

Методы кодирования изображений в системах промышленной автоматизации и робототехники

М.Н. Андрианов, А.В. Бумагин, А.В. Гондарь, К.С. Калашников,
А.А. Прудников, Г.А. Пучков, В.Б. Стешенко (ООО "НПП Цифровые решения")

Современные системы автоматизации зачастую работают не только с данными измерений, но и с большим объемом видеоданных. Это и системы мониторинга опасных производств, и системы видеотелеметрии, технического зрения роботов и анализа изображений. В связи с этим особенно актуальной является задача высокоскоростной эффективной компрессии видеоданных. В настоящее время сформировался ряд методов, применяемых в большинстве современных систем кодирования видеоинформации, а также неподвижных изображений и обеспечивающих различные показатели сжатия данных. Все эти методы предполагают компромисс между скоростью обработки, степенью сжатия и качеством восстановленного изображения. В статье произведен анализ основных этапов компрессии изображений с точки зрения их ускорения путем аппаратного распараллеливания вычислений и намечены пути их реализации с использованием современной элементной базы.

Ключевые слова: сжатие данных, кодирование, видео, изображения, параллельные вычисления.

В работе [1] был рассмотрен опыт построения каналов связи для управления мобильными роботами. Необходимость точной идентификации объектов в этих и других системах обработки изображений обуславливает высокие требования к качеству изображения, а ограниченная пропускная способность канала связи — высокие требования к степени сжатия. При этом обработка должна производиться в режиме реального времени, что накладывает ограничения на вычислительную сложность используемых алгоритмов. Одним из путей, позволяющих повысить скорость компрессии при сохранении показателей качества изображения и степени сжатия и обработки в режиме реального времени, является аппаратное распараллеливание вычислений.

Основные этапы компрессии изображений

В настоящее время известно множество стандартов компрессии видеоданных (семейство стандартов MPEG, ITU-T H.261, H.263, H.264) и неподвижных изображений (JPEG, JPEG2000). Алгоритмы компрессии изображений согласно этим стандартам включают следующие основные этапы:

- устранение временной избыточности видеоданных;
- устранение пространственной избыточности изображения;
- квантование;
- энтропийное кодирование.

Наиболее емкими с точки зрения вычислений являются этапы устранения временной и пространственной избыточности данных. Распараллеливание вычислений, применение быстрых алгоритмов и высокопроизводительных вычислителей при их реализации позволяют добиться наибольшего выигрыша в скорости компрессии. Этапы квантования и энтропийного кодирования, напротив, требуют малых вычислительных затрат и их параллельная реализация не даст существенного увеличения скорости компрессии.

Этап устранения временной избыточности видеоданных

Временная избыточность видеоданных проявляется в высокой схожести близких по времени кадров.

Устранение временной избыточности производится путем прогнозирования очередного кадра и кодирования ошибки прогноза (разностного кадра). Ошибка предсказания, как правило, обладает существенно меньшей энергией, а следовательно, может быть закодирована меньшим объемом данных.

Большинство современных систем кодирования видеоданных для устранения временной избыточности используют механизм компенсации движения на основе прямоугольных блоков пикселей [2, 3]. Этот механизм заключается в поиске на близких по времени кадрах (обычно одним или двумя) блоков, наиболее похожих на кодируемый (опорных блоков), например, по критерию минимальной энергии ошибки. При этом, как правило, область поиска ограничивается некоторой окрестностью кодируемого блока. Найденные блоки используются для построения прогноза, а ошибка прогноза вместе с информацией о положении опорных блоков (векторами перемещения [2, 3]) передается декодеру (рис. 1). Восстановление изображения в декодере производится путем спрогнозированного блока и ошибки прогноза.

