

УДК 621.397.3

## УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СЖАТИЯ ДАННЫХ ТВ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

**А. Н. Пузий**, старший научный сотрудник-соискатель Ташкентского университета информационных технологий (ТУИТ); puziy-2008@mail.ru  
**И. А. Гаврилов**, доцент ТУИТ, к.т.н.; Gavrilov-1960@mail.ru

Анализируются стандартизированные и перспективные методы сжатия данных ТВ-изображений на основе ДКП, вейвлет-преобразований и фракталов с использованием межкадровой обработки посредством методов компенсации движения. Для повышения эффективности сжатия сигналов потокового видео предлагаются методы на основе яркостных преобразований и масштабирования изображений.

**Ключевые слова:** цифровое телевидение, сжатие сигналов изображений, ДКП, вейвлет, фрактал, яркостные преобразования, компенсация движения, сегментация, масштабирование, метаданные, повышение эффективности сжатия.

**Введение.** С развитием цифрового телевидения значительно повышаются потребности в увеличении качества и количества ТВ-программ, при этом растет количество программ, передаваемых в стандартах высокой четкости и генерирующих гораздо больший объем данных. Как в условиях ограниченного частотного ресурса увеличить число передаваемых программ и при этом сохранить качество изображений? Только создавая более эффективные методы сжатия ТВ-изображений, обеспечивающие хорошее визуальное качество изображений при больших коэффициентах сжатия видеопотока.

ТВ-изображения, как известно, содержат большой объем избыточной информации. Так, в пределах одного видеосюжета информация в соседних кадрах обычно мало изменяется (рис. 1, а). Поэтому, если передавать только изменения изображений относительно опорного кадра, например в виде межкадровой разности, можно получить довольно большую эффективность сжатия видеопотока. Однако на

практике межкадровая разность обычно не применяется, поскольку при условии небольшого изменения ракурса съемки взаимные координаты пикселей изображений смещаются и значение межкадровой разности возрастает, увеличивая объем межкадровой информации.

Покажем это, используя объективные (алгоритмические) меры качества. Одной из них служит среднеквадратичное отклонение (СКО) значений пикселей:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^{k=wh} (org_k - rec_k)^2}{wh}, \quad (1)$$

где  $org$  и  $rec$  — массив точек соответственно исходного и кодированного изображения;  $h$  и  $w$  — высота и ширина изображения.

Степень различия двух этих сравниваемых изображений определим по формуле [1]:

$$\text{Ошибка, \%} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=w, j=h} (A_{i,j} - B_{i,j})^2}{\sum_{i=1, j=1}^{i=w, j=h} A_{i,j}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Рассмотрим видеопоследовательность «Песок» (см. рис. 1, б), где ракурс съемки изменяется незначительно, а в качестве противопоставленной видеопоследовательно-

