

УДК 681.3.06

И. М. Арсенин, Б. Б. Морозов, И. В. Роговой, И. Г. Таранцев,  
Ю. В. Тарасов, А. С. Токарев

(Новосибирск)

### СЖАТИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Предложен метод сжатия компьютерно-синтезированных изображений, использующий цветовую связность и ограничение цветовой палитры. Метод допускает программную установку компромисса между качеством восстановленного после компрессии/декомпрессии изображения и степенью сжатия видеоданных, при этом реализуется простыми аппаратными средствами низкой стоимости.

Компьютерная графика реального времени в таких приложениях, как производство телевизионной видеопродукции, имитация визуальной обстановки в тренажерных комплексах и системах виртуальной реальности, требует больших вычислительных мощностей, обрабатывающих огромные потоки данных. Например, при отображении 25 полноцветных кадров в секунду с разрешением  $720 \times 576$  (рекомендация МККТТ № 601) требуется обрабатывать поток данных около 30 Мбайт/с. Специализированные системы, обладающие такими возможностями, обычно стоят десятки и сотни тысяч долларов. Примером могут служить разработки фирм "Silicon Graphics", "Abekas", "Quantel", "Sierra", "Geteris" и т. п.

Более дешевые системы, реализованные на стандартных средствах вычислительной техники типа IBM PC, из-за ограниченной пропускной способности базовой шины вынуждены использовать различные методы сжатия изображений для сокращения потоков данных. В таких системах чаще всего применяется алгоритм JPEG [1], основанный на дискретно-косинусном преобразовании, и его модификация для подвижных изображений — группа алгоритмов MPEG [2]. Эти алгоритмы были разработаны для компрессии фотографических и телевизионных изображений, которые характеризуются высоким уровнем шумов, сглаженными цветовыми переходами, отсутствием мелких контрастных деталей. Искажения, возникающие в процессе кодирования/декодирования таких изображений, визуально не заметны даже при больших коэффициентах сжатия (больше 10), хотя теоретически они имеются всегда.

Однако в случае кодирования/декодирования синтезированных изображений, для которых характерны высокая контрастность и четкость во всех планах визуальной сцены, обилие важных мелких деталей (типа титров) с резкими переходами цвета, обработка алгоритмами типа JPEG дает характерные искажения («всплески», нижняя часть рис. 1), поскольку сжатие здесь достигается за счет ограничения пространственного спектра изображения. Кроме того, отсутствие шумов, маскирующих вносимые искажения, заметно снижает возможности сжатия синтезированных изображений по сравнению с фотографическими и телевизионными. Таким образом, применительно к синтезированным изображениям возможности алгоритмов сжатия типа JPEG оказываются сильно ограниченными. При достижении профессионального телевизионного качества восстановленных изображений эти алгоритмы обеспечивают коэффициент сжатия видеоданных порядка 2—4.

Цель работы — разработка алгоритма, обеспечивающего сжатие синтезированных изображений без видимых искажений в 4 и более раз, а также аппаратная реализация декомпрессора реального времени, использующего этот алгоритм.

Предлагаемый алгоритм сжатия видеоданных методом компрессии цветовой палитры базируется на следующих свойствах синтезированных изображений, установленных авторами данной статьи в результате статистического анализа изображений различных типов:

А. Цветовая связность. Для большинства изображений до 60 % пикселей имеют цвет, совпадающий с цветом соседнего пиксела. Для 90 % пикселей приращение интенсивностей цветовых компонент не превышает  $\pm 4$  единицы (при кодировании по 8 бит на компоненту).

Б. Ограничение цветовой палитры. При разрешении  $512 \times 512 = 2^{18}$  пикселей в кадре изображения используется порядка 6000 различных цветов и оттенков, т. е. в любой связной области кадра число используемых цветов, как правило, заведомо меньше числа пикселей.

Сжатие изображений выполняется программными средствами на стандартной платформе IBM PC. Процесс сжатия выглядит следующим образом:

- изображение разбивается на квадраты, каждый из которых кодируется отдельно независимо от остальных;
- изображение внутри очередного квадрата анализируется с целью определения набора цветов (палитры), полностью характеризующих его;
- по полученной палитре формируется блок информации, описывающий сжимаемое изображение;
- блок информации записывается в постоянную память для дальнейшего использования при восстановлении изображения.

Описание блока имеет следующий формат:

[тип] [палитра] [таблица индексов]

Тип блока является заголовком описания и определяет характер изображения внутри сжимаемого квадрата. Можно выделить пять типов:

1. Монохромный блок — все пиксели квадрата имеют одинаковый цвет. Этот цвет заносится в палитру. Таблица индексов не передается.

