

Новые технологии сжатия многомерных сигналов

Михаил Чобану, Михаил Волков (г. Москва)

Предложены новые технологии разработки алгоритмических и программных средств в системах сжатия многомерных сигналов. Данные технологии основаны на применении многомерных многоскоростных систем, оптимизированных методов частичной сортировки вейвлет-коэффициентов и предназначены для современных, высокопроизводительных видеоплат.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий постоянно возрастает потребность в передаче видеосигналов по каналам связи. Современные приложения включают передачу программ цифрового телевидения высокой чёткости (ТВЧ, HDTV), основанного на технологиях MPEG-2 и MPEG-4. За рубежом ведутся активные исследования в области создания настоящего трёхмерного телевидения (3D-TV), важной частью которого являются методы и средства представления и сжатия неразделимых (не представимых в виде произведения одномерных) многомерных сигналов. Эффективным методом сжатия, применяемым в указанных приложениях, является подполосное кодирование.

К задачам цифровой обработки многомерных сигналов относятся также идентификация и фильтрация радио- и гидролокационных сигналов, геофизических, акустических и световых полей, передача данных в локальных и глобальных компьютерных сетях, обработка неподвижных изображений и видеосигналов в медицине (рентгеновская и ультразвуковая томография), метеорологии, космонавтике, ядерной физике и т.д.

Интерес к решению задач анализа, синтеза, обработки, кодирования, сжатия многомерных (ММ или M-D –

multi-dimensional) сигналов для их передачи, хранения, архивирования, защиты от несанкционированного доступа, восстановления в системах связи при наличии ограничений (на скорость передачи, на полосу пропускания, на динамический диапазон и т.д.) объясняется ростом таких сфер приложения, как мультимедиа-технологии и телекоммуникации, осуществляющих обработку (включая сжатие) неподвижных изображений (2D-сигналы), видеосигналов (3D-сигналы) и меняющихся во времени томографических снимков (4D-сигналы).

Фундаментальной проблемой при создании цифровых систем является сокращение избыточности информации. Разработка эффективных способов и методов сжатия одномерных и ММ-сигналов является предпосылкой эффективного использования каналов связи, что обеспечивает сохранение действующих частотных планов, высвобождение большей части частотного пространства для предоставления таких видов услуг, как ТВЧ, 3D-TV, видеоконференции, многопрограммное заказное ТВ и звуковое вещание.

Новый импульс в теории цифровой обработки сигналов и необходимых цифровых устройств обусловлен радикальным изменением технологических возможностей новейших быстродействующих СБИС, ПЛИС, сигнальных и графических процессоров. Использование таких систем обеспечивает реализацию сложных и математически ёмких алгоритмов обработки сигналов в реальном масштабе времени. Поэтому задача синтеза систем обработки многомер-

ных сигналов ставится таким образом, чтобы в полной мере использовать новые технологические возможности.

МНОГОМЕРНЫЕ МНОГОСКОРОСТНЫЕ СИСТЕМЫ

Одной из наиболее перспективных областей применения многомерных методов цифровой обработки сигналов являются многомерные многоскоростные системы, в которых обработка сигнала в различных частях системы происходит с различной скоростью [2, 3,14]. Многоскоростные системы являются важной составной частью систем преобразования многомерных сигналов с целью их передачи по проводным или беспроводным сетям.

Многоскоростная система (см. рис. 1) 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 [3]:

- ММ фильтров $H_i(\mathbf{z})$ (соответственно $F_i(\mathbf{z})$), где $i = 0, \dots, m - 1$;
- устройств понижения (соответственно, повышения) частоты дискретизации в пространстве и/или во времени – дециматоров $\downarrow \mathbf{D}$ (соответственно интерполяторов $\uparrow \mathbf{D}$), где $\mathbf{D} - k \times k$ матрица децимации (матричный коэффициент растяжения), $k -$ число переменных. Для многоскоростных систем с максимальной децимацией $m = |\det \mathbf{D}|$.

Предложены методы аналитического синтеза всех составных частей

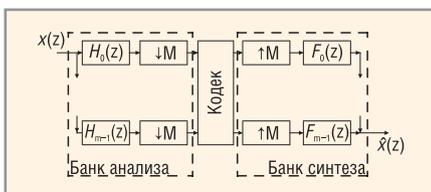


Рис. 1. Многомерная многоскоростная система

неразделимых многоскоростных систем, включая синтез неразделимых матриц децимации [13], синтез биортогональных и ортогональных банков фильтров [2, 5, 7, 12], удовлетворяющих свойствам точного восстановления сигнала, имеющих линейную фазу, с заданной гладкостью и т.д. Методы аналитического синтеза банков фильтров основаны на математических результатах из компьютерной алгебры и теории многомерных полиномиальных матриц.

