективность предлагаемой структуры кластера на широком классе задач.

Заключение. Разработан комплексный подход к повышению эффективности многомашинной ВС. Он состоит в усложнении структуры ВС за счет кластера акселераторов, а также в согласовании структур графа задачи и ВС выбором оптимального варианта обработки. Изложено содержание процесса оптимизации на основе различных форм эквивалентного представления графа задачи (канонической параллельной формы и гомоморфной свертки). Разработанная структура кластера на основе двухслойной коммутации эффективна на широком классе задач, так как обладает повышенной производительностью по процессам счета и обмена, а так же повышенной надежностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пятибратов А.П., Гудыно Л.П., Кириченко А.А.* Вычислительные системы, сети и телекоммуникации / Учебник 2-е издание. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 512 с.
2. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.
3. *Балашов Е.П. и др.* Микро и мини-ЭВМ / Учебное пособие для вузов – Л.: Энергоиздат, 1984. – 376 с.
4. *Хвоц С.Т. и др.* Микро процессоры и микро ЭВМ в системах автоматического управления / Справочник. – Л.: Машиностроение, 1987. – 640 с.
5. *Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А.* Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
6. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / Учебник для вузов 2-е издание. – СПб.: Питер, 2005. – 864 с.