

Многомерные многоскоростные системы и их реализация на различной элементной базе

М.К. Чобану

Московский энергетический институт (технический университет), cmk2@orc.ru

Аннотация — Рассмотрены бурно развивающиеся последнее время многомерные (ММ) многоскоростные системы, а также новые программные и аппаратные средства обработки ММ сигналов, основанные на применении сигнальных процессоров фирмы Texas Instruments и графических процессоров фирмы nVidia. Резко возросшая в течение последних лет потребность в алгоритмических, программных и аппаратных средствах обработки ММ сигналов требует создания гибких технологий очень высокого уровня. Рассмотрена часть задач, связанных с созданием и развитием новых вычислительных технологий на основе "истинных" (т.е. неразделимых) ММ подходов.

Ключевые слова — многомерные многоскоростные системы, банки фильтров, децимация, интерполяция, неразделимые системы.

I. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних лет резко возрос интерес к решению задач анализа, синтеза, обработки, кодирования и сжатия многомерных (ММ) сигналов для их передачи, хранения, архивирования и защиты от несанкционированного доступа в системах связи (проводных и беспроводных) при наличии ограничений (на скорость передачи, на полосу пропускания, на динамический диапазон и т.д.).

В данной работе рассматривается применение ММ многоскоростных систем в задачах обработки неподвижных изображений (2-D сигналов), видеосигналов (3-D сигналов) и меняющихся во времени томографических снимков (4-D сигналов).

До недавнего времени большинство разработок было сконцентрировано на одномерных сигналах, а обработка ММ сигналов реализовывалась через тензорное (разделимое) произведение. Лишь небольшое число исследователей в мире сконцентрировали свои исследования и разработки на «истинном» ММ случае обработки сигналов. Под истинным ММ случаем понимается допущение и неразделимой дискретизации, и неразделимой фильтрации.

Использование неразделимых фильтров ведет к большему числу степеней свободы и синтезу лучших фильтров для обработки ММ сигналов. Неразделимая

децимация позволяет строить устройства, лучше приспособленные к визуальной системе человека [1-13].

Автором были реализованы две версии программного обеспечения для ММ многоскоростных систем [1]. Особенности этих версий приведены ниже:

1. Портлируемая версия с большими техническими возможностями (медленная версия), написанная на С, перенесенная на сигнальный процессор (DSP). Она позволила оценить трудоемкость и понять проблемы, возникающие при реализации программной части. Модуль дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) использует разделимые и неразделимые 2D фильтры с разделимой четырехканальной децимацией. Используется периодическое продолжение входного изображения. Модуль ДВП и остальные модули написаны на ANSI C как кроссплатформенная библиотека, которая впоследствии была успешно портирована под сигнальные процессоры фирмы Texas Instruments.

2. Версия, основанная на применении Graphics Processing Unit (GPU) (графическом процессоре), очень быстрая. Она использует растущие возможности графических процессоров, их параллельную архитектуру. При этом освобождается центральный процессор для решения иных задач.

Ниже описана проблематика, связанная с программной и аппаратной реализацией многомерного вейвлет-преобразования, являющегося основной частью многоскоростных систем, с помощью сигнальных процессоров и GPU.

II. МНОГОМЕРНЫЕ МНОГОСКОРОСТНЫЕ СИСТЕМЫ

Эффективным способом преобразования ММ сигналов является применение ММ многоскоростных систем. С их помощью сигнал может быть представлен в виде, более удобном для решения многих прикладных задач, таких, как сжатие (с потерями или без потерь), удаление шумов, распознавание образов и др.

Многоскоростные системы состоят из цифровых фильтров и устройств изменения плотности отсчетов в пространственно-временной области, поэтому обработка сигнала в различных частях системы происхо-

дит с разной скоростью [17-19].

Применение таких систем позволяет строить различные схемы кратномасштабного анализа на основе вейвлетов. Использование вейвлет-преобразования позволяет одновременно снизить сложность и повысить эффективность кодеков. В этой области применение вейвлет-преобразования позволило достичь одновременно снижения сложности и повышения эффективности кодеков.

В настоящее время разработаны международные стандарты по сжатию неподвижных изображений и видео - JPEG-2000, H.264/AVC, WMP10 и MPEG-4. Ядром стандарта JPEG-2000 является одномерное вейвлет-преобразование [20-27].

Большинство проблем обработки сигналов являются в действительности многомерными, однако часто рассматриваются и решаются после замены всех переменных одной. До недавнего времени многомерные операторы, из которых состоят цифровые системы, были представлены в виде прямого (или тензорного) произведения одномерных функций координат, что не соответствовало природе обрабатываемого сигнала, являющегося неразделимым, то есть непредставимым в виде прямого произведения одномерных функций.