Методы частичной сортировки вейвлет-коэффициентов

В работах [1, 4, 9, 10] рассмотрены вопросы разработки и реализации методов представления цветных изображений и методов сжатия изображений с помощью разделимого и неразделимого многомерного вейвлет-преобразования. В работах [1, 8] обоснован выбор оптимальных цветовых моделей для представления цветного изображения с целью его кодирования при помощи иерархического алгоритма.

Авторами было проведено тестирование с целью выбора оптимального «статического» формата для распределения бюджета бит между различными цветовыми каналами. Тестирование включало объективные испытания на основе пикового отношения сигнал/шум (PSNR) и субъективные тесты, проведённые в соответствии со стандартом ITU-R BT.500-11. Применение полученных оптимальных «статических» форматов для моделей YIQ и YUV при иерархическом кодировании изображений даёт выигрыш в PSNR до 2...2,5 дБ по сравнению с известными цветовыми моделями.

Во многих случаях целью сжатия изображений является компактное хранение данных и их последующая передача по каналам связи с максимальной скоростью. При этом в системах, где пропускная способность канала ограничена, а скорость передачи крайне важна, полезным оказывается свойство масштабируемости качества для рассматриваемого семейства алгоритмов. На рисунке 2 показаны основные программные части системы сжатия видеосигналов. Ниже рассмотрены вопросы реализации методов сжатия ММ-сигналов с помощью многомерного вейвлет-преобразования, при этом кодирую-

щая часть будет основана на переработанных и оптимизированных вариантах метода частичной сортировки вейвлет-коэффициентов.

В последнее время самые эффективные из кодеров используют вейвлет-декомпозицию сигнала. На данный момент стандартизован кодер JPEG2000, работающий с вейвлет-преобразованием. Существует также большое количество не стандартизованных, но зачастую не менее эффективных алгоритмов. Одним из них является SPIHT, на базе которого развиваются новые алгоритмы; в оценках эффективности любого нового вейвлет-кодера обязательно можно найти сравнительные тесты с алгоритмом SPIHT.

В настоящее время принято делить кодеры, работающие с вейвлет-декомпозицией, на два класса: межполосные (interband) и внутриполосные (intraband). Алгоритм SPIHT относится к классу межполосных кодеров, т.е. в своей работе он использует избыточность, связанную с корреляцией между уровнями вейвлет-декомпозиции.

Семейство алгоритмов, построенных на сортировке вейвлет-коэффициентов по степени их вклада в качество результирующего изображения и последующей их постепенной передаче, во многом основано на работе [11]. В целом алгоритм заключается в вейвлет-декомпозиции исходного изображения в древовидную структуру, состоящую из многомерных частотных подполос, с помощью многомерных многоскоростных систем. Затем матрица, представляющая данную структуру, сжимается при помощи иерархического алгоритма, основанного на принципе частичной сортировки вейвлет-коэффициентов по степени их вклада в качество восстановленного изображения. Наиболее важные коэффициенты передаются первыми, менее важные – во вторую очередь либо не передаются вообще. Качеством результата можно легко управлять, варьируя количество передаваемых бит. В работе [9] предложена оптимизация алгоритма кодирования – введена матрица значимости; многие алгебраические операции заменены логическими; алгоритм реализован на языке Си без использования библиотечных функций.

Впервые разработан алгоритм иерархического кодирования для вей-

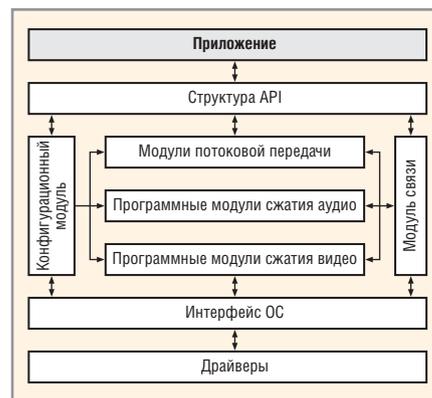


Рис. 2. Основные программные части

лет-разложений, полученных с применением неразделимых фильтров. Уровни вейвлет-декомпозиции для таких фильтров обычно имеют ромбическую форму. Это свойство затрудняет практическое применение данного класса фильтров: такие структуры сложнее хранить в памяти, так как отсутствует подобие между различными полосами на различных уровнях декомпозиции.