Важной является задача выбора размера блоков для компенсации движения, а также точности вычисления векторов перемещения. С уменьшением размера блока и увеличением точности вычисления векторов перемещения уменьшается энергия ошибки прогноза, а следовательно, и требуемый для кодирования объем данных, однако одновременно с этим увеличивается число передаваемых векторов перемещения и

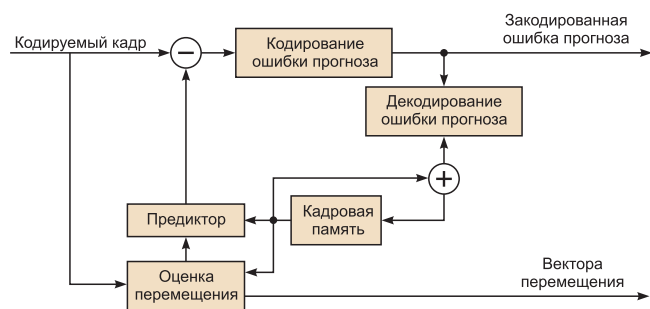


Рис. 1. Функциональная схема алгоритма компрессии видеоданных с компенсацией движения

число бит, требуемых для их кодирования. Эффективного сжатия можно добиться путем адаптации этих параметров алгоритма к свойствам кодируемого изображения. Такой подход реализован, например, в рекомендации ITU-T H.264.

Анализ алгоритма компенсации движения показывает, что он требует выполнения большого числа вычислений, причем его параллельная реализация затруднена в следствие наличия итеративных процедур и сложности организации параллельного доступа к памяти. Таким образом, пути повышения скорости компрессии данных при сохранении показателей степени сжатия и качества изображения на этапе устранения временной избыточности заключаются в увеличении скорости выполнения операций, например, путем использования высокопроизводительных специализированных вычислителей или сигнальных процессоров.

Этап устранения пространственной избыточности изображения изображений

Естественные изображения, а также ошибки прогноза при применении алгоритмов компенсации движения, описанных выше, обладают значительной пространственной избыточностью. Дальнейшей компрессии видеoinформации можно добиться путем декорреляции и концентрации информации в малом числе отсчетов. Наибольшее распространение для этой цели получили дискретное косинусное преобразование (ДКП) и дискретное вейвлетное преобразование (ДВП).

Дискретное косинусное преобразование

ДКП является эффективным инструментом для декорреляции значений интенсивности пикселей и концентрации энергии сигнала в спектральных компонентах. Оно широко используется в современных системах компрессии видеоданных и неподвижных изображений.

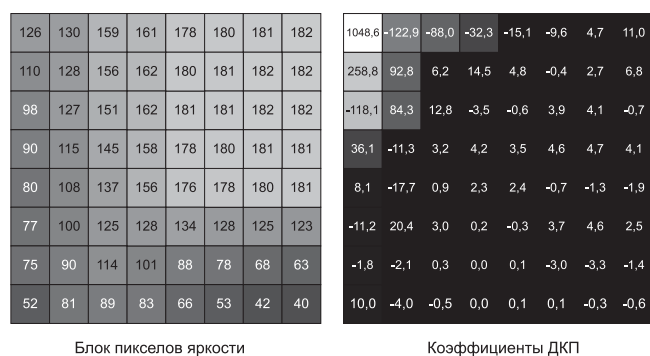


Рис. 2. ДКП-спектр блока изображения размером 8x8 пикселей

Прямое и обратное ДКП задаются выражениями:

$$B[p, q] = \alpha_p \alpha_q \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A[m, n] \cos \frac{\pi(2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi(2n+1)q}{2N},$$

$$A[m, n] = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_p \alpha_q B[p, q] \cos \frac{\pi(2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi(2n+1)q}{2N},$$

где A – исходное изображение размера $M \times N$; B – матрица коэффициентов ДКП;

$$\alpha_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M}, & p = 0, \\ \sqrt{2/M}, & 1 \leq p \leq M-1; \end{cases}$$

$$\alpha_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N}, & q = 0, \\ \sqrt{2/N}, & 1 \leq q \leq N-1. \end{cases}$$

Так как вычисление ДКП больших размерностей требует значительных вычислительных затрат, то на практике применяется ДКП на основе блоков размером $N \times N$.