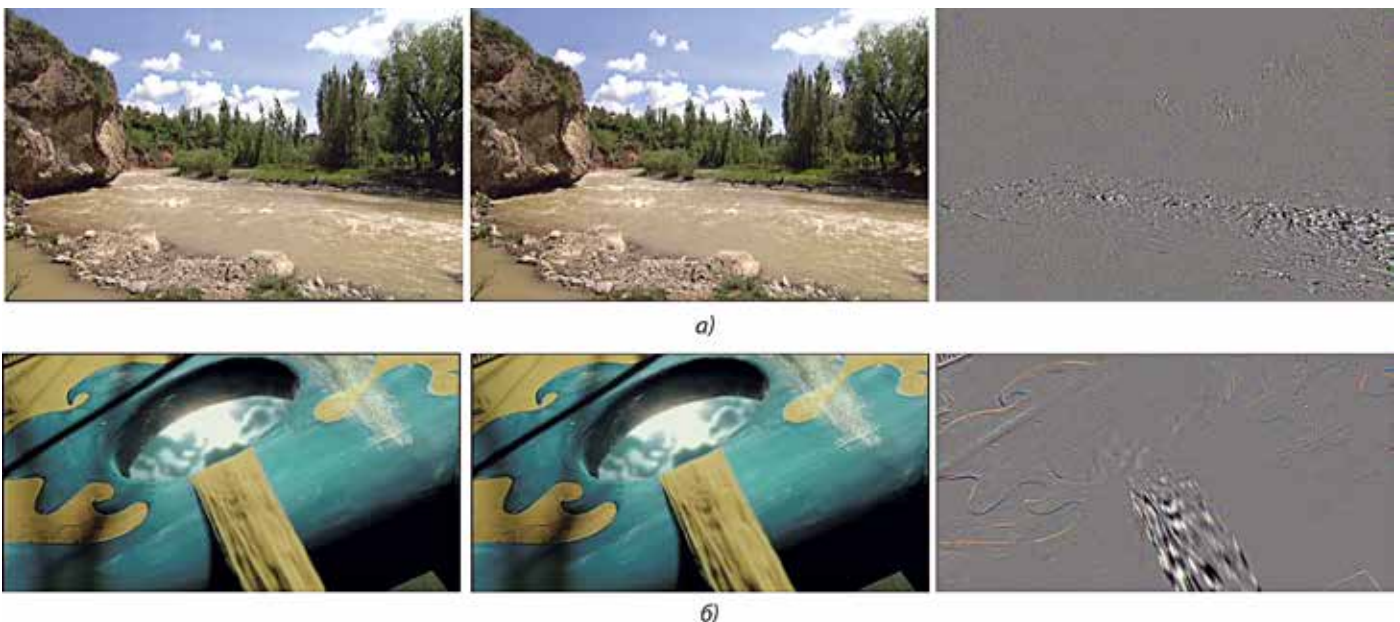


Рис. 1. Межкадровая разность двух смежных кадров при постоянном (а) и изменяющемся (б) ракурсе камеры

сти дается видео «Река» (см. рис. 1, а): здесь нет смещений фона. При одинаковой интенсивности изменения объектов в кадре различие двух смежных кадров исследуемых последовательностей превышает 2%.

*Различие видеопоследовательностей, %:*

Река . . . . . 3,67

Песок . . . . . 5,85

Даже если смещение камеры для зрителя незаметно, это служит основанием того, чтобы вместо межкадровой разницы выбрать для сжатия компенсацию движения.

**Межкадровая обработка на основе компенсации движения частей смежных кадров** заключается в поиске фрагментов изображения первого кадра в зонах их предполагаемого смещения в следующем кадре (рис. 2). Если такие фрагменты находятся, передаются не сами блоки пикселей (см. рис. 2, в — черные участки), а их новые координаты: векторы перемещения. Таким образом, например, 256 байт блока размером 16×16 пикселей можно заменить одним-двумя байтами его новых координат. Если же таких фрагментов нет, блоки передаются целиком (см. рис. 2, в, светлые участки изображения). При этом структура видеопотока включает опорный кадр, где устраняется только внутрикадровая избыточность, и один или несколько типов кадров, передающих межкадровые различия и векторы перемещений блоков, что реализуется в стандартах сжатия семейства MPEG и многих других кодеках.

Сегодня разработано достаточно методов и алгоритмов сжатия видеoinформации, обладающих различными качественными показателями, эффективностью сжатия, сложностью реализуемых алгоритмов и быстродействием.

При этом в механизмах обработки опорного кадра можно выделить следующие направления:

- сжатие на основе преобразования: дискретно-косинусное преобразование (ДКП), вейвлет и др.;
- фрактальное сжатие;
- векторное квантование.

У каждого подхода свои достоинства и недостатки.

**Методы сжатия на основе ДКП**, применяемые в стандартах JPEG и MPEG, используют деление изображения на блоки, обычно размером 8×8 пикселей, внутри которых путем спектрального преобразования распределяется энергия сигнала по его гармоническим составляющим. Данный метод отличается высокой производительностью, хорошо сочетается с блочным методом компенсации движения и обеспечивает приемлемое качество изображений при скоростях более 5 Мбит/с [2, 3]. Однако на меньших скоростях заметно проявляются искажения в виде блочного эффекта, в результате чего изображение приобретает мозаичный вид (рис. 3, б).

Механизм вейвлет-преобразований (ВП) подобен ДКП, но при этом используются не гармонические, а всплескоподобные базисные функции и обработка изображения осуществляется целиком. Искажения, вносимые сжатием с ДКП (см. рис. 3, б), значительно меньше, чем искажения, вносимые при использовании ВП (см. рис. 3, в).