2. Многоцветный блок — пиксели имеют различные цвета, всего  $N_c$  цветов, которым присваиваются индексы от 0 до  $(N_c - 1)$  в порядке их перечисления в палитре. Из цветовой близости следует, что близкие пиксели содержат близкие цвета. Следовательно, имеет смысл в палитре передавать не абсолютные значения цветов, а их приращения относительно базового значения. В описываемом методе компоненты цвета  $R, G, B$  кодируются последовательно и независимо друг от друга. Для каждой компоненты вначале передается ее базовое значение, затем разрядность приращений и в конце бит-упакованная последовательность приращений данной компоненты относительно базового значения для всех цветов в палитре. Таблица индексов содержит бит-упакованные индексы пикселей в порядке построчного сканирования квадрата. Количество индексов равно количеству пикселей в квадрате, разрядность индексов зависит от числа цветов  $N_c$ :

Число цветов в палитре	Разрядность индексов
1	0
2	1
3—4	2
5—8	3
9—16	4
17—32	5
33—64	6

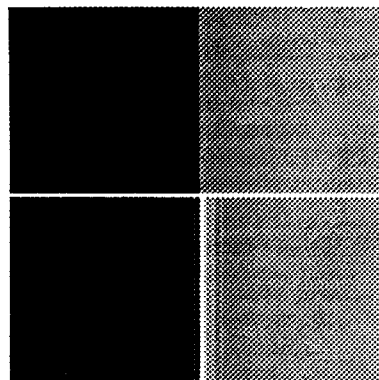


Рис. 1

3. Полноцветный блок — количество цветов в квадрате столь велико, что кодирование палитры и таблицы индексов в итоге дает коэффициент сжатия менее 1. В этом случае на месте палитры передаются абсолютные значения  $R, G, B$ -компонент пикселей в порядке строчного сканирования квадрата, т. е. несжатое изображение. Таблица индексов отсутствует.

4. Табличный блок — квадрат содержит цвета из текущего содержимого палитры в результате обработки предшествующих блоков. Для этого типа палитра опускается, передается только таблица индексов.

5. Когерентный блок — изображение внутри квадрата текущего кадра полностью совпадает с изображением этого же квадрата предшествующего кадра. В этом случае ни палитра, ни таблица индексов не передаются.

Наиболее общим случаем является тип многоцветного блока. Выражение для коэффициента сжатия  $K$  выглядит следующим образом:

$$K = \frac{p(r + g + b)}{L_r + r_0 + \text{rnd}(L_r N_c) + g_0 + \text{rnd}(L_g N_c) + b_0 + \text{rnd}(L_b N_c) + \text{rnd}(p \log(N_c))}, \quad (1)$$

где  $p$  — количество пикселей в квадрате;  $r, g, b$  — разрядность цветовых компонент в исходном (несжатом) изображении;  $L_r$  — разрядность командного слова (тип блока);  $r_0, g_0, b_0$  — суммарная разрядность компоненты базы и указателя приращений палитры;  $L_r, L_g, L_b$  — разрядность приращений цветовых компонент палитры;  $N_c$  — количество цветов в квадрате;  $\text{rnd}$  — округление с избытком до целого числа байтов;  $\log$  — логарифм по основанию 2, округление с избытком до целого.

Как можно видеть, коэффициент сжатия растет с увеличением размера сжимаемого квадрата и с уменьшением числа цветов  $N_c$ , что находится во взаимном противоречии, поскольку чем больше область изображения, тем больше в ней различных цветов. Исследованием установлено, что при растре  $512 \times 512$  для большинства синтезированных изображений оптимальным является размер сжимаемого квадрата  $8 \times 8 = 64$  пиксела. На рис. 2 показана зависимость коэффициента сжатия  $K$  от количества цветов  $N_c$  и суммарной разрядности приращений цветовых компонент палитры  $L_c = L_r + L_g + L_b$  при  $r = g = b = L_c = 8$  двоичных разрядов,  $r_0 = g_0 = b_0 = 16$  двоичных разрядов и  $p = 64$ . Все значения коэффициента сжатия лежат в диапазоне от  $K_{\min} = 0,995$  (для полноцветных блоков) до  $K_{\max} = 192$  (для когерентных блоков).

Для синтезированных изображений средней визуальной сложности блоки содержат в среднем 16—32 цветов при разбросе интенсивностей цветовых компонент 8—64 единиц дискретности. Коэффициент сжатия в соответствии с (1) при этом находится в пределах  $K = 1,5—3,5$ . Наличие табличных и когерентных блоков увеличивает коэффициент сжатия в 1,2—2 раза. Столь