Результатом ДКП является матрица коэффициентов, из которых наибольшее значение имеет коэффициент с индексами (0,0), представляющий собой среднее значение исходной матрицы.

ДКП представляет исходное изображение в виде суперпозиции гармонических составляющих, при этом основная энергия концентрируется в небольшой области около нулевых частот, а амплитуда высокочастотных составляющих мала или равна нулю (рис. 2). Это свойство позволяет добиваться высокой степени сжатия путем удаления малозначимых коэффициентов.

Дискретное вейвлетное преобразование.

Дискретное вейвлетное преобразование в настоящее время является наиболее эффективным инструментом компрессии неподвижных изображений [4]. В его основе лежат методы цифровой фильтрации. Исходный сигнал разбивается на низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) составляющие путем пропускания его через пару фильтров, с импульсными характеристиками, эквивалентными дискретным вейвлетным функциям. Затем производится прореживание каждой составляющей в два раза. В случае двумерного изображения $M \times N$ данные операции применяются сначала к строкам исходного сигнала, а затем к столбцам обоих полученных составляющих (рис. 3).

Таким образом, после однократного применения операции ДВП имеем изображение $M \times N$, состоящее из

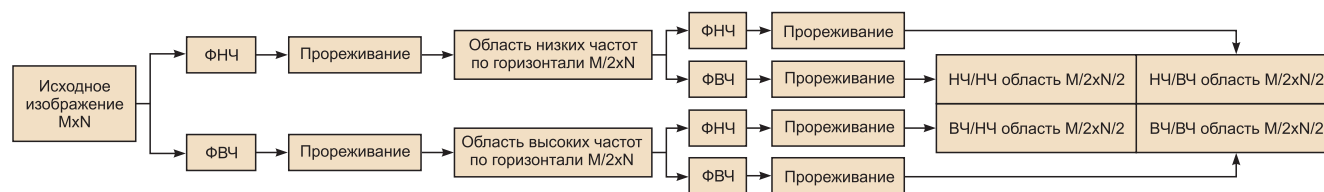


Рис. 3. Функциональная схема устройства, выполняющего ДВП

четырёх областей (рис. 3): низких частот исходного изображения по горизонтали и вертикали (НЧ/НЧ); низких частот по горизонтали и высоких по вертикали (НЧ/ВЧ); высоких частот по горизонтали и низких по вертикали (ВЧ/НЧ) и высоких частот по горизонтали и вертикали (ВЧ/ВЧ). Область НЧ/НЧ можно считать грубой аппроксимацией исходного изображения с пониженным пространственным разрешением, а высокочастотные области — его детализацией. Полученные четыре составляющих изображения содержат ту же информацию, что и исходное, но концентрация энергии изображения в низкочастотной области делает данное представление удобным для дальнейшего сжатия.

В практических приложениях компрессии изображений описанное разложение повторно применяется к НЧ/НЧ подполосе с формированием новых частотных поддиапазонов. В результате многократного (на практике — 4...6 раз) применения описанных операций получается древо частотных поддиапазонов, причем основная энергия сигнала сосредотачивается в области низких частот, а коэффициенты в ВЧ-областях близки к нулю, что позволяет эффективно сжимать изображения путем удаления малозначимой информации.

Анализ этапа устранения пространственной избыточности показывает, что он является вторым по вычислительной сложности этапом компрессии видеоданных после компенсации движения. Для ускорения обработки данных в случае ДКП возможно его параллельное вычисление для множества блоков, а в случае ДВП — выполнение преобразований по строкам и столбцам массивом идентичных пар фильтров. При этом в обоих случаях число параллельных вычислителей ограничивается в первую очередь сложностью коммутации входных сигналов. В настоящее время известны быстрые алгоритмы ДКП, а также основанные на нем приближенные целочисленные алгоритмы, позволяющие добиться дальнейшего ускорения процесса компрессии [2].