*Различие между исходным и сжатым кадрами, %:*

Дискретно-косинусное преобразование . . . 13

Вейвлет-преобразование . . . . . 6,2

Основной недостаток преобразований Фурье и ДКП, в частности, заключается в том, что их гармонические ба-



Рис. 2. Компенсация движения на основе перемещения блоков

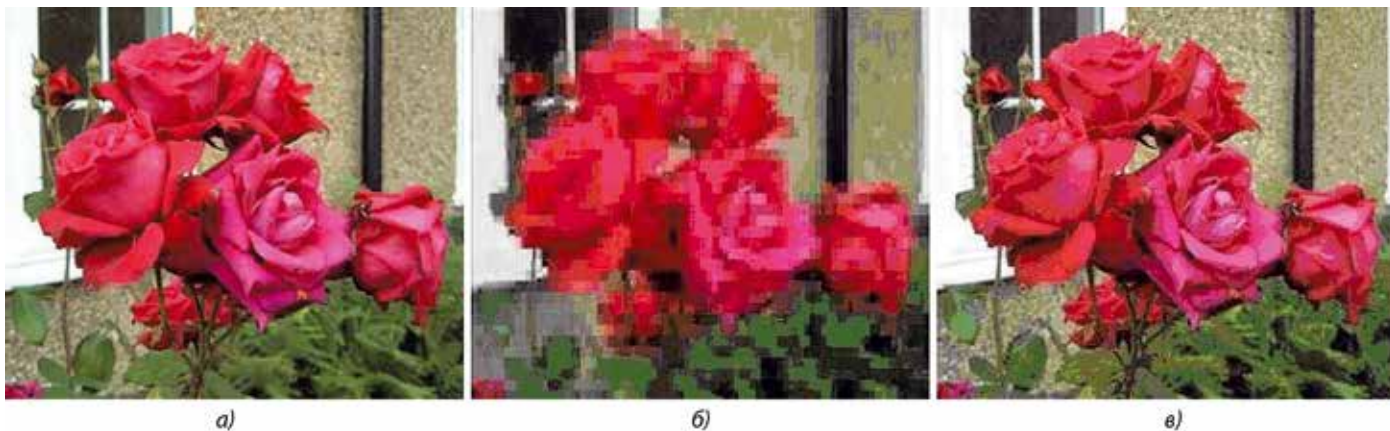


Рис. 3. Исходное (а) и восстановленные после сжатия в 100 раз на основе ДКП (б) и ВП (в) изображения

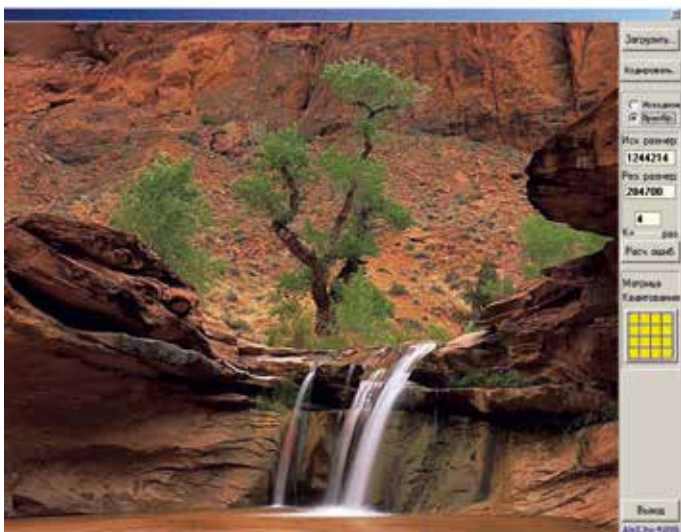
зисные функции плохо работают с непериодическими сигналами, из-за чего безвозвратно теряется часть полезной информации. Кроме того, ТВ-изображения представляют собой импульсный сигнал сложной формы. При этом уровни и длительности импульсов за время строки в зависимости от передаваемого сюжета могут изменяться более чем в 300 раз. Поэтому декорреляция пикселей гармоническими функциями (SIN или COS) не очень эффективна: не позволяет без потерь обеспечить большие коэффициенты сжатия. Особенно низкие коэффициенты сжатия получаются на мелкоструктурных изображениях (рис. 4, б). Более однородное изображение самолета (рис. 4, а) сжимается в семь раз больше, чем изображение горного пейзажа с высокой детальностью (см. рис. 4, б).