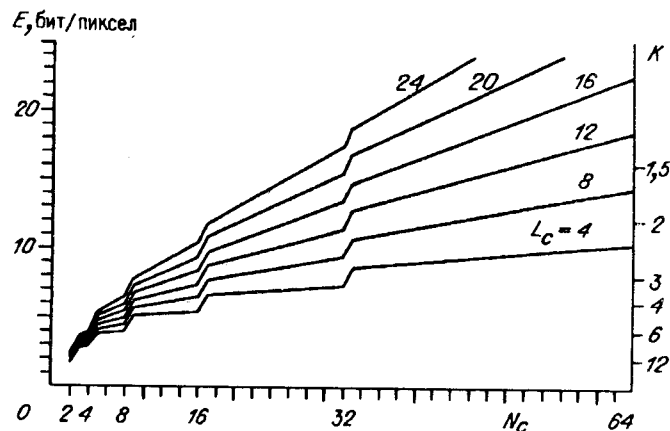


Рис. 2

малый коэффициент сжатия не позволяет использовать данный метод напрямую в компьютерах с низкой пропускной способностью шины. Повышение коэффициента сжатия может быть достигнуто путем искусственного сокращения числа цветов в блоках, т. е. при сжатии изображений с потерями. Вся проблема в том, как это осуществить с наименьшими визуальными искажениями.

Существует несколько подходов к уменьшению количества цветов в изображении. Они характеризуются различной эффективностью, по-разному влияют на качество изображения, имеют различную сложность и ресурсоемкость программной реализации. Для сравнения и оценки различных методов внесения искажений целесообразно и удобно рассматривать их поведение на двух крайних по своим спектральным характеристикам классах изображений. С одной стороны, это изображения, обладающие низкой девиацией и низкой пространственной частотой (в дальнейшем они будут называться низкочастотными), с другой — изображения с высокой девиацией и высокой пространственной частотой (высокочастотные). Так, JPEG-компрессоры хорошо справляются с низкочастотными изображениями, но сильно искажают (либо плохо сжимают) высокочастотные.

Самый простой способ сокращения количества цветов — игнорирование одного или нескольких младших битов в двоичном представлении компоненты цвета — так называемый «цветовой срез». Этот способ исключительно прост в реализации и сокращает количество цветов в блоке в среднем вдвое на каждый игнорируемый бит. Он обладает, однако, несколькими недостатками, которые делают его совершенно непригодным для практического применения в основном из-за невозможности управлять работой алгоритма в зависимости от визуальных особенностей сжимаемого фрагмента изображения. По этой причине «цветовой срез» дает хорошо заметные визуальные дефекты в виде полос на низкочастотных изображениях (рис. 3).

Другой достаточно простой способ — имитация большого количества близких цветов статистическим распределением меньшего количества цветов (dithering), в дальнейшем называемая «точечной модуляцией». Этот способ основан на том, что зрительный аппарат человека обладает меньшим пространственным разрешением для цветового зрения, чем для яркостного [3, 4]. Если на изображении имеется область с плавным распределением цвета, то во многих случаях эту область можно отобразить с помощью двух-трех цветов, чередуя цветные точки так, чтобы средний цвет каждого небольшого участка этой области оставался неизменным. Если эти цвета имеют одинаковые (или очень близкие) интенсивности и близки по цветовому тону, то визуально эта область не будет отличаться от исходной. Помимо того что чисто цветовые различия сглаживаются человеческим зрением, дополнительная низкочастотная фильтрация имеет место при преобразовании видеосигнала в телевизионные стандарты PAL, SECAM или NTSC, что делает точечную структуру изображения еще менее заметной [3, 4]. Поскольку данный метод моделирует низкие пространственные частоты высокими, его невозможно применять при сжатии высокочастотных изображений. По той же причине к большим потерям качества приводят попытки сжимать участки изображения с резкими границами цветов.

Еще один метод, гораздо более универсальный и гибкий, хотя и более сложный, — статистическая обработка цветовой палитры с учетом частоты использования цветов, когда данная палитра из  $N$  цветов заменяется новой палитрой из  $M < N$  цветов так, чтобы суммарное отклонение при замене цветов исходной палитры цветами полученной палитры было минимально. При

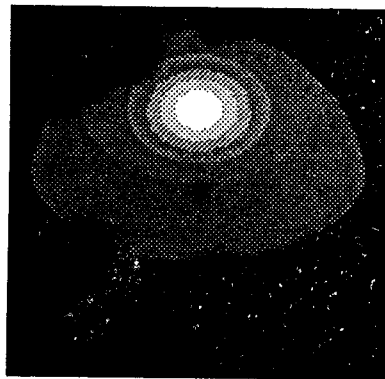


Рис. 3

этом могут применяться две различные стратегии: ограничения максимального числа цветов в палитре или максимальной погрешности приближения цвета.

При использовании первой стратегии количество цветов в палитре может и должно варьироваться в зависимости от исходного количества цветов, например, можно сокращать количество цветов вдвое. Это позволяет грубо учесть особенности исходного изображения. Данная стратегия дает хорошо прогнозируемый коэффициент сжатия и неплохой баланс между качеством и коэффициентом сжатия, но не гарантирует отсутствия больших цветовых искажений.

