

МЕТОД УСТРАНЕНИЯ БЛОЧНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА СЖАТЫХ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ

Петухов А.С., Свириденко В.А.

Введение

Схему сжатия статических изображений с использованием дискретного косинусного преобразования (ДКП) можно представить следующим образом:

– изображение разбивается на неперекрывающиеся блоки (обычно 8x8 пикселей);

– каждый блок преобразуется в частотную область с использованием ДКП;

– выполняется квантование коэффициентов ДКП, (при этом составляющие, соответствующие большим частотам, квантуются с большим коэффициентом; постоянная компонента (нулевая гармоника) кодируется отдельно);

– квантованные данные подвергаются статистическому кодированию (как правило, кодирование длин серий с последующим сжатием по Хаффману).

При сжатии видео последовательности данная схема дополняется этапом компенсации движения, при использовании которой кодируется не отдельный кадр, а разница между текущим и предыдущим кадрами. Эффект сжатия достигается прежде всего за счет исключения части информации на этапе квантования, причем в первую очередь отбрасываются визуально малозначимые высокочастотные компоненты.

При увеличении степени сжатия (т.е. при увеличении шага квантования) становятся заметными искажения, вызванные грубым квантованием, причем наиболее характерным является появление искажений в виде блочной структуры (блочные искажения).

Для устранения блочных искажений предложены многочисленные методы, в том числе использующие: низкочастотные фильтры [1], адаптивные фильтры [2], обработку в вейвлет области [3], или в области коэффициентов ДКП [4], кубическую интерполяцию [5], перекодирование изображения [6], «растягивание» базисных функций для обеспечения перекрытия между блоками [7]. Многие из перечисленных методов могут применяться совместно с итеративным методом проекций на выпуклые множества [8].

В последних стандартах сжатия видео (MPEG-4, H-263, H-264) предусмотрено использование алгоритма устранения блочных искажений, основанного на низкочастотной фильтрации. Такой подход обеспечивает приемлемый уровень подавления искажений, его основным недостатком является чрезмерная требовательность к вычислительным ресурсам.

Рассматривается проблема устранения наиболее характерных искажений, возникающих при сжатии видеоинформации с использованием современных стандартов типа MPEG. Предлагается математическая модель блочных искажений и новый алгоритм для их устранения, основанный на использовании линейной интерполяции в сочетании с низкочастотными фильтрами. Предлагаемый метод отличается пониженными требованиями к вычислительным ресурсам, не уступая по качеству аналогичному алгоритму стандарта MPEG-4.

Результаты тестирования, проведенного авторами с использованием MPEG-4 кодека DivX, показали, что алгоритм постобработки требует примерно столько же вычислительных ресурсов, сколько сам декодер.

В настоящей работе представлен метод, не уступающий по качеству методу MPEG-4, но требующий значительно меньше вычислительных ресурсов.

Модель блочных искажений и постановка задачи

Ни в одной из рассмотренных работ не приводится математическое обоснование полезного эффекта предлагаемых методов устранения блочных искажений.

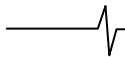
Рассмотрим строку одного блока восстановленного изображения (для столбцов изображения применимы такие же рассуждения). Будем считать, что к данному блоку не применялась процедура компенсации движения (т.е. отсутствует аддитивная составляющая), и что все коэффициенты ДКП кроме постоянной составляющей после квантования обратились в 0. Такая ситуация реально возникает на практике при кодировании однородных областей изображения с отсутствием мелких деталей. При этом справедливо следующее соотношение:

$$D[k \cdot N + j] = \sum_{i=0}^{N-1} S[k \cdot N + i] / N, \quad j \in [0, N-1], \quad (1)$$

где D – элемент кодированного изображения, S – элемент исходного изображения, N – размер блока, k – номер блока, i, j – номер пикселя внутри блока.

В терминах цифровой фильтрации соотношение (1) эквивалентно последовательному выполнению следующих операций:

- обработка строки исходного изображения однородным фильтром (вычисление среднего значения);
- уменьшение частоты дискретизации в N раз (где N – размер блока);
- увеличение частоты дискретизации в N раз
- интерполирование с использованием интерполятора нулевого порядка.



На рис. 1. показано изменение профиля яркости строки изображения при выполнении этих операций для значения $N = 4$.

