



УДК 681.325.5:528.851

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕЙЕРНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ С ПРОБЛЕМНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Н.В. ЩЕРБИНИНА

*Белгородский
государственный
национальный
исследовательский
университет*

*e-mail:
shcherbinina@bsu.edu.ru*

Аннотация: представлено обобщение метода распараллеливания изменением внутренних связей конвейерно-параллельной структуры, ориентированного на поточную обработку цифровых космических изображений вычислителя с разработкой стратегий снижения сложности выполняемых функций, алгоритмов и операций, представляющих компьютерные реализации линейных ограниченных непрерывных функционалов и операторов в векторных линейных пространствах.

Ключевые слова: изображение, конвейерный, систолический, распараллеливание, теорема Рисса-Фреше, линейный оператор, интегральное представление.

Весомую часть в списке «бортовых» и «наземных» процедур поточной обработки данных при дистанционном космическом зондировании составляют процедуры радиационной, геометрической, радиометрической, приборной, коррекции значений пикселей цифровых изображений на угол места солнца, а также нормализации, фильтрации, спектрально-корреляционной обработки, линейных преобразований векторов (и самих изображений). Решаются эти задачи в потоковом режиме, потоки организуются на считываемых строках формируемого цифрового космического изображения и на векторах априорной или измерительной информации (как правило, при этом двумерные преобразования организуются в виде последовательности одномерных «по строкам» и на полученном результате аналогично «по столбцам»). Обширные исследования и практика разработок эффективных, ориентированных на работу с космическими изображениями, вычислительных средств резюмируют прерогативу распределенных вычислений на систолических, параллельно-конвейерных (с реконfigurацией архитектуры) процессорах [1].

Наиболее «популярными» операциями по частоте реализации являются коррекции пикселей в потоках на мультипликативные и аддитивные составляющие, свертки векторов (с участием строк и столбцов изображений), скалярные и покомпонентные перемножения (особенно для реализации преобразований Фурье по системам функций и фильтров в пространственно-частотных координатах). Однако сокращение времени работы собственно конвейера операций или/и аппаратуры (как правило, распараллеливанием) при минимизации аппаратных затрат все еще остается исследуемой проблемой.

Обычно вычислительные процессы и средства проектируются на базе модулей или арифметико-логических устройств, ориентированных на представление алгоритмов в «традиционных» алгебрах чисел и логики, что является достаточно надежным инструментом решения любой вычислительной задачи при наличии необходимого метода решения задачи и программного обеспечения [2]. При этом в качестве средства повышения производительности выступают:

- 1) использование элементной базы с повышенным быстродействием (в том числе с «внутренним» параллелизмом в исполняемых операциях);
- 2) снижение значений функций сложности выполняемых в вычислительной среде алгоритмов, преобразований, операций в стратегиях, приведенных в [3];
- 3) распараллеливание и/или конвейеризация (в том числе с реконfigurацией архитектуры) процессов с применением многопроцессорной или однородной вычислительной среды.

Применение таких универсализированных по функциональности подходов и средств к задачам обработки данных, скажем, приведенным выше, в принципе, оправдано, хотя и приходится решать проблемы параллельного программирования, диспетчеризации, управления в согласовании с задачами, решаемыми в потоках данных.

В соответствии с выше описанной проблемной ориентацией проектируемого вычислителя целесообразно рассмотреть параллельно-конвейерную структуру с учетом следующей особенности:

вычислитель ориентирован на поточное вычисление функционалов на основе теоремы Рисса-Фреше [4], вычисление элементов векторов дискретного интегрального представления линейных ограниченных операторов [5] (как следствие из теоремы Рисса-Фреше в том числе), выполнение покомпонентных перемножений массивов.

Целесообразно провести анализ конвейерной схемы (операции свертки - умножения) [6], представленной на рисунке 1 (положим сначала, что это схема умножения чисел, представленных в некоторой позиционной системе счисления с основанием C , где A_1 и B_1 - разряды входных операндов, D_1 - разряды результата операции).