Применение вейвлет-преобразований, основанных на всплескоподобных базисных функциях, позволяет до 1,5–2 раз увеличить размер сжатия изображений в сравнении с методами сжатия на основе ДКП, без ухудшения их визуального качества [2] (рис. 5).

Как следует из рис. 5, а и б, разница между исходным и сжатым изображениями составляет 0,1%. Таким образом,



а)



б)

Рис. 4. Результаты сжатия изображений на основе ДКП без потери качества:

а —  $K_{сж} = 25$  раз; б —  $K_{сж} = 3,5$  раз



а)



б)

Рис. 5. Результаты декомпрессии изображений после сжатия на основе ДКП и ВП при одинаковых параметрах кодирования:

а —  $K_{сж} = 3,5$  (ДКП); б —  $K_{сж} = 5,2$  (ВП)

можно утверждать, что при условии одинакового качества обработанных изображений метод ВП дает большие показатели сжатия, чем ДКП. Однако ДКП остается предпочтительным методом сжатия ТВ-изображений из-за отсутствия однозначного алгоритма компенсации движения для изображений, сжатых с помощью ВП.

#### Вейвлет-преобразования для обработки изображений.

К настоящему времени разработано большое количество различных вейвлет-функций, отличающихся формой и длиной, свойствами и областями применения (рис. 6). Некоторые из них активно используются для обработки изображений, в частности вейвлет-функции Коэна-Добешифово (CDF22, CDF24, CDF97), Вилласенора (V610), Койфмана (BCW3, TS2/6, MIT97), Добеши (7/10) и др.

На практике вейвлет-преобразования реализуются набором фильтров верхних и нижних частот (рис. 7), через которые пропускается массив данных изображения. При этом вводится операция прореживания, удаляющая из массива каждый второй отсчет, поскольку, если известно значение сигнала в какой-то момент времени и его производная, значение сигнала в следующий момент времени можно вычислить [2].



Рис. 6. Наиболее распространенные вейвлет-функции для обработки изображений

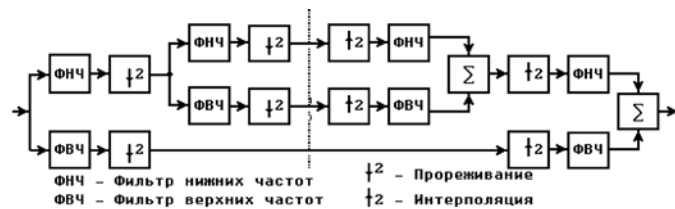


Рис. 7. Структурная схема ВП

Однако именно «безблочная» обработка изображений пока не позволяет применять блочные методы компенсации движения, что в два-три раза снижает эффективность сжатия видеопотока [4]. Поэтому в настоящее время вейвлеты используются для сжатия видеоданных в опорных кадрах, а в кадрах с компенсацией движения применяется ДКП, что реализовано в кодеках стандартов MPEG-4 Part 10, H.264.

**Механизм фрактального сжатия** основан на поиске в изображении «самоподобных» объектов или структур с применением масштабирования и поворотов на 90, 180, 270 град. [5]. При обнаружении подобных структур они заменяются на указатели на первоначально найденный фрактал, т.е. в каких координатах и с какими параметрами его следует вставить в синтезируемое изображение. Однако поиск фракталов требует очень больших вычислительных ресурсов и у них самое низкое быстродействие, что не дает возможности применять их в реальном масштабе времени. Фрактальный механизм сжатия приемлем для систем, не требующих сжатия видеоданных в режиме реального времени, зато результатом такого сжатия может стать превышение значения степени сжатия в 200 раз, что недостижимо для рассмотренных методов.

**Векторное квантование** использует табличный алгоритм представления сжатия, при котором изображение разбивается на небольшие блоки. Внутри них значения пикселей изменяются медленно, и каждый блок заменяется номером блока из кодовой книги, который, с точки зрения относительной меры, например среднего отклонения, ближе всего к нему.

Ключевым моментом при разработке векторного квантователя является построение кодовой книги и алгоритма быстрого поиска в ней оптимального блока. Применение векторного квантования для сжатия видео в сочетании с компенсацией движения увеличивает сжатие при условии согласованности параметров этих двух методов.