Использование математического аппарата цифровой фильтрации позволяет рассматривать процесс возникновения блочных искажений в частотной области (в случае изображений под частотой имеется в виду пространственная частота).

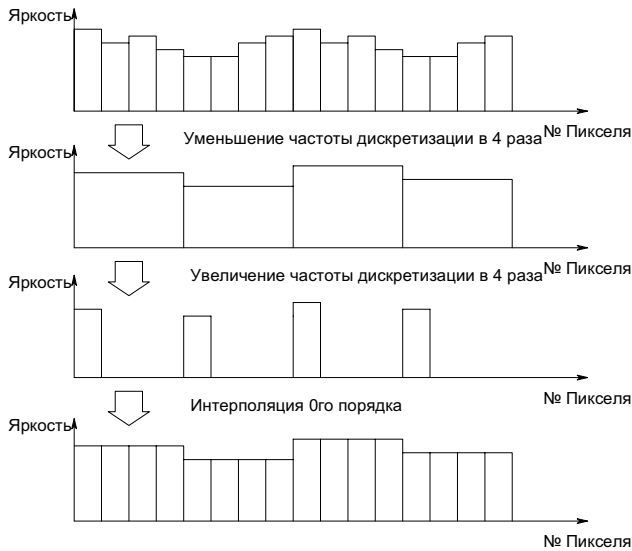


Рис 1. Модель появления блочных искажений в пространственной области.

Хорошо известно, что при увеличении частоты дискретизации сигнала возникает эффект репликации спектра [9]. Нежелательные реплики спектра могут быть подавлены с использованием идеального низкочастотного фильтра. Соответствующая модель блочных искажений в частотной области приведена на рис. 2, где изображен амплитудный спектр сигнала после увеличения частоты дискретизации F_s в 3 раза. Частотные искажения устраняются с использованием идеального фильтра низких частот (ФНЧ).

Процесс интерполяции нулевого порядка в рассматриваемой модели искажений эквивалентен использованию однородного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтр) с передаточной функцией

$$H(z) = \sum_{i=0}^{m-1} z^{-i},$$

где m – коэффициент интерполяции. Амплитудно-частотная характеристика этого фильтра

$$A(w) = \left| H(e^{j2\pi w}) \right| = \frac{\sin(\pi m w)}{\sin(\pi w)},$$

где w – нормализованная частота.

Следует отметить, что интерполятор не является фильтром, поскольку он не инвариантен к сдвигу сигнала: результат интерполяции зависит от опорных точек, которые могут быть выбраны неоднозначным

образом. Тем не менее, в рассмотренной выше схеме прореживания/интерполяции использование интерполятора полностью эквивалентно использованию КИХ фильтра.

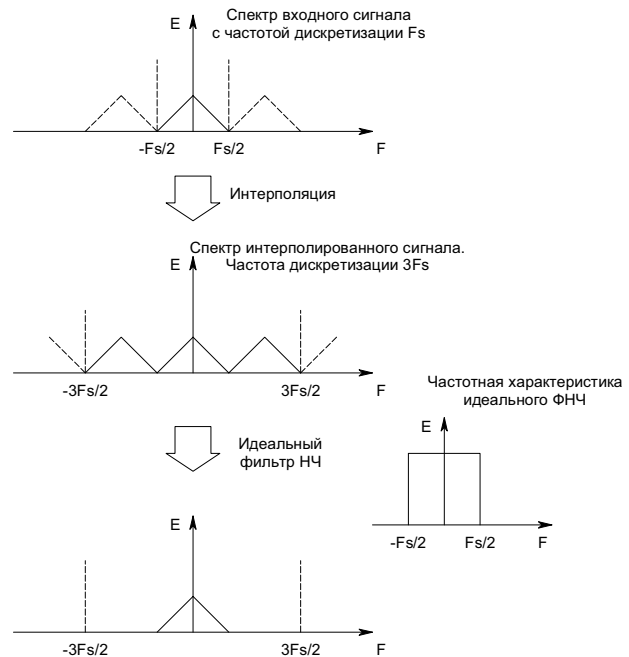


Рис 2. Модель появления блочных искажений в частотной области.