Вторая стратегия отличается тем, что позволяет учесть особенности человеческого зрения при различении цветов. Максимальную погрешность цвета можно задавать в зависимости от самого цвета с учетом результатов исследований зрительного аппарата [3, 4]. В качестве первого приближения может быть использован факт линейной зависимости различаемого порога яркости от самой яркости. Такая стратегия дает полную гарантию отсутствия большего, чем заданная величина, искажения цвета и наилучший для исследованных методов баланс между качеством и коэффициентом сжатия. Однако прогнозировать коэффициент сжатия можно только статистически.

При больших коэффициентах сжатия, т. е. при малом количестве цветов для первой стратегии или большой погрешности — для второй, статистический метод может приводить к проявлению границ квадратов на изображении. Снизить вероятность появления таких дефектов можно, придав краевым точкам квадратов на этапе статистического анализа большие веса, чем точкам, не принадлежащим к краю квадрата. Еще один дефект, проявляющийся при статистическом методе, — появление полос на низкочастотных участках изображения (см. рис. 3). Единственный способ устранения этих дефектов — увеличение максимального количества цветов или уменьшение максимальной погрешности цвета.

Качественные оценки различных методов сокращения цветовой палитры, полученные авторами статьи в ходе разработки алгоритма, сведены в таблицу, из которой видно, что наилучшим из исследованных методов является метод

Критерий оценки	Метод			
	«Цветовой срез»	«Точечная модуляция»	Статистический метод	
			Стратегия 1	Стратегия 2
Скорость компрессии	Очень высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Качество на высокочастотном изображении	Среднее	Низкое	Среднее	Высокое
Качество на низкочастотном изображении	Низкое	Высокое	Низкое	Среднее
Коэффициент сжатия на высокочастотном изображении	Средний	Высокий	Высокий	Высокий
Коэффициент сжатия на низкочастотном изображении	Средний	Высокий	Низкий	Низкий
Предсказуемость коэффициента сжатия	Средняя	Высокая	Высокая	Средняя

статистического подбора цветов, опирающийся на вторую стратегию ограничения. Именно этот метод используется в разработанных для компрессии программах, обеспечивающих коэффициенты сжатия синтезированных изображений 3—8 при отсутствии визуальных дефектов.

Описанный метод положен в основу устройства видеовывода «Феникс», реализованного в виде модуля для IBM PC/AT. Модуль выполнен в конструктиве шины ISA, занимает одну 16-разрядную позицию шины и адресуется как порт ввода/вывода. Модуль содержит полноцветный видеобuffer на кадр изображения (24 бит/пиксел), видеоконтроллер и декомпрессор сжатых видеоданных. На выходе модуля формируются аналоговые *R, G, B*-видео-сигналы в телевизионном стандарте 625 строк чересстрочной развертки (RS-170). Сжатые видеоданные извлекаются из оперативной памяти ПЭВМ или из дискового накопителя, если он обеспечивает необходимую скорость потока данных, и поступают на вход декомпрессора либо с шины ISA, либо через специальный дополнительный разъем скоростного (15 Мбайт/с) канала, который может быть связан со скоростными шинами EISA, PCI, VESA VL-Bus.

Программное обеспечение модуля позволяет осуществлять воспроизведение и монтаж видеофильма, озвучивание и запись на видеомагнитофон. Ведутся работы по сопряжению с программными средствами производства видеопродукции — AutoDesk 3D Studio, AutoDesk Animator PRO и т. п.

#### ВЫВОДЫ

Предложенный метод допускает сжатие видеоданных с потерями, причем компромисс между визуальным качеством восстановленного изображения и коэффициентом сжатия устанавливается и управляется программно.

При сжатии с минимальными потерями изложенный метод обеспечивает больший коэффициент сжатия, чем алгоритмы типа JPEG, при том же визуальном качестве восстановленного изображения.

При сжатии синтезированных изображений со значительными потерями эффективность метода соизмерима с эффективностью сжатия по стандарту JPEG, хотя требует при этом значительно меньших вычислительных мощностей при декомпрессии видеоданных.

Алгоритм декомпрессии реального времени реализуется достаточно простыми аппаратными средствами низкой стоимости.

Устройство видеовывода успешно прошло опытную эксплуатацию и в настоящее время активно используется на студиях компьютерной графики в ряде городов России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard // Com. of the ACM.—1991.—34, N 4.
2. Le Gall D. MPEG — A video compression standard for multimedia applications // Ibid.
3. Измайлов Ч. А., Соколов Е. Н., Черноризов А. М. Психофизиология цветового зрения.—М.: МГУ, 1989.
4. Murch G. M. Colour graphics — blessing or ballyhoo? // Computer Graphics Forum.—1985.—N 4.

*Поступила в редакцию 9 июня 1994 г.*