Многомерные многоскоростные неразделимые системы являются одной из самых многообещающих областей применения многомерных методов цифровых систем. Современные методы сжатия еще весьма далеки от тех границ, которые задаются внутренней структурой источников сигналов, таких, как видеосигналы, неподвижные изображения, акустические и световые поля. Поэтому создание методов неразделимого представления и обработки многомерных сигналов является очень актуальной задачей.

Многоскоростные системы обладают существенно большей универсальностью и потенциалом, чем традиционные системы, в которых обработка данных в разных частях системы ведется с одной и той же скоростью. Они позволяют реализовать технические решения, недоступные традиционным односкоростным системам. Например, в многоскоростных системах возможна реализация систем анализа/синтеза сигналов с точным восстановлением, в которых как анализ (декомпозиция), так и синтез (восстановление) сигналов может выполняться цифровыми фильтрами с конечным носителем или с конечной импульсной характеристикой – КИХ, что невозможно осуществить на основе односкоростных систем.

Многоскоростные системы, имеющие $m \geq 2$ каналов, позволяют, в отличие от одноканальных систем, строить как блок (или банк) анализа сигнала (для декомпозиции сигнала на составляющие), так и блок (банк) синтеза сигнала только из цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ).

При синтезе многомерных многоскоростных систем, обладающих свойством точного восстановления сигнала, возможность построения всей системы только на основе КИХ фильтров важна как с фундаментальной точки зрения (не нужно решать сложные задачи обеспечения устойчивости многомерных фильтров с бесконечной импульсной характеристикой – БИХ фильтров), так и с практической (применение КИХ фильтров позволяет ускорить обработку за счет использования конвейерной обработки данных).

Аппаратурная реализация многих методов обработки многомерных сигналов была неэффективной, т.к. требовала применения суперЭВМ с распараллеливанием операций.

Новый импульс в разработке теории цифровой обработки сигналов и необходимых цифровых устройств связан с радикальным изменением технологических возможностей новейших процессорных систем, в том числе с разработкой быстродействующих СБИС, ПЛИС и сигнальных процессоров.

Использование таких систем обеспечивает реализацию сложных алгоритмов обработки сигналов, что невозможно было сделать ранее. Теперь задача синтеза систем обработки многомерных сигналов ставится таким образом, чтобы в полной мере использовать новые технологические возможности.

Резко возросшая в течение последних лет потребность в алгоритмических, программных и аппаратных средствах обработки многомерных сигналов требует создания гибких технологий высокого уровня.

Проводимые в настоящее время работы призваны решить задачу создания теории и методов синтеза систем на основе «истинных» многомерных подходов.

Многоскоростные системы состоят из двух наборов (банков) фильтров - банка анализа и банка синтеза [1]. В зависимости от того, в каком порядке они соединены, можно получить различные устройства. Если на вход банка анализа подается сигнал, который раскладывается на подполосовые составляющие, и далее восстанавливается обратно в банке анализа, такая система называется банком фильтров (БФ) анализа/синтеза (устоявшегося названия нет, поэтому в статье это устройство будет называться просто "многоскоростной системой", см. рис. 1.а).

Если поменять порядок следования банка анализа и банка синтеза, в этом случае набор сигналов подается на вход банка синтеза, с выхода которого комбинированный сигнал подается на вход банка анализа, производящего его разложение на составляющие. Такая система называется банком фильтров синтеза/анализа или (в данном случае имеется устоявшееся название) трансмультиплексором (см. рис. 1.б).

Очень важно то, что обе системы описываются, по сути, одними и теми же типами уравнений. В банке анализа каждый получившийся в результате преобра-

зования ММ подполосовой сигнал (или канал) несет в себе информацию о спектральной составляющей исходного ММ сигнала при некотором пространственно-временном масштабе. Для обратного синтеза сигнала (его реконструкции) выполняется операция интерполяции подполосовых сигналов (каналов), их фильтрация и сложение. Большинство методов синтеза фильтров направлено на устранение наложения спектров, возникающего при децимации, и искажения сигналов.

Многоскоростная система (рис. 2) с максимальной децимацией состоит из банка анализа, банка синтеза, устройств квантования и кодирования/декодирования подполосовых сигналов. Если рассматривается один уровень декомпозиции, то в банке анализа ММ сигнал $X(\mathbf{z})$ раскладывается на m подполосовых сигналов (или каналов). В банке синтеза из переданных подполосовых сигналов вычисляется оценка сигнала $\hat{X}(\mathbf{z})$. В случае нескольких уровней декомпозиции, один или несколько подполосовых сигналов далее раскладываются на свои подполосовые составляющие.