На основе приведенных выше рассуждений было сделано предположение, что степень блочных искажений определяется степенью подавления нежелательных реплик спектра в рассмотренной выше модели. Базовый вариант модели основан на использовании интерполятора нулевого порядка, что соответствует в действительности восстановлению постоянной составляющей при выполнении обратного ДКП. Сам факт наличия блочных искажений позволяет сделать вывод о том, что частотная характеристика интерполятора нулевого порядка не обеспечивает достаточного уровня ослабления высокочастотных компонент, возникающих при увеличении частоты дискретизации сигнала.

Предлагаемая модель объясняет эффективность использования низкочастотных фильтров, которые в рамках этой модели служат для улучшения частотной характеристики интерполятора нулевого порядка. Если придерживаться сделанных ранее допущений, то использование фильтра MPEG-4 при обработке изображения с блочными искажениями эквивалентно последовательному включению интерполятора нулевого порядка и этого фильтра. Суммарная АЧХ последовательного соединения фильтров равна произведению АЧХ фильтров

$$A_{x+y}(w) = A_x(w)A_y(w),$$

где w – нормализованная частота.

Суммарная АЧХ для интерполятора нулевого порядка и фильтра MPEG-4 показана на рис. 3.

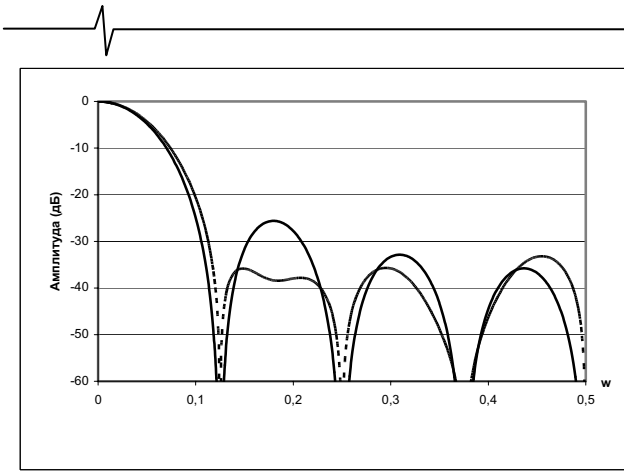


Рис 3. Суммарная АЧХ интерполятора нулевого порядка и фильтра MPEG-4 (пунктир) и АЧХ линейного интерполятора (сплошная)

Известно, что при увеличении частоты дискретизации сигналов альтернативой низкочастотным фильтрам является использование полиномиальной интерполяции. Чем больше порядок интерполирующего полинома, тем больше степень подавления нежелательных реплик спектра. В общем случае при интерполяции требуется рассчитывать значения полинома в каждой интерполируемой точке, что делает эту процедуру сравнимой по вычислительным затратам с фильтрацией. Однако, при использовании интерполяции первого порядка можно уменьшить вычислительные затраты за счет использования ограничений на входные данные и применения специальных методов вычислений.

Использование линейной интерполяции эквивалентно использованию треугольного фильтра с передаточной функцией

$$H(z) = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=0}^{m-1} z^{-i} \right)^2,$$

где m – коэффициент интерполяции.

Амплитудно-частотная характеристика этого фильтра

$$A(w) = \left| H(e^{i2\pi w}) \right| = \frac{1}{m} \left(\frac{\sin(\pi m w)}{\sin(\pi w)} \right)^2,$$

где w – нормализованная частота показана на рис 3.

При этом частотная характеристика интерполятора первого порядка пропорциональна квадрату частоты $\sim 1/f^2$ (рис. 3). Для сравнения, интерполятор нулевого

порядка имеет частотную характеристику обратно пропорциональную частоте: $\sim 1/f$, как показано в работе [9].

В рамках настоящей работы представленная математическая модель позволяет определять достижимые характеристики для того или иного класса алгоритмов устранения искажений. Так, из сравнения АЧХ линейного интерполятора с АЧХ фильтра MPEG-4 (см. рис. 3) видно, что частотные характеристики фильтров близки, хотя уровень подавления нежелательных реплик спектра (и, следовательно, качество обработки) у фильтра MPEG-4 немного лучше. Таким образом, можно сделать вывод, что при реализации алгоритма постобработки на основе линейной интерполяции не следует ожидать качества лучше, чем у алгоритма MPEG-4.