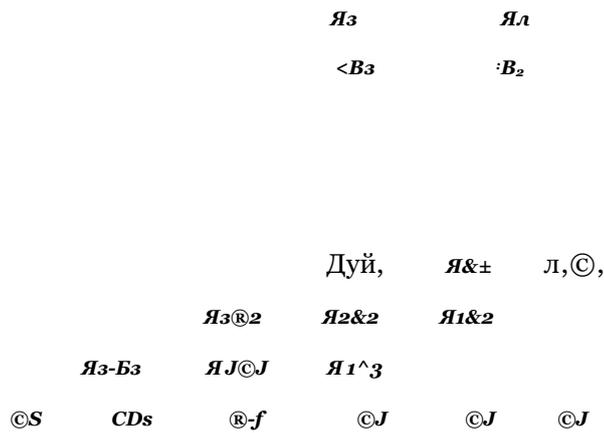


Рис. 1. Схема операции свертки- умножения

В ромбе частичных результатов операции произведения вида A_1B_1 выполняются по модулю C , а отделяемый при этом перенос (разряды более старшие, чем разрядная сетка в позиции по отношению к операндам) суммируется со старшим в строке элементом, если выполняется операция умножения операндов. Для выполнения операции свертки операндов достаточно все переносы удерживать в столбце (закрыванием регистров передачи переноса и резервированием в каждой позиции столбца двойную разрядную сетку). В первом случае операнды - это числа в позиционной системе счисления, во втором случае - элементы массива (вектора), причем и в первом и во втором случае они могут иметь не только положительные знаки и даже превышать отведенную в операндах ширину разрядной сетки в позициях. Результаты в силу свойства дистрибутивности для умножения всегда будут правильными. «Непривычную» форму представления числа можно не брать в расчет. Если необходимо или желательно результат - свертку представить с индексами произведений в каждой частичной строке, изменяющимися по нарастанию «навстречу» друг другу, то достаточно один из операндов записать не слева-направо, а справа-налево. При этом эта схема является наследником при увеличении размеров решаемых задач, т.к. каждая пара вида A_1B_1 тоже может быть выполненной ранее сверткой, а не умножением - это демонстрирует суперпозицию сверток, причем самая первичная свертка может быть принята за базовую операцию и реализована в виде таблицы. Здесь разряд D_6 результата появляется при настройке схемы на умножение. Такой подход для умножения - выполнение сначала свертки (здесь на рисунке каждая строка представлена в системе счисления с основанием C_2 , иначе бы пришлось каждую строку сжать по горизонтали так, чтобы старшие компоненты произведений младших номеров столбцов пересеклись с младшими компонентами кодов старшего столбца - для выполнения умножения), а затем покомпонентное перемножение вектора - результата и нормирующего вектора, представляющего собой последовательность C в степени i , где i - отсчитываемая от нуля позиция элемента в нормирующем векторе. Выполнение покомпонентного перемножения операндов ре-

лизуется в схеме управлением регистрами так, чтобы можно было выбрать на выходе только главную диагональ ромба.

В наиболее близком по структуре конвейерно-параллельном устройстве [6] организованы три тактируемых потока данных:

- транзит множителя и множимого вдоль столбцов ромба с соответствующими коммутациями;
- передача строк частичных произведений через строку, что реализует распараллеливание конвейера с минимально возможным в данном случае добавлением аппаратуры в схему - строки сумматоров, собирающих с двух ветвей конечный результат;
- тактируемый транзит переносов вдоль каждой строки, причем не только переносов арифметических, но и переносов двоичных внутри каждого частичного произведения.

Что касается перечисленных выше пунктов 1), 2) и 3), то в рамках приведенной проблемной ориентации решены задачи:

- использования полностью ресурса по быстродействию операционных элементов для любой элементной базы, т.к. на операционный элемент [6], а это для частичных произведений сумматоры со стробируемыми соответствующими разрядами множителя входами, подается порция позиции операнда, соответствующая разрядности сумматора, а на соседний старший сумматор через регистр подается следующая более старшая порция разрядов к моменту формирования переноса на первом сумматоре. Абсолютно все операнды подаются в потоке с описанными задержками и такт подачи операндов становится минимально возможным для выбранной элементной базы и равным времени задержки на операционном элементе (так как, например, сумматор, отдавший в регистр формирующийся последним внутри сумматора перенос, все остальные результаты «давно» уже отдал в регистры потока и стал свободным для загрузки его порцией разрядов следующей пары операндов подаваемых на него, без ожидания формирования правильного результата по всей разрядной сетке вычислителя). В [7] показано, что по крайней мере проблемно ориентированные вычислители целесообразно проектировать, ориентируясь именно на такой способ обмена данными во всех шинах и для всех устройств вычислителя;

- на основе приведенной схемы с использованием параллельно-конвейерного тактируемого коммутатора (в отличие от жестких коммутаций разрядов множимого и множителя с операционными элементами) реализован процессор с широкой функциональностью [1].