**Сегментация объектов.** Как сказано выше, сегодня существует довольно много методов компенсации движения, обеспечивающих различную эффективность и быстродействие [6]. В наиболее простых реализовано разделение изображения на прямоугольные блоки фиксированного размера, однако такая конфигурация блоков плохо согласуется с очертаниями реальных объектов изображения, что существенно снижает точность компенсации движения и соответственно их эффективность. Более сложные методы основаны на поиске и селекции объектов изображения, пере-

мещение которых и используется для компенсации их движения, что требует применения множества различных алгоритмов. Данный вид компенсации движения, называемый сегментацией объектов, предполагает разделение сцены на составные части и отделение объектов от фона в видео.

Сегментация объектов используется в кодеках, работающих в стандарте MPEG-4 [1]. В настоящее время существует довольно много методов сегментации изображений, отличающихся сложностью и быстродействием алгоритмов, точностью выделения областей или границ объектов, однако эффективность их работы в значительной мере зависит от насыщенности сюжета изображения. И хуже всего обстоит дело с выделением динамических объектов, форма, размер или цвет которых изменяются от кадра к кадру [7]. При этом изменением формы объекта считается любое изменение его контура. Координаты и конфигурация объекта, его яркость и цветность в реальных видеосюжетах могут меняться произвольным образом, что затрудняет выделение объекта сцены как единого целого. Чтобы воспользоваться сегментацией для сжатия видео, надо иметь быстродействующий процессор и буфер памяти, так как алгоритм сегментации сложен и требует хранения большого объема входной информации. Как правило, сегментация не используется в системах, обрабатывающих видеоданные в режиме реального времени.

Тем не менее, независимо от вида используемых блоков, все они для восстановления изображения создают дополнительный массив метаданных: координаты перемещения блоков, их идентификаторы и т.д. Причем для более точной компенсации движения необходимо использовать блоки меньшего размера. Это приводит к увеличению их числа, и, соответственно, значительно возрастает массив метаданных, что в совокупности снижает эффективность сжатия.

Таким образом, для обеспечения высокой эффективности сжатия видеопотоков в реальном времени целесообразно применять простые и быстродействующие алгоритмы, желательны не использующие компенсацию движения.

**Альтернативные механизмы сжатия.** Одним из вариантов такого подхода является предложенный авторами метод яркостных преобразований пикселей исходного изображения перед применением спектральных преобразований [8]. Суть метода в том, что изображение разбивается на блоки произвольного размера (2×2, 4×4, 8×8, 16×16 и 32×32 пикселя), внутри которых из значений яркости пикселей вычитается минимальное значение яркости в блоке. При этом вычитаемое значение для каждого блока сохраняется в массиве метаданных для правильной работы декодера. Это, с одной стороны, позволяет приблизить яркость пикселей к нулю, а с другой — сделать более однородной яркость всего поля кадра (рис. 8).

Как видно из рис. 8, на некоторых типах изображений удается получить полностью однородное изображение, объем данных которого может быть сжат в 300–500 раз простыми статистическими компрессорами [9]. При этом сжатие такого сюжета осуществляется очень быстро, без потерь данных и, соответственно, без ухудшения качества восстановленного изображения. Кроме того, данный метод не требует межкадровой обработки, поэтому любой кадр в цифровом потоке восстанавливается сразу, без отсылки к опорному кадру. Однако на реальных изображениях эффективность сжатия таким методом снижается из-за относительно большого объема метаданных [10].

Другим перспективным вариантом повышения эффективности сжатия изображений может стать применение