Описанная выше модель искажений является адекватной искажениям только для экстремального случая, встречающегося на практике при максимально возможном сжатии, и не может давать полной характеристики того или иного алгоритма. Основной проблемой при использовании линейной интерполяции является отсутствие инвариантности к сдвигу входных данных, что приводит к потере информации в интерполируемых точках.

Метод устранения блочных искажений, основанный на линейной интерполяции

Для устранения блочных искажений на сжатой видео последовательности предлагается метод, основанный на линейной интерполяции в сочетании с низкочастотной фильтрацией. Метод отличается крайне низкими требованиями к вычислительным ресурсам и при этом не уступает по качеству аналогичному алгоритму стандарта MPEG-4.

Из анализа математической модели искажений видно, что при отсутствии компенсации движения и в предположении, что в блоке ДКП после квантования сохранилась только постоянная составляющая, использование линейного интерполятора должно давать эффект, сходный антиблочному фильтру MPEG-4. Для уменьшения потерь информации, в разработанном методе интерполяция проводится на интервале, вдвое меньше размера блока ДКП (4x4 пикселя). Поскольку при этом эффективность интерполяции снижается, опорные точки интерполяции вычисляются при помощи дополнительных низкочастотных фильтров таким образом, что при соответствии обрабатываемых данных модели искажений, эффективность интерполяции не уменьшается (как показано в левой части рисунка 4).

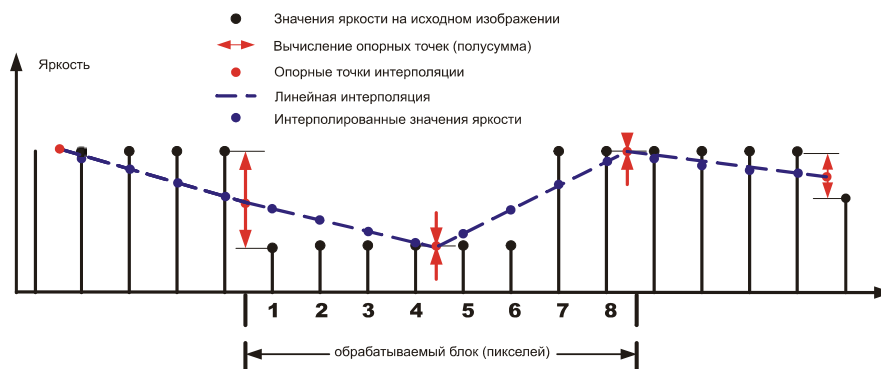


Рис 4. Модификация опорных точек линейной интерполяции.

Алгоритм устранения искажений

Единицей обработки антиблочного фильтра является блок размером 4 x 4 пикселя. Размер блока выбран исходя как из соображений эффективной реализации алгоритма на 32-битных процессорах так и для уменьшения потерь информации при интерполяции. Блоки обрабатываются, начиная с левого верхнего угла изображения в порядке слева - направо, сверху - вниз. Блоки, примыкающие к границам изображения, не обрабатываются. Обработанный блок замещает исходный.

Каждый блок размером 4x4 пикселя анализируется на наличие блочных искажений и обрабатывается в зависимости от результатов классификации. Блок может быть отнесен к одному из следующих классов: неискаженный блок, вертикальный блок (с горизонтальной границей), горизонтальный блок (с вертикальной границей) и блок с наличием как вертикальных, так и горизонтальных искажений.

На рис. 5 показана функциональная схема устройства, реализующего предлагаемый способ, описанный в заявке [10]. Классификатор анализирует блок и выявляет наличие и тип блочных искажений. После низкочастотной фильтрации выполняется интерполяция - обработка поступивших данных.

При наличии блочных искажений участок изображения обрабатывают в зависимости от результата классификации одним из трех интерполяторов: линейным интерполятором по строкам, линейным интерполятором по столбцам, либо билинейным интерполятором, как это показано в работе [11]. При отсутствии блочных искажений в обрабатываемом блоке интерполяция не применяется.

Алгоритмы классификации блоков были выбраны исходя из возможности реализации алгоритмов и на основании результатов измерений их эффективности. Блок классифицируется в результате выполнения следующих проверок: на степень однородности блока, «вертикальность» блока и «горизонтальность» блока.