Не решены задачи:

- обобщения условного распараллеливания проблемно-ориентированного вычислителя;
- снижения значений функции сложности частичных умножений в строках схемы свертки-умножения.

Цель исследований: определение оптимального проекта для потокового конвейерного вычислителя свертки, умножения, покомпонентных перемножений векторов.

В развитие метода условного распараллеливания целесообразно не ограничиваться распараллеливанием на две ветви. В общем случае, формула для числа тактов в конвейере, определяющих общее запаздывание результата относительно ввода при организации L ветвей имеет вид:

$$Q(L) = Q_0/L + \log_2 L, \quad (1)$$

где логарифм двоичный - дополнительные такты при организации двоичного дерева операционных единиц (сумматоров) сборки результата, а Q_0 - исходная сложность алгоритма, измеренная в количестве последовательных тактов конвейера.

Для дополнения к пояснению условности распараллеливания можно заметить, что каждый операнд транзитом проходит через все регистры передачи операндов, при стандартном распараллеливании поток разбивается на два, демультиплексируется и только половина операндов проходит через ветвь транзита. Наихудший вариант распараллеливания строится на аппаратном повторе ветвей конвейера.

На рис. 2 показан систолический конвейер с описываемой ориентацией.

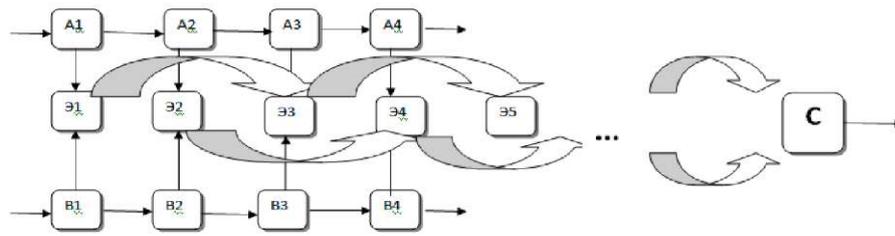


Рис. 2. Систолическая структура с условным распараллеливанием на две ветви

Здесь A1,B1, - регистры транзита операндов, Э1 - элементарные функциональные вычислители, C - дополнительный элемент сборки результата.

Кривая вычислительной сложности количества последовательных тактов в процессоре $Q(L)$ в зависимости от L имеет минимум при L равном ближайшему целому к $L^* = Q_0 \ln 2$ (при этом количество условных ветвей параллелизма не превышает ближайшее значение к L сверху от степени двойки). Если процессор ориентирован на конвейерный алгоритм, а его элементарные машины имеют конвейерное исполнение, то при изотропности структур машин в процессоре в них также реализуется формула (1) с M ветвями. Оптимальной такую структуру следует считать при выборе ближайшего целого к $M \cdot L^* = Q_1 Q_0 \ln 2$, где Q_1 - количество тактов конвейера в элементарной машине Э1.

В [8] показано, что при обработке изображений алгоритмы класса Фурье-преобразований, свертки, линейных фильтров, реализуемые в алгебре с операциями «сложить» и «умножить», более эффективно осуществляются на основе операций, таких, например, как, восьми-, четырех - или двухточечное преобразование Фурье, Адамара, Уолша, представимых довольно легко таблично и организуемых однократной выборкой значений из таблицы, размещаемой в согласованно структурируемой памяти компьютера. Однако легко заметить, что этим таблицам однозначно соответствуют таблицы восьми-, четырех - или двухточечных свертки векторов соответствующих размерностей [7]. При этом, вычислительное устройство, реализующее вычислительные процессы на основе «классической» арифметики, работает на порядки эффективнее, если в этой арифметической системе заменить двухместную операцию умножения, скажем, на перечисленные выше билинейные, то есть удовлетворяющие условиям дистрибутивности и тому подобным условиям табличные операции. В [3] показано, что возврат вычислителя в традиционную арифметическую систему не только реализуется элементарно, но и обеспечивается при этом гораздо более эффективная реализация той же операции умножения. Примером тому теорема [3] о замене классического алгоритма умножения целых чисел (алгоритма сложности n^3 (n - разрядность операции с учетом того, что можно считать разрядности входных операндов одинаковыми, заменяя нулями отсутствующие старшие разряды у «малоразрядного» операнда)) тремя быстрыми преобразованиями Фурье (БПФ) (с вычислительной сложностью результирующей операции $3n \log_2 n$). Строго говоря, здесь еще присутствует аддитивная добавка в виде $3n$, где $2n$ - количество операций при покомпонентном перемножении спектральных образов (достаточно использовать спектры первого и второго квадрантов спектральных координат) и n - вычислительные затраты на использование нормирующего вектора при приведении результата от свертки к умножению, но в данных расчета будем иметь в виду, что размерности решаемых задач не менее $n = 256$, и тогда добавкой в $3n$ можно пренебречь).