Впервые разработан метод предыскажения импульсных характеристик неразделимых банков фильтров, позволяющий корректно осуществлять фильтрацию и децимацию/интерполяцию сигналов. Получено подобие полос вейвлет-коэффициентов для различных уровней декомпозиции. Впервые реализована трёхканальная неразделимая многомерная многоскоростная система [6, 7].

Второй метод кодирования изображений относится к категории методов блочного кодирования. В отличие от известных алгоритмов, в разработанном алгоритме используется декомпозиция с помощью квадродеревьев в пространстве вейвлет-образа. Для определения значимости вейвлет-коэффициентов по отношению к множеству монотонно убывающих пороговых значений используется последовательное приближение с помощью шагов квантования. Фактически кодирование координат значимых коэффициентов в матрице значимости заключается в кодировании дерева матриц.

Данный алгоритм кодирования коэффициентов способен быстро изолировать важные ненулевые детали изображения, исключая большие незначимые области. В некоторых случаях алгоритм немного проигрывает по степени сжатия JPEG-2000. Однако важным преимуществом яв-

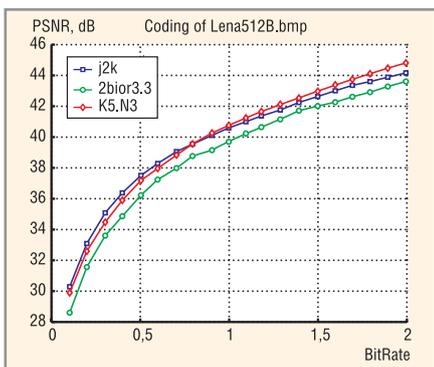


Рис. 3. Сравнение качества кодирования изображения Lena.bmp кодером JPEG2000 и оптимизированным иерархическим алгоритмом

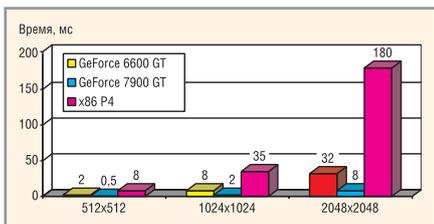


Рис. 4. Время выполнения дискретного вейвлет-преобразования для различных программных реализаций

ляется скорость его работы (примерно в 2,5 раза быстрее JPEG-2000), хорошая совместимость с архитектурой современных процессоров за счёт минимизации случайного доступа к областям памяти. В системах с кэш-памятью алгоритм даёт значительный выигрыш в производительности.

Работа кодеров существенно зависит от используемых БФ. Синтезированные в работе неразделимые фильтры в основном дают лучшие результаты сжатия, чем разделимые. В зависимости от скорости цифрового потока, результаты кодирования изображений с помощью разработанного алгоритма (используя разделимые фильтры и аналитически синтезированный ортогональный фильтр) на 1...1,5 дБ превосходят результаты применения JPEG-2000 (см. рис. 3).

Реализация системы сжатия многомерных сигналов

Разработаны программы i_comp и srtv, написанные под MS Windows, которые позволяют проводить сжатие и восстановление изображений с помощью метода иерархического кодирования. Всего было разработано три поколения программного обеспечения:

- портируемая версия с большими техническими возможностями (медленная версия), написанная на Си, перенесённая на сигнальный процессор;
- x86-оптимизированная версия под Pentium-4 (быстрая версия), написанная на С++ с применением шаблонов и возможностей оптимизирующего компилятора Intel C++. Разработана с учётом архитектуры Intel P-IV NetBurst;
- очень быстрая версия, основанная на GPU (графическом процессоре). Использует быстро растущие возможности графических процессоров и параллельную архитектуру, при этом центральный процессор освобождается для решения других задач. Для реализации версии требуется видеоплата, поддерживающая SM3.0.

Реализация на GPU

Благодаря многомиллиардной индустрии компьютерных игр, высокопроизводительные видеоплаты, предназначенные для вывода реалистичной трёхмерной компьютерной графики в реальном масштабе времени, совершенствуются очень быстро. В то же время цены на них, благодаря большому объёму рынка, постоянно снижаются, и платы становятся доступными рядовому потребителю. Современная видеоплата имеет программируемый графический конвейер, в котором можно реализовать как обработку поступающей на отрисовку (рендеринг) трёхмерной геометрии вершин (а в ближайшем будущем и сборку примитивов), так и способ вычисления цвета каждого пикселя в буфере экрана.