Квантование

Назначение этапа квантования состоит в том, чтобы снизить динамический диапазон коэффициентов ДКП или ДВП. Таким образом, для представления квантованных величин возможно выделение меньшего числа бит по сравнению с исходными.

На практике наиболее часто используется линейный квантователь, описываемый выражением

$$X = \text{Round}(Y/Q),$$

где Y — исходное значение, Q — шаг квантования, Round — операция округления до целого.

Очевидно, что чем больше шаг квантования, тем меньше динамический диапазон квантованных значений и меньше объем данных, требуемых для их представления, однако одновременно снижается точность восстановления изображения. При малом шаге квантования точность восстановления будет выше,

*Ученые при помощи невидимых
глазом технологий делают
видимой окружающую реальность...*

Журнал "Автоматизация в промышленности"

однако потребуется передача большего объема данных. Таким образом, регулировка шага квантования позволяет добиться компромисса между степенью сжатия и качеством восстановленного изображения.

Известно, что человеческий глаз менее чувствителен к высокочастотным компонентам изображения по сравнению с низкочастотными. Это позволяет производить квантование высокочастотных коэффициентов ДКП и ДВП с большим шагом без заметного ухудшения качества восстановленного изображения.

Вычислительная сложность этапа квантования мала по сравнению с этапами, описанными выше, и его аппаратное распараллеливание не даст значительного увеличения скорости обработки данных. Однако при параллельной реализации ДКП и ДВП квантователь может быть включен в каждый из параллельных вычислителей, что позволит упростить дальнейшую обработку данных без значительного увеличения аппаратных затрат.

Энтропийное кодирование

Данные, полученные в результате описанных выше операций, обладают, как правило, значительной статистической избыточностью. Задача энтропийного кодера заключается в представлении этих данных в эффективном виде с точки зрения объема. На практике наиболее часто используемыми для этой задачи являются коды переменной длины Хаффмана и арифметические коды [2].

Вычислительная сложность этапа энтропийного кодирования также невелика по сравнению с компенсацией движения, ДКП и ДВП. В процессе кодирования имеются промежуточные этапы, предшествующие или сопутствующие энтропийному кодированию (переупорядочение коэффициентов, кодирование по методу дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ) и другие), что усложняет его параллельную реализацию. Таким образом, этап энтропийного кодирования наиболее целесообразно выполнять путем последовательных вычислений.

Пути аппаратной реализации систем компрессии изображений

Приведенный выше анализ основных этапов компрессии изображений с точки зрения возможностей по аппаратному распараллеливанию вычислений показывает, что построение систем компрессии изображений в реальном времени предполагает использование комбинаций последовательных и параллельных решений для различных этапов обработки.

Для реализации высокопроизводительных специализированных вычислителей, в том числе предназначенных для кодирования изображений, в настоящее время наиболее целесообразно использовать

ПЛИС и сигнальные процессоры (СП) в силу их универсальности и гибкости применения.

Основные отличительные особенности ПЛИС по сравнению с СП, обуславливающие особенности их применения в системах компрессии изображений:

- наличие внутренней памяти;
- хорошая приспособленность для реализации операций умножения, сложения с накоплением, свертки, цифровой фильтрации;
- невысокая тактовая частота;
- программируемая структура соединений;

Наличие внутренней памяти и приспособленность ПЛИС для реализации операций свертки и цифровой фильтрации облегчают реализацию ДКП и ДВП. Невысокая тактовая частота компенсируется возможностью построения больших массивов идентичных вычислителей, а программируемая структура соединений позволяет осуществлять коммутацию множества входных и выходных сигналов.

Основные отличительные особенности СП:

- высокая тактовая частота;
- жесткая внутренняя структура;
- хорошая приспособленность для выполнения ветвящихся, циклических и итеративных процедур;

Данные особенности обуславливают предпочтительность использования СП для сложных адаптивных и контекстнозависимых алгоритмов, требующих быстрой последовательной обработки данных, таких как компенсация движения и энтропийное кодирование.