При моделировании на ПК двумерной свертки двух изображений размерностью 512x512 пикселей в индексной палитре (глубина цвета 1 байт) с реализацией модели конвейерно-параллельного вычислителя с условным распараллеливанием на 4 ветви, тактовой длиной 512 табличных операций с таблицами арифметической системы, вместо операции умножения, получено сокращение времени процедуры свертки по сравнению с использованием «традиционного» ускорения процедурой 512-точечного БПФ (конвейер в графе Баттерфляй) около 29 раз.



Расчетное сокращение времени составило примерно $3 \times 512 \times 512 \times 16 / (4 \times 256 \times 256) = 48$ раз (в числителе - типовой расчет затрат тактов на использование БПФ, в знаменателе - расчет числа выборок из памяти для восстановления суммированием со сдвигом полной размерной свертки).

Аналогичные результаты по сокращению времени работы процедуры фильтрации полос на космическом изображении получены для варианта программы [9].

Выводы

Получено соотношение для минимизации последовательных тактов конвейера систолического процессора с использованием распараллеливания без внесения в схему существенных аппаратных затрат (условного распараллеливания), в том числе и для одного этапа рекурсии распараллеливания с использованием в частичных произведениях табличных методов реализации сложных операций.

Работа выполнена в рамках дополнительного внутривузовского конкурса грантов «Инициатива», проект № ВКГИ 034-2013.

Список литературы

1. Алиева М.А., Винтаев В.Н., Гадживердиев А.З., Исмаилов К.Х., Эюбов Ф.Ф. Разработка специализированных процессоров обработки данных дистанционных измерений. // Отчет о НИР № Гос.регистрации 01.85.0047346, НПО Космических исследований МОМ СССР, 1984. - 113 с.
2. Григорьев В. Р. Методы параллельной цифровой обработки информации в трехмерных оптических интегральных схемах // дисс. на соискание ученой степени к.т.н. по спец. 05.13.17, Москва, 2005. - 231 с.
3. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов/ А. Ахо, Д. Хопкрофт, Д. Ульман // М.: Мир, 1979, - 536 с.
4. Морен К. Методы Гильбертова пространства/К. Морен. // М.: Мир, 1965. - 570 с.
5. Коллатц Л. Функциональный анализ и вычислительная математика// Москва. Мир, 1969. - 448 с.
6. Аллахвердов Ф.М., Винтаев В.Н., Исмаилов Т.К., Исмаилов К.Х., Гадживердиев А.Э., Мамедов Ф.А., Бадалов А.Р. Конвейерное множительное устройство. НПО космических исследований// МОМ.- АС СССР №1043642 БИ №35, 23.09.83.
7. Винтаев В.Н. Вычислительное устройство на основе проблемно-ориентированной компьютерной арифметики. дисс. на соискание ученой степени к.т.н. по спец. 05.13.05, Москва, 1989. - 183 с.
8. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. // М.: Мир, 1978. - 848 с.
9. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилнев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н. Н. Модернизация процедуры цифровой коррекции возмущений в изображениях, формируемых панхроматической оптико-электронной съемочной аппаратурой космического аппарата «Монитор» // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. - 2013. - № 8(151). - Вып. 26/1. - С. 194-199.

MODELING OF THE CONVEYOR - PARALLEL CALCULATOR WITH PROBLEM ORIENTATION

N.V. SHCHERBININA

*Belgorod National
Research University*

*e-mail:
shcherbinina@bsu.edu.ru*

The generalized method of parallelization by change of internal communications of the conveyor-parallel structure, focused on line processing of digital space images. Development of strategy of decrease in complexity of carried-out functions, algorithms and the operations representing computer realization of linear limited continuous functionalities and operators in vector linear spaces.

Keywords: image, conveyor, systolic, parallelization, Riesz-Frechet's theorem, linear operator, integrated representation.