В настоящее время существует два стандарта программирования графики: OpenGL (разрабатывается комитетом из крупнейших производителей программного и аппаратного обеспечения) и DirectX (контролируется корпорацией Microsoft). Небольшая программа, в терминологии DirectX называемая вершинным шейдером (vertex shader), а в терминологии OpenGL – вершинной программой (vertex program), загружается непосредственно в GPU и выполняет операции над поступающими в видеопроцессор вершинами треугольников, из которых состоит отображаемая модель.

Видеоплаты изначально создавались для работы с трёхмерной геометрией, поэтому в них имеется аппаратная (на уровне архитектуры процессо-

ра) поддержка арифметико-логических операций над четырёхкомпонентными векторами чисел с плавающей точкой. Кроме того, растеризация треугольников – это распараллеливаемая операция. Одна из самых мощных современных игровых видеоплат (Nvidia GeForce 7950 GX2) имеет 16 вершинных и 48 пиксельных конвейеров и способна обрабатывать 48 пикселей одновременно.

По своим возможностям видеоплаты намного опережают обычные процессоры общего назначения в терминах гигафлопов. Кроме того, для них не соблюдается закон Мура, т.е. видеопроцессоры становятся быстрее, чем обычные процессоры.

Время расчёта одного уровня ДВП

GPU-реализация в настоящее время упирается именно в производительность шейдера, т.к. на видеоплате находится GF6600GT 12 пиксельных конвейеров, а 7950 GX2 – это двухъядерная видеоплата с 48 пиксельными конвейерами. На рисунке 4 отобрано время выполнения вейвлет-разложения изображений размером 512 × 512, 1024 × 1024 и 2048 × 2048 пикселей на процессоре P-IV 2,4 ГГц (ОЗУ 768 МБ, DDR 433 МГц). Версия с GPU использует видеоплату GeForce 6600GT (350/800 МГц, 128 МБ ОЗУ), а также GeForce 7950 GX2, с теми же параметрами.

Заключение

На основе новых подходов разработана система сжатия многомерных сигналов. Она включает методы аналитического синтеза неразделимых банков фильтров, оптимизированные методы кодирования с помощью частичной сортировки вейвлет-коэффициентов и программную реализацию с помощью современных высокопроизводительных видеоплат.

Работа выполнена при содействии гранта РФФИ и японского общества JSPS №06-07-91751-ЯФ_а.

Литература

1. Сержантов А.В., Чобану М.К. Выбор цветовой модели для представления цветного изображения перед его сжатием. Труды Международного конгресса Академии информатизации ITS-2004, МЭИ (ТУ). 2004. Т. 3. С. 12–14.
2. Чобану М.К. Многомерные многоскоростные системы и многомерные вейвлет

функции. Часть 2: Синтез. Вестник МЭИ. 2003. № 3. С. 69–78.

3. Чобану М.К. Многомерные многоскоростные системы и многомерные вейвлет функции. Часть 1: Теория. Вестник МЭИ. 2003. № 2. С. 75–82.

4. Чобану М.К., Авдеев О.В. Сжатие изображений с помощью частичной сортировки вейвлет-коэффициентов. Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 15–20.

5. Чобану М.К., Батлук А.В. Исследование применения банков фильтров для сжатия изображений. Цифровая обработка сигналов. 2005. № 4. С. 29–40.

6. Чобану М.К., Караказьян С.А. Трёхканальные многоскоростные системы. Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика, информатика, процессы управления. 2007. № 1.

7. Чобану М.К., Максименко И.Е. Синтез двухканальных многомерных вейвлетов и их применение для сжатия изображений. Вестник МЭИ. 2006. № 2. С. 88–96.

8. Чобану М.К., Сержантов А.В., Зандер К. Выбор оптимальной цветовой модели для представления цветного изображения с целью его кодирования иерархическим алгоритмом. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 1.

9. Чобану М.К., Черников А.В. Современный метод сжатия изображений на базе вейвлет-преобразования и иерархического алгоритма кодирования. Цифровая обработка сигналов. 2005. № 3. С. 40–59.

10. Tchobanou M., Mironov V., Klyushkin V. et al. Design and implementation of 2-D and 3-D multirate systems. Proc. 2nd Intern. Workshop on Spectral Methods and

Multirate Signal Processing, SMSP-2002. Toulouse, France. 2002. PP. 83–86.