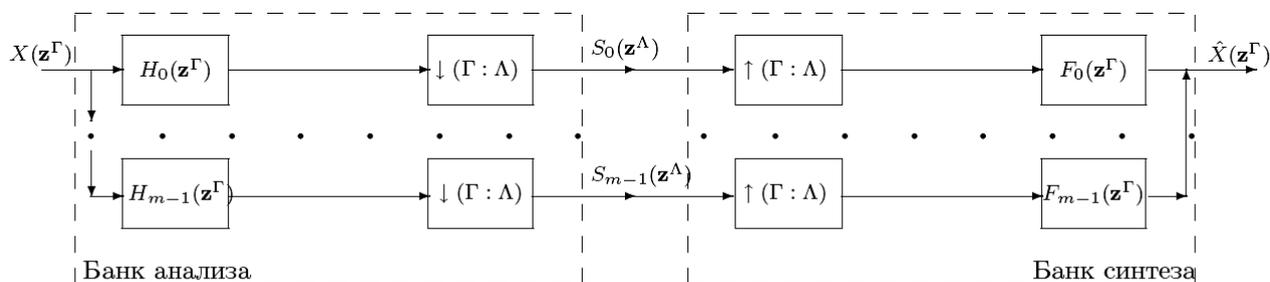
Банк анализа (синтеза) состоит из нескольких частей [1]: а) ММ фильтров $H_i(\mathbf{z})$ (соответственно $F_i(\mathbf{z})$), где $i = 0, \dots, m-1$; б) устройств понижения (соответственно повышения) частоты дискретизации в пространстве и/или во времени - дециматоров $\downarrow \mathbf{M}$ (соответственно интерполяторов $\uparrow \mathbf{M}$), где \mathbf{M} - $k \times k$ матрица децимации (матричный коэффициент растяжения, задающая переход от ММ решетки Γ , на кото-

рой задан ММ сигнал, к ее подрешетке Λ и обратно, см. рис. 1), k - число переменных. Для многоскоростных систем с максимальной децимацией $m = |\det \mathbf{M}|$.

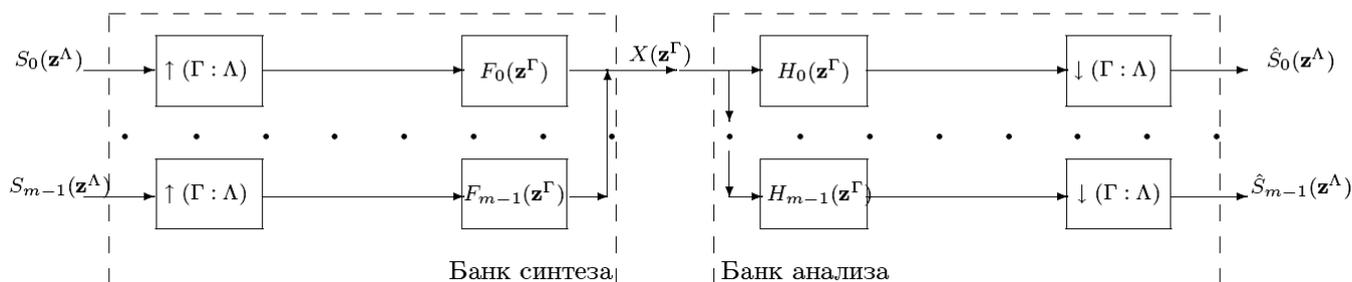
Если остановиться на развитии одномерных многоскоростных систем, то пионерской работой в СССР в этой области можно считать монографию Витязева В.В. "Цифровая частотная селекция сигналов" (1993) [28]. Она была посвящена разработке и применению численных методов для решения задачи (численного) синтеза одномерных многоскоростных систем, удовлетворяющих заданным требованиям. Почти одновременно с данной работой за рубежом появилась широко известная монография П.П. Вайдьянатана "Многоскоростные системы и банки фильтров" [17].

В последующих научных работах, а также в некоторых учебниках по цифровой обработке сигналов рассматривались только одномерные многоскоростные системы. Работ, посвященных синтезу многомерных неразделимых многоскоростных систем, до конца 20-го века не было.

Работы, позволившие приступить к синтезу многомерных многоскоростных систем в наиболее общем виде, т.е. неразделимых систем, были опубликованы в конце 20-го века - начале 21-го века. Среди них следует упомянуть работы М. Веттерли, Е. Ковачевич, П. Вайдьянатана и др. [17, 29-33, 37-38].



(а) Банк фильтров анализа/синтеза (“многоскоростная система”)



(б) Банк фильтров синтеза/анализа (трансмультимплексор)

Рис. 1. Многоскоростные системы

В России наряду с работами автора появились работы, написанные Брюхановым Ю.А. и Приоровым А.Л. и их учениками из ЯрГУ им. П.Г. Демидова [35-36]. Как отмечалось в 1999г. в первой статье, открывающей первый выпуск журнала "Цифровая обработка сигналов", развитие теории и методов многоскоростной обработки сигналов невозможно мыслить без развития истинных многомерных подходов, без применения новых вычислительных и иных технологий. Поставленная авторами статьи (Зубаревым Ю.Б., Витязевым В.В. и Дворковичем В.П. [34]) задача начала получать свое решение в работах автора.