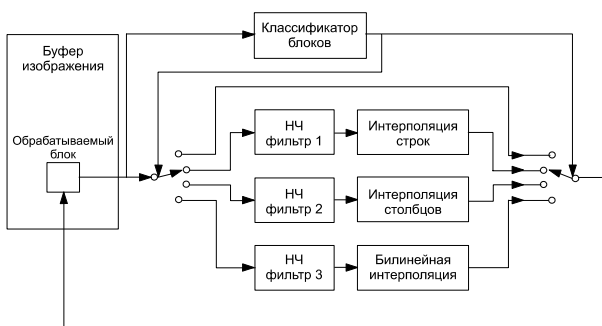


Рис 5. Функциональная схема устройства, реализующего разработанный алгоритм постобработки.

Под однородностью блока в данном случае подразумевается отсутствие значительных перепадов яркости внутри блока. Проверка на однородность требует, чтобы исключить обработку блока, содержащего границы объектов. Для корректной дифференциации границ блоков и границ настоящих объектов исполь-

зуется информация о шаге квантования обрабатываемого блока. При известном шаге квантования можно с достаточной точностью определить причину перепада яркости, т.е. был ли он вызван грубым квантованием (в этом случае значение перепада сравнимо с значением шага квантования) или же он является границей объекта на исходном изображении.

«Вертикальность» либо «горизонтальность» блока подразумевает блочные искажения либо только по столбцам (горизонтальная граница блока), либо только по строкам (вертикальная граница блока). Возможна ситуация когда блок классифицируется одновременно как «горизонтальный» и «вертикальный», например, если перепады яркости в блоке отсутствуют.

Классификация блока производится в соответствии с обозначениями пикселей, приведенных на рис. 6. При этом предполагается что пиксели, обработанные на предыдущем шаге, обозначены индексами $D[x,y]$, где x и y – координаты строки и столбца изображения относительно левого верхнего обрабатываемого блока, а пиксели еще не обработанные, обозначены индексами $S[x,y]$. Кроме того, детектор использует значение шага квантования Q в обрабатываемом блоке, который использовался при квантовании обрабатываемого блока.

	$D[-1,-1]$	$D[-1,0]$			$D[-1,3]$	$D[-1,4]$
$D[0,-1]$	$S[0,0]$	$S[0,1]$	$S[0,2]$	$S[0,3]$	$S[0,4]$	
		$S[1,0]$	$S[1,1]$	$S[1,2]$	$S[1,3]$	
		$S[2,0]$	$S[2,1]$	$S[2,2]$	$S[2,3]$	
$D[3,-1]$	$S[3,0]$	$S[3,1]$	$S[3,2]$	$S[3,3]$	$S[3,4]$	
	$S[4,-1]$	$S[4,0]$			$S[4,3]$	$S[4,4]$

Рис. 6. Обозначение пикселей обрабатываемого блока.

Алгоритм классификации блока и адаптивная схема его обработки заключаются в следующем:

1. Определяется «однородность» блока, блок считается «однородным» если выполнены одновременно два условия

$$|D[-1,-1] - S[4,4]| \leq 2Q \text{ и}$$

$$|D[-1,4] - S[4,-1]| \leq 2Q.$$

Указанные условия означают, что перепад яркости между угловыми точками блока не должен превышать удвоенного значения шага квантования. Если блок не является «однородным», т.е. если хотя бы одно из условий не выполнено, то он не обрабатывается.

2. Выполняется проверка на «вертикальность»: блок считается «вертикальным», если выполняется хотя бы одно из трех условий:

$$S[0,i] = S[1,i] \text{ и } S[1,i] = S[2,i] \text{ для } i \in \{0; 4\};$$

$$S[2,i] = S[3,i] \text{ и } S[3,i] = S[4,i] \text{ для } i \in \{0; 4\};$$

$$S[0,i] = S[1,i] \text{ и } S[2,i] = S[3,i] \text{ для } i \in \{0; 4\}.$$

Иными словами, «вертикальность» означает, что все столбцы блока содержат не более одного перепада яркости, причем перепад находится в одной и той же позиции для всех столбцов.

Следует отметить, что строка блока представляется 32-битным значением, поэтому на 32-битных процессорах проверка каждого условия требует всего двух операций сравнения.

3. Определение «горизонтальности» блока использует ту же проверку, что и для определения его «вертикальности», но выполняемую для строк изображения.