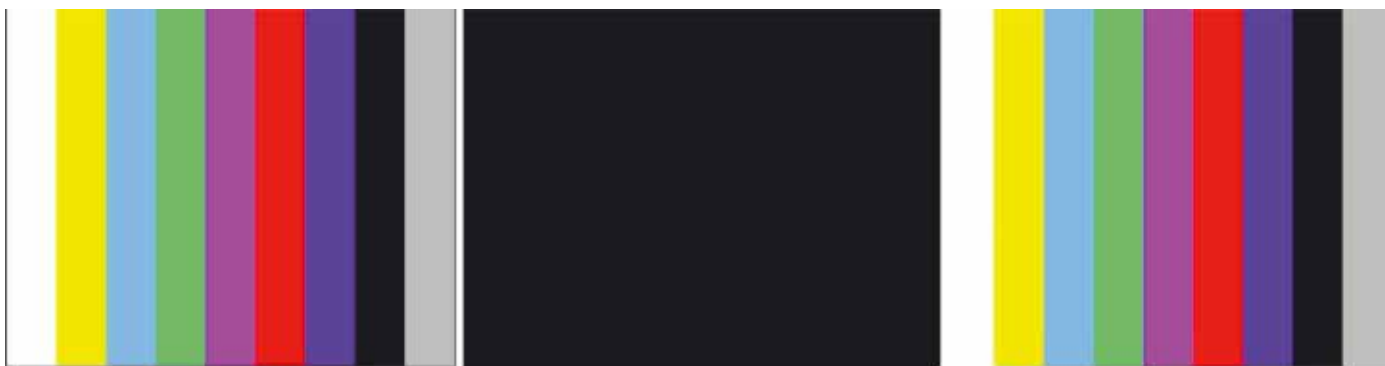


Рис. 8. Исходное, преобразованное и восстановленное изображение цветных полос

методов масштабирования исходных изображений [10], поскольку конечный объем данных сжатого изображения зависит от объема данных исходного изображения. Это означает, что, если, например, уменьшить его масштаб в 2 раза по ширине и высоте, объем данных сократится в 4 раза и соответственно уменьшится его объем после сжатия традиционными методами на основе JPEG или JPEG-2000. При восстановлении после сжатия изображение подвергается обратному масштабированию, в частности при помощи бикубической интерполяции, после чего восстанавливается его исходный размер. При этом требуемый коэффициент сжатия кодека уменьшается примерно в 4 раза, что позволяет улучшить визуальное качество восстановленных изображений [10].

Экспериментальные исследования показали, что на изображениях без мелких деталей применение данного метода обеспечивает хорошее качество при результирующем сжатии в 100 раз. Однако на мелкоструктурных изображениях наблюдается заметное снижение четкости из-за интерполяции.

**Заключение.** Как показал анализ существующих и перспективных методов сжатия ТВ-изображений, основное сжатие видеопотока происходит благодаря устранению межкадровой корреляции на основе методов компенсации движения. При этом все методы компенсации движения, независимо от сложности их реализации, формируют дополнительный массив метаданных, передающий декодеру служебную информацию о векторах перемещения блоков или объектов, их идентификаторах и пр. Причем объем метаданных зависит от количества используемых блоков. И чем большее сжатие видеопотока необходимо получить, тем более точная требуется компенсация движения — с использованием более мелких блоков. Это, соответственно, увеличивает размер метаданных и может свести на нет выигрыш в сжатии, получаемый от компенсации движения. Поэтому для обеспечения больших коэффициентов сжатия видеопотока при сохранении визуального качества изо-

бражений требуются алгоритмы, минимизирующие объем метаданных или вообще не использующие компенсацию движения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ричардсон Я.** Вideoкодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения // Мир цифровой обработки.— John Wiley & Sons, The Atrium, Southern Gate, Chichester, Wfset Sussex P0198SQ, England, 2003.
2. **Артюшенко В. М., Шелухин О. И., Афонин М. Ю.** Цифровое сжатие видеoinформации и звука.— М., 2003.— 430 с.
3. **Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В.** Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео.— М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.— 384 с.
4. **Гаврилов И. А., Суворова М. Ю., Валиев И. Р.** и др. Анализ методов межкадровой обработки изображений вейвлет-видеокодека // Вестник ТУИТ.— 2010.— № 1.
5. **Уэлстид С.** Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии.— М: Триумф, 2003.— 320 с.
6. **Кубасов Д., Ватолин Д.** Обзор методов компенсации движения.— Электронный ресурс: <http://cgm.graphicon.ru/content/view/76/65>.
7. **Кунегин С. В.** Стандарты сжатия видеоданных формата AVI.— Электронный ресурс: <http://kunegin.narod.ru/ref/avi/algor.htm>.
8. **Noel Brady.** MPEG-4 Standardized Methods for the Compression of Arbitrarily Shaped Video Objects // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Dec 1999, Volume 9, Issue 8.
9. **Гаврилов И. А., Рахимов Т. Г., Отто С. Э.** Сжатие ТВ-изображений с использованием яркостных преобразований // Вестник ТУИТ.— 2011.— № 1.
10. **Шифрис Г. В.** Использование предварительного масштабирования для повышения качества видеопотока /Матер. Междунар. заочной науч. конф.— Санкт-Петербург, март 2011. Электронный ресурс: <http://www.moluch.ru/conf/tech/archive/2/230/>.

Получено после доработки 30.04.14