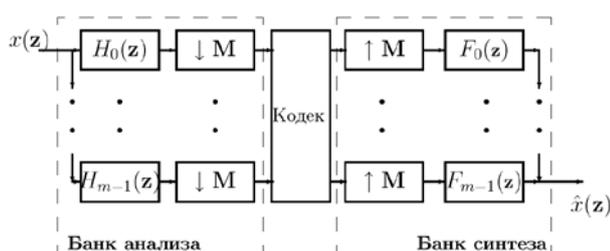


Рис. 2. Банк фильтров анализа/синтеза

В настоящее время предложены различные методы численного и/или аналитического синтеза всех составных частей неразделимых многоскоростных систем, включая синтез неразделимых матриц децимации, синтез биортогональных и ортогональных банков фильтров, удовлетворяющих свойствам точного восстановления сигнала, имеющих линейную фазу, с заданной гладкостью и т.д.

Методы аналитического синтеза банков фильтров, разработанные автором, основаны на результатах из компьютерной алгебры и теории многомерных полиномиальных матриц [1-13].

III. ПРЕИМУЩЕСТВА НЕРАЗДЕЛИМОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Известны многие области удачного и предпочтительного применения неразделимых банков фильтров. В томографии двумерные разделимые вейвлеты, которые строятся на основе разделимых БФ, задают прямоугольное деление частотной плоскости, что не всегда является подходящим при предположении о радиальных полосах частот в изображениях.

Применение неразделимого кратномасштабного анализа в томографии в двумерном случае позволяет учитывать геометрию системы путем ромбовидного деления частотной плоскости, что более подходит для случая радиальных полос частот сигнала. Местная томография, использующая неразделимые базисы,

показала существенное увеличение отношения пикового сигнала/шум (PSNR – Peak Signal/Noise Ratio).

Другим успешным применением неразделимых вейвлетов является их использование в 3-D вращательной ангиографии [15]. В некоторых случаях желательно использовать неразделимую децимацию, чтобы получить полезные 2-D вейвлет-представления. Например, неразделимые ортонормальные вейвлет базисы могут использоваться для распознавания текстур и фрактального анализа [14].

Выбор неразделимых фильтров для разложения имеет существенное влияние на результат характеристики текстуры. В [16] показано, что неразделимые вейвлеты инвариантны к вращению изображения текстуры. Именно поэтому классификация и результаты сегментации лучше при использовании неразделимых симметричных вейвлетов.

IV. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ GPU

A. Доступность и производительность GPU

Важнейшей частью ММ многоскоростных систем являются БФ. Именно в них реализуется переход из пространственной области в вейвлет-область. Поэтому вопросы практической реализации ММ вейвлет-преобразования, ее вычислительная сложность, быстроедействие, требования к ресурсам являются первостепенными.

Рассмотрим подробнее вопросы реализации ММ вейвлет-преобразования с помощью новейших графических процессоров.

Высокий коммерческий потенциал приложений, связанных с обработкой ММ сигналов, гарантирует им стабильный интерес со стороны общественности. Благодаря мировой многомиллиардной индустрии компьютерных игр, высокопроизводительные видеокарты, предназначенные для вывода реалистичной трехмерной компьютерной графики в реальном времени, получили большой толчок в развитии, в то время как цены на них, благодаря объемам рынка, снизились и стали доступны рядовому потребителю.

Современная видеокарта имеет программируемый графический конвейер, в котором можно запрограммировать как обработку поступающей на рендер (отрисовку) трехмерной геометрии (т.е. вершины и сборку примитивов), так и способ вычисления цвета каждого пикселя в буфере экрана.

Кроме того, различные производители видеокарт смогли договориться между собой и сделать свою продукцию взаимозаменяемой, и, самое главное, смогли договориться с разработчиками программ.

В настоящее время существует два стандарта (и, соответственно, два программных интерфейса) про-

граммирования графики. Это OpenGL (разрабатывается комитетом из крупнейших производителей аппаратного и программного обеспечения), и DirectX (направление развития которого целиком контролирует Microsoft Corp.).

В отличие от специального оборудования наподобие сигнальных процессоров, ПЛИС и др., видеокарты являются "ширпотребом", доступным пользователям по довольно невысокой цене.

Специализированные решения на DSP и ПЛИС не могут похвастаться такой дешевизной. Специфика рынка такова, что существует огромное количество заказчиков, которым требуется сравнительно небольшое количество отдельных специализированных устройств. При промышленном производстве, чем больше заказываемая партия, тем меньше себестоимость производства одного устройства.