11. Shapiro J.M. Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients. IEEE Trans. Signal Proc. 1993, Dec. Vol. 41. PP. 3445–3462.

12. Tchobanou M. Design of multi-dimensional wavelets and multi-dimensional multirate systems. Труды Межд. конф. Wavelets and Splines, 2003, июль 3–8. Санкт Петербург, 2005. С. 118–133.

13. Tchobanou M. Parameterization of multidimensional decimation matrices. Proc. The 2005 Intern. Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, SMSP, 2005. Riga, Latvia, 2005. PP. 7–10.

14. Vaidyanathan P.P. Multirate Systems and Filter Banks. Englewood Cliffs. Prentice Hall, 1993.



Новости мира News of the World Новости мира

«Нанокөвөр» – самый тёмный объект на Земле

Самым тёмным из существующих на Земле объектов является отнюдь не сверхплотное тело, а «ковёр» из свободно расположенных нанотрубочек, – утверждают исследователи из Университета Райса (Rice University) и Политехнического института Ренсселера (Rensselaer Polytechnic Institute). На днях они отпортовали о создании нового наноматериала, обладающего рекордным светопоглощением.



Рекордсмен построен из полых ячеистых углеродных нанотрубочек, расположенных вертикально, как нити шерстяного ковра. Падающий на материал свет эффективно поглощается подобной неоднородной структурой, и «ковёр» выглядит практически абсолютно чёрным. Для уменьшения отражательной способности сами нанотрубочки собраны по специальной схеме, предусматривающей случайное расположение атомов углерода.

В результате усилий исследователей появился материал с самой высокой способностью к поглощению света. «Нанокөвөр» отражает всего 0,045% падающего света, или, другими словами, поглощает 99,955% энергии. Предыдущий рекорд светопоглощения, установленный никель-фосфорным сплавом с микропорами, превзойдён в четыре раза. На приведённом фото, слева располагается бывший рекордсмен, а в центре – «нанокөвөр».

Ожидается, что новый материал найдёт своё применение в качестве покрытия для ячеек солнечных батарей.

news.com

«Темнопольный» рентген заступит на антитеррористическую службу

Набор простых кремниевых фильтров может решительно улучшить качество рентгеновского оборудования, применяемого в лечебных учреждениях и в аэропортах, – утверждает коллектив учёных из швейцарского Института Пола Шерера во главе с Францем Пфайфером (Franz Pfeiffer). Получаемые с помощью новой техники снимки показывают значительно более детализированные изображения костных переломов, кроме того, с их помощью служба безопасности аэропортов сможет отличить пластиковую взрывчатку от других, совершенно безвредных веществ.

Традиционное применение рентгеновского излучения базируется на различной способности материалов к его поглощению. Сильно поглощающими материалами являются человеческие кости и металлы, поэтому они выглядят на получаемых снимках белыми. Слабо поглощающие материалы, например, мягкие ткани и пластмассы, выглядят тёмными. Однако, как это часто бывает, способность к поглощению рентгеновского излучения большинства веществ и материалов средняя, что неизбежно сказывается на качестве изображения. Например, сломанная кость, окружённая мягкими тканями, выглядит на снимке значительно более размытой, чем если бы она была окружена воздухом.



Учёные предложили использовать для решения проблемы технику, именуемую «тёмнопольной микроскопией» («микроскопия тёмного поля»), уже давно применяемую в микробиологических исследованиях, в которой для увеличения качества изображения в расчёт принимается только рассеянный свет. Пфайфер и коллеги показали, что данная методика применима и к рентгеновскому излучению. С помощью разработанного учёными набора кремниевых фильтров регистрируются только те лучи, которые проходят через чувствительный элемент под углом, лучи же, проходящие прямо, игнорируются. Исследование проводится в четыре этапа, каждое с тремя наборами фильтров. Полученные данные затем анализируются специально разработанной программой, и в конечном итоге формируется изображение.

Согласно утверждению исследователей, полученные снимки отличаются значительно большей контрастностью, поскольку вещества, по разному поглощающие прямые рентгеновские лучи, ещё в большей степени различаются по способности к его рассеиванию. Например, врачи смогут увидеть даже маленькие кусочки кости, застрявшие в мягких тканях после тяжелых переломов, а служба безопасности аэропортов сможет различать вещества, ранее выглядевшие совершенно одинаково, например, сыр и пластиковую взрывчатку, как это продемонстрировано на снимке справа.

technology.newscientist.com