Для построения высокопроизводительной системы компрессии изображений предлагается использовать комбинированный подход, использующий ПЛИС и СП на различных этапах кодирования. Выполнение этапов устранения временной избыточности изображения и энтропийного кодирования при этом следует воз-

ложить на СП, а этапов устранения пространственной избыточности и квантования – на ПЛИС.

Предложенный подход позволяет:

- использовать достоинства как ПЛИС, так и СП при выполнении различных этапов обработки данных и избегать их недостатков;
- в короткие сроки проектировать системы кодирования с заданными параметрами быстродействия, степени сжатия и качества изображения;
- модифицировать готовые решения под различные технические требования и условия применения.

Выводы

В работе проведен анализ возможностей увеличения скорости компрессии изображений путем аппаратного распараллеливания вычислений на основных этапах обработки. В качестве реализации высокопроизводительной системы кодирования изображения предложено совместное использование ПЛИС и сигнального процессора, причем этапы устранения временной избыточности и энтропийного кодирования предложено выполнять с помощью сигнального процессора, а этапы устранения пространственной избыточности и квантования – с использованием ПЛИС.

Список литературы

1. Воронков Д.И., Заводсков С.Д., Руткевич А.В., Синельникова М.В., Стешенко В.Б., Шишкин Г.В. Построение каналов связи для управления мобильными роботами: опыт практической реализации // Автоматизация в промышленности. 2008. №5.
2. Ричардсон Я. Вideoкодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005.
3. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 2005.

Андреанов Михаил Николаевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,

Пучков Григорий Анатольевич – ст. научный сотрудник,

Калашников Константин Сергеевич – инженер ООО "НПП Цифровые решения",

Бумагин Алексей Валериевич – канд. техн. наук, начальник сектора,

Гондарь Алексей Васильевич и Прудников Алексей Александрович – инженеры,

Стешенко Владимир Борисович – канд. техн. наук,

начальник отдела проектирования СБИС ОАО "Российские космические системы".

Контактный телефон (495) 978-28-70.

Windows Embedded Standard 2011 ("Quebec")

Операционная система Windows Embedded Standard 2011 – это следующее поколение встраиваемой ОС Windows Embedded Standard 2009, которая базировалась на Windows XP Professional. Новая версия полностью основана на современной платформе Windows 7 и содержит дополнительные возможности разработчикам встраиваемых систем.

В системе Windows Embedded Standard 2011 для создания высокопроизводительных систем поддерживаются 64-разрядные процессоры (с архитектурой x64) в дополнение к 32-разрядным (с архитектурой x86). В состав продукта также входит новый пользовательский интерфейс Aero с трехмерным пролистыванием Windows Flip 3D, улучшенной панелью задач, списками переходов и поддержкой Windows Presentation Foundation для разработки новых, удобных и привлекательных интерфейсов.

Самые современные функции и поддержка удаленной работы в серверной инфраструктуре обеспечиваются решениями виртуализации, такими как службы терминалов в Windows Server 2008 R2 или инфраструктурой виртуальных рабочих столов с гипервизором Microsoft Hyper-V при использовании протокола RDP 7.0.

Windows Embedded Standard 2011 – первая встроенная ОС Microsoft, в которой предусмотрена полностью сертифицированная поддержка IPv6 в дополнение к поддержке IPv4. В этой системе для удобства интеграции в корпоративные сети реализован новый стек TCP/IP, поддерживающий современные беспроводные сети, и усилена безопасность за счет реализации защиты доступа к сети. Устройства могут присоединяться к имеющимся доменам Active Directory, а для безопасности можно применять уже существующие групповые политики.

В системе Windows Embedded Standard 2011 реализованы интерфейсы API управления питанием, с помощью которых можно снижать расход электроэнергии процессорами устройств; предусмотрены различные средства для создания экономичных, экологически чистых решений.

Http://www.quarta.ru