Современная видеокарта - это сложное устройство, состоящее из нескольких функциональных модулей, даже если рассматривать только конвейер вывода трехмерной графики.

Трехмерная геометрия в виде вершин треугольников считывается из вершинного буфера в памяти видеокарты и к ней применяется проективное преобразование - преобразование координат из локальных, в которых задаются вершины трехмерной модели, в экранные с помощью умножения вектора на матрицу. Здесь же рассчитываются некоторые коэффициенты, необходимые для расчета освещения. Данная часть «устаревшего» графического конвейера с фиксированной функциональностью (т.е. fixed-function pipeline, FFP) может быть заменена вершинным шейдером.

Небольшая программа, в терминологии DirectX называемая вершинным шейдером (vertex shader), а в терминологии OpenGL - вершинной программой (vertex program), которая записывается непосредственно в GPU и исполняется видеокарткой, выполняет операции над поступающими в видеопроцессор вершинами треугольников, из которых состоит отображаемая модель.

Типичной операцией является умножение вектора положения вершины в пространстве на матрицу, которой задается проекция модели на плоскость экрана, т.е. смена базиса из модельных в проекционные координаты.

Вершинный шейдер работает не только с координатами вершин. Понятие вершины в трехмерной графике намного шире, оно может включать в себя такие величины, как координаты нормали, текстурные координаты, по которым на объект накладывается текстура, и др. Выход вершинного шейдера может состоять из различных данных, он не ограничивается входными. Структура выходных данных определяется пользователем.

Отображенный в экранные координаты треугольник проверяется на отсечение. После преобразования он может быть за пределами пирамиды взгляда или обращен в другую сторону.

Внутри треугольника накладываются текстуры и модулируются рассчитанным освещением, которое линейно интерполируется между вершинами. На выходе получается четыре значения цветовых компонентов (RGBA). Эту часть FFP-конвейера можно заменить пиксельным шейдером.

Небольшая программа, в терминологии DirectX называемая пиксельным шейдером (pixel shader), а в терминологии OpenGL - фрагментной программой (fragment program), выполняется для каждого пикселя (фрагмента) растеризуемого треугольника в экранном буфере и позволяет определить его цвет.

Структура входных данных в шейдер также задается пользователем. Данные, которые имеются на выходе вершинного шейдера для вершин, в пределах растеризуемого треугольника, интерполируются линейно. Проинтерполированные данные называются фрагментом и подаются на вход пиксельного шейдера, который определяет цвет пикселя для этого фрагмента.

Видеокарты изначально создавались для работы с трехмерной геометрией, поэтому в них имеется аппаратная (на уровне архитектуры процессора) поддержка арифметико-логических операций над четырехкомпонентными векторами чисел с плавающей точкой.

Кроме того, растеризация треугольников - это очень хорошо распараллеливаемая операция; шейдерные API накладывают довольно жесткие ограничения на ход вычислений. Так, запрещаются какие-либо побочные эффекты в шейдерах. Т.е. каждый шейдер можно представить в виде математической функции, выходы которой зависят только от входных данных и некоторого набора констант.

Большим плюсом является тот факт, что шейдеры можно генерировать, компилировать и использовать «на лету», т.е. прямо во время выполнения основной программы.

Шейдерный компилятор, в силу своей специфики, либо находится в драйверах на целевой системе (OpenGL), либо вообще является частью операционной системы (Direct3D), либо просто распространяется вместе с основной программой (для Cg). Таким образом, можно получить огромную гибкость и расширяемость системы, не платя за это производительностью, что неизбежно в других случаях (например, при добавлении интерпретатора скриптов для обеспечения расширяемости).

Самая идея применения видеопроцессора в качестве базы для параллельных вычислений не нова. В современной информатике образовалось новое направление - GPGPU (General-Purpose computations on GPUs - вычисления общего назначения на GPU). На

www.gpgpu.org имеются документы, отражающие, как обычные операции отображаются на функциональные возможности GPU.

Реализация одного уровня 2D ДВП на GPU выполняется в два прохода.

Сначала исходная картинка фильтруется двумя 1D фильтрами, децимируется по горизонтали и выводится в две промежуточные RT.

Затем, обе Render Target назначаются на вход другого шейдера и каждая фильтруется и децимируется по вертикали, с выводом в четыре RT. Эти четыре RT и содержат соответствующие субполосы первого уровня ДВП.

Низкочастотную субполосу можно еще раз пропустить через ту же систему и получить еще четыре субполосы, второго уровня, и т.д. Тем самым реализуется многоуровневое вейвлет-преобразование.

Б. Результаты тестирования

Испытательной платформой является Intel PentiumD 945 (Dual Core) 3.4 GHz; 2 GB RAM @ 667 Mhz; nVidia GeForce 7900 GT (производитель - XFX) 1 GB VRAM (550/1300 MHz); Windows XP SP2; DirectX 9.0c [6, 10-11]. Результаты приведены на рис. 3.

Тестовая программа написана с использованием Direct3D. Исходные изображения RGB (24 бит/пиксель) Промежуточные текстуры в формате A16B16G16R16F (64 бит/пиксель). Время расчета одного уровня ДВП включает также время загрузки/выгрузки текстуры по шине.

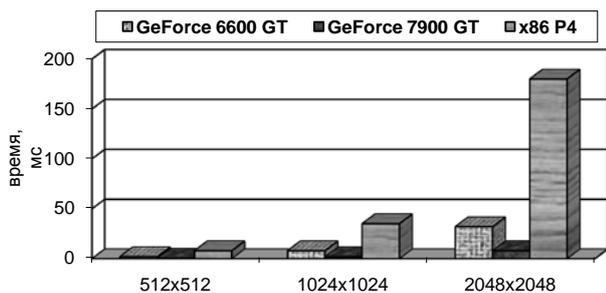


Рис. 3. Время выполнения ДВП для различных программных реализаций (по горизонтальной оси – размер изображения)

На рис. 4 показана зависимость времени исполнения ДВП от размеров исходного изображения. Из нее видно, что с увеличением размера картинки производительность системы возрастает и достигает своего максимального значения. Это обусловлено тем, что доля «накладных расходов» или overhead (в виде вре-

мени на пересылку данных и др.) резко уменьшается с ростом размера изображения.

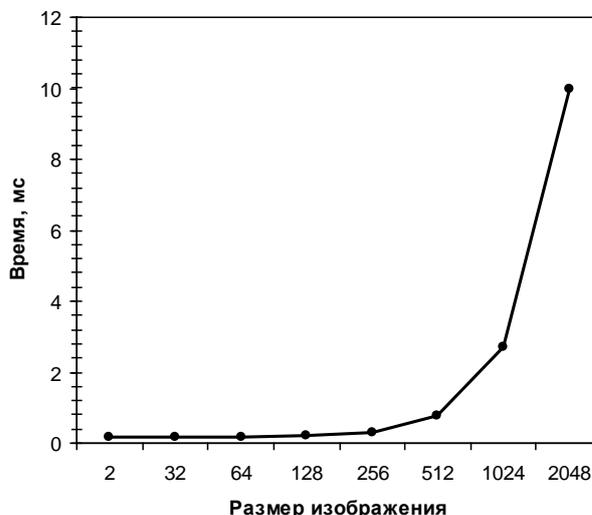


Рис. 4. Зависимость времени исполнения ДВП от размеров исходной картинки

V. МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА СИГНАЛЬНОМ ПРОЦЕССОРЕ

Современные сигнальные процессоры, предназначенные для обработки изображений и видео, обладают внутренней памятью порядка 64-х, 128-ми кбайт. Эта память расположена на микросхеме и обладает высоким быстродействием.

Внешние блоки памяти, подключаемые к процессору, обладают значительно большим объемом (ограниченным только адресным пространством процессора), но существенно меньшей скоростью работы.

Большинство приложений работающих в реальном времени не могут использовать только внешнюю память для хранения обрабатываемых данных из-за относительно низкой скорости доступа. Объем же данных превышает размер внутренней памяти. Например, в случае обработки одного кадра размером 640x480 требуемый объем памяти составляет 600 Кбайт.

Для повышения быстродействия в этом случае используются следующие методики: кэширования и создания буферов малого размера во внутренней памяти.

Кэширование – это механизм, заложенный в сигнальный процессор и реализуемый автоматически, он требует лишь настройки на этапе загрузки. Далее процессор отслеживает обращения во внутреннюю память. Анализирует частоту обращений к определенным ячейкам и создает во внутренней памяти копии

тех ячеек, обращения к которым происходят наиболее часто.

Также существует механизм опережения, который предсказывает адрес ячейки, к которой будет произведено обращение, и копирует ее во внутреннюю память. Кэширование позволяет существенно повысить быстродействие в случае, если программист учитывает особенности работы кэша. Одним из условий является обращение в память по последовательным адресам и минимизация переходов.

При использовании буферов во внутренней памяти кадр, хранимый во внешней памяти, разбивается на блоки меньшего размера.

Блоки последовательно переписываются во внутреннюю память, обрабатываются, результат записывается во внешнюю память. Операции повторяются для каждого блока. Например, алгоритм JPG использует в своей работе блоки размером 8x8.

Свертка с разделимыми фильтрами, широко применяемыми при выполнении вейвлет-декомпозиции, происходит последовательно по строкам, затем по столбцам кадра.

В первом случае обращения к памяти за коэффициентами происходят последовательно, что позволяет в полной мере использовать возможности кэш-памяти, а также при необходимости организовывать буфер во внутренней памяти процессора, что значительно ускоряет вычисление свертки.

Для случая столбцов обращения к памяти происходят не последовательно, а с шагом равным размеру строки исходного изображения, что не желательно для кэш-памяти, а также требует дополнительных вычислений смещения адреса коэффициента.

В случае организации стандартного строкового буфера во внутренней памяти, возникают сложности при расширении сигнала по столбцам, которое необходимо для выполнения вейвлет-декомпозиции. Это связано с тем, что в строковом буфере сигнал в столбце представлен не полностью.

Коллективом под руководством автора предложена методика выполнения вейвлет-преобразования с применением DMA контроллера, используемого для организации транспонирования группы столбцов исходного изображения из внешней памяти во внутренний строковый буфер.

Операция транспонирования позволяет перейти от свертки столбца к свертке строки, что существенно увеличивает быстродействие.

С точки зрения повышения качества, появляется возможность простой реализации периодического расширения сигнала по столбцам при использовании внутреннего буфера, объем которого меньше исходного изображения.

С применением данной методики разработчик может использовать одну функцию свертки, тогда как

обычно необходимо использовать две различные функции для обработки строк и столбцов.

Реализация удовлетворяет следующим требованиям:

- целочисленные вычисления;
- использование 16-разрядных чисел (32-разрядных в промежуточных вычислениях);
- работа с фиксированными блоками выделенной памяти (отсутствие динамического выделения);
- язык реализации – C (ANSI C, 1992) с ассемблерной реализацией критической секции программы.

В коде программы не используются специфические особенности конкретных сигнальных процессоров. Поэтому кодек может использоваться для любых представителей шеститысячной серии фирмы Texas Instruments.

Вычислительные ресурсы (циклы процессора) на организацию работы с внутренним буфером по разработанной методике для TMS320C6211 приведены ниже в таблице для максимально возможного числа уровней декомпозиции.

Таблица 1

Вычислительные ресурсы

Размер изображения	Число циклов	Время, с
640x480	13622170	0,09
352x288	3659071	0,025
176x144	740909	0,005

Полученные алгоритмы для сигнальных процессоров обладают повышенным быстродействием по сравнению с существующими аналогами и могут быть реализованы в системах обработки и передачи видеоданных по радиоканалам с низкой пропускной способностью.

Разработанный алгоритм существенно уменьшил число операций сравнения вейвлет-коэффициентов при их сортировке и высвободил значительную часть машинного времени на обработку данных.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное решение современных задач обработки многомерных сигналов возможно только при применении новых комплексных подходов. В статье описаны основные направления исследований и полученные новаторские результаты в области синтеза неразделимых многомерных многоскоростных систем и их реализации.

Рассмотрены особенности и результаты программной и аппаратной реализации многомерных многоскоростных систем, в первую очередь многомерного вейвлет-преобразования, с помощью графических процессоров и сигнальных процессоров.

Естественным обобщением и развитием рассмотренных подходов является разработка и исследование

систем ММ многоскоростной обработки сигналов, реализованных в виде SOC (СБИС на кристалле). Требования к реализации и ресурсоемкость будут зависеть от конкретного приложения, в котором будет применяться ММ многоскоростная система.

Такое направление будущих исследований видится как наиболее перспективное с точки зрения построения эффективных систем для сжатия, архивирования и т.д. ММ сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чобану М.К. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. - М.: Техносфера, 2009. - 480 с.
- [2] Чобану М. К. Многомерные многоскоростные системы и многомерные вейвлет функции. Ч. I-II. // Вестник МЭИ. - 2003. - № 2-3.
- [3] Чобану М. К. Синтез многомерных банков фильтров с помощью методов компьютерной алгебры // Изв. вузов. Электроника. - 2007. - №2.
- [4] Максименко И. Е., Чобану М. К. Синтез двухканальных многомерных вейвлетов и их применение для сжатия изображений // Вестник МЭИ. - 2006. - №2.
- [5] Чобану М. К. Синтез оптимизированных многомерных банков фильтров // Научный Вестник МГТУ ГА. Сер. Радиофизика и радиотехника. - 2007. - № 117.
- [6] Чобану М. К. Есть ли предпосылки прорыва в области цифровой обработки многомерных сигналов? // Электроника: НТБ. - 2007. - №3.
- [7] Чобану М. К. Системы многоскоростной обработки многомерных сигналов. Ч. I-II // Проблемы управления. - 2007. - №2-3.
- [8] Чобану М. К. Цифровые многоскоростные системы обработки сигналов. Учеб. пособие. Изд-во МЭИ. - 2009. - 120 с.
- [9] Чобану М. К. Аналитический синтез многомерных многоскоростных систем // Успехи современной радиоэлектроники. - 2007. - №4.
- [10] Чобану М.К., Волков М.В. Новые технологии сжатия многомерных сигналов // Современная электроника. 2008, №3, с. 40-43.
- [11] Tchobanou M., Volkov M. Analytical design methods for multirate systems for processing of multidimensional signals // Proc. Signal Processing Symposium (SIP-2006). Kyoto (Japan), 2006.
- [12] Tchobanou M. Synthesis of basic elements of multidimensional multirate systems Part. 1. Nonseparable decimation matrices // Numerical Analysis and Applications. 2008. v.1. No.1. P.79-94.
- [13] Tchobanou M. Design of basic elements of multidimensional multirate systems. Multidimensional filters with fractional shift // Numerical Analysis and Applications. 2008. V.1. No.2. P.179-195
- [14] Meyer Y. Ondelettes et fonctions splines. Sem. Equations aux Derivees Parielles edition. 1986.
- [15] Nonseparable wavelet-based cone-beam reconstruction in 3-D rotational angiography / S. Bonnet, F. Peyrin, F. Turjman, R. Prost // IEEE Trans. Medical Imaging. 2003. Mar. V. 22. No. 3. Pp. 360-367.
- [16] Wang J.-W., Chen C.-H., Pan J.-S. Genetic feature selection for texture classification using 2-D non-separable wavelet bases // IEICE Trans. Fundament. 1998. Aug. V. E81-A. No. 8. Pp. 1635-1644.
- [17] Vaidyanathan P. P. Multirate Systems and Filter Banks. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [18] Woods J. W. Subband Image Coding. 3300 AH Dortrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [19] Tekalp A. Digital video processing. Prentice Hall, 1995.
- [20] Wavelet-based lossless compression scheme with progressive transmission capability / A. Munteanu, J. Cornelis, G. Van der Auwera, P. Cristea // International Journal of Imaging Systems and Technology, Special Issue on Image and Video Coding. 1999. Jan. V. 10. No. 1. Pp. 76-85.
- [21] Taubman D. Embedded block coding in JPEG 2000 // Signal Processing Image Communication. 2002. V.17. Pp. 49-72.
- [22] Taubman D. Embedded block coding with optimized truncation, Tech. Rep. N1020R / ISO/IEC/JTC1/SC29/WGI. 1998. Oct. V. 17.
- [23] Lewis A., Knowles G. Image compression using the 2-d wavelet transform // IEEE Trans. Image Proc. 1992. V. 2. Pp. 244-250.
- [24] Shapiro J. M. Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients // IEEE Trans. Signal Proc. 1993. Dec. V. 41. Pp. 3445-3462.
- [25] Shapiro J. M. Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients // IEEE Trans. Signal Proc. 1993. Dec. V. 41. Pp. 3445-3462.
- [26] Wheeler F. W., Pearlman W. A. Spiht image compression without lists // Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Proc. 2000. V. 4. Pp. 2047-2050.
- [27] Strobach P. Quadtree-structured recursive plane decomposition coding of images // IEEE Trans. Signal Proc. 1991. V. 39. Pp. 1380-1397.
- [28] Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993. 240 с.
- [29] Vetterli M. Wavelets and filter banks: Theory and design. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Proc. 1992. V. 40. No.9. Pp. 349-364.
- [30] Kovačević J., Sveldens W. Wavelet families of increasing order in arbitrary dimensions // IEEE Trans. Image Proc. 2000. V. 9. No. 3. Pp. 480-496.
- [31] Kovačević J., Vetterli M. Nonseparable multidimensional perfect reconstruction filter banks and wavelets for R^n // IEEE Trans. Inform. Theory. 1992. V. 38. No. 2. Pp. 533-555.
- [32] Kovačević J., Vetterli M. FCO sampling of digital video using perfect reconstruction filter banks. IEEE Transactions on Image Processing. V. 2. No. 1. 1993. Pp. 118-122.
- [33] Kovačević J., Vetterli M. Nonseparable two-dimensional and three-dimensional wavelets. IEEE Trans. Signal Process. 1995. V. 43. No. 9. Pp. 1269-1273.
- [34] Зубарев Ю.Б., Витязев В.В., Дворкович В.П. Цифровая обработка сигналов - информатика реального времени, <http://www.dsps.ru/elmaterials/artic99-13.pdf>
- [35] Приоров А., Ганин А., Хрящев В. Цифровая обработка изображений : Учеб. пособие. Мин-во образования Рос. Федерации, Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. - Ярославль : ЯрГУ, 2001. - 216 с.
- [36] Приоров А. Двумерные цифровые сигналы и системы: Учеб. пособие / Яросл. гос. университет. – Ярославль, 2000. 200с.
- [37] Vetterli M., Kovačević J. Wavelets and Subband Coding, Prentice Hall, Signal Processing Series, Englewood Cliffs. NJ. 1995.
- [38] Kovačević J., Chebira A. An Introduction to Frames, Foundations and Trends in Signal Processing. Now Publishers. 2008.