Интерполяция значений пикселей в предлагаемом алгоритме постобработки

«Вертикальный» блок обрабатывается с использованием линейной интерполяции столбцов изображения. В этом случае интерполяция осуществляется при помощи оператора полусуммы

$$ПЛС(a,b) = (a+b+1)/2.$$

Интерполяция осуществляется следующим образом:

$$D[3,i] = ПЛС(S[4,i], S[3,i]);$$

$$D[1,i] = ПЛС(D[-1,i], D[3,i]);$$

$$D[0,i] = ПЛС(D[-1,i], D[1,i]);$$

$$D[2,i] = ПЛС(D[1,i], D[3,i]).$$

Такая операция выгодна с вычислительной точки зрения, так как она может быть реализована путем одновременной обработки всех пикселей строки блока (так называемая векторная операция). Многие современные процессоры имеют соответствующую инструкцию в наборе команд (Intel MMX, TMS320C64). Даже при отсутствии векторных инструкций возможна так называемая псевдовекторная реализация данной операции.

При обработке «горизонтального» блока используется линейная интерполяция по строкам. В этом случае применение векторных операций становится невыгодным (т.к. для этого необходимо транспонировать блок, как перед обработкой, так и после нее). Поэтому для «горизонтального» блока интерполяция определяется следующим образом.

$$D[i,j] = D[i,-1] + ((S[i,4]+S[i,3])/2 - D[i,-1])/4*(j+1),$$

$$i=[0,3]; j=[0,3].$$

При этом правая опорная точка вычисляется как полусумма значений двух пикселей по обеим сторонам границы блока, а в качестве левой опорной точки берется пиксель за границей блока (возможно уже обработанный на предыдущем шаге алгоритма), как показано на рис. 7.

При таком определении интерполяции возможно одновременно вычислять все пиксели строки, используя заранее

вычисленные таблицы и некоторые дополнительные операции для вычисления опорных точек. Схема выполнения линейной интерполяции одной строки показана на рис. 7.

Если блок классифицируется одновременно как «Горизонтальный» и «Вертикальный», то он обрабатывается с использованием билинейной интерполяции. Схема обработки показана на рис. 8.

При обработке блока размером 4 на 4 пикселя (выделен жирными линиями на рис. 8) значения пикселей блока замещаются интерполированными значениями. Пучок стрелок обозначает операцию замещения по строкам и (или) столбцам. При выполнении билинейной интерполяции вычисляются значения интенсивностей в четырех опорных точках. Для этого используются низкочастотные фильтры 1-4, подключенные к входам билинейного интерполятора.

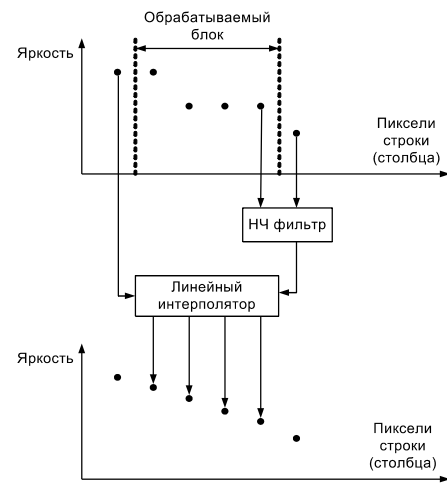


Рис. 7. Схема использования линейной интерполяции для 1 строки блока изображений.

Выбор коэффициентов низкочастотных фильтров для опорных точек билинейной интерполяции осуществлялся экспериментально, на основе многопараметрической оптимизации и измерения качества получаемых изображений при различных вариантах низкочастотных фильтров. Учитывалась необходимость эффективной реализации фильтра, поэтому коэффициенты фильтров определялись степенями 2. Кроме того, из тех же соображений маска фильтра была ограничена размерами 2x2 пикселя. Схема применения билинейной интерполяции представлена на рис. 8 и описана в работах [10] и [11].

Эксперименты показали, что предпочтительно использовать низкочастотные фильтры (НЧ) с коэффициентами, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты фильтров для вычисления опорных точек билинейной интерполяции

Фильтр	Коэффициент левой верхней точки	Коэффициент правой верхней точки	Коэффициент левой нижней точки	Коэффициент правой нижней точки
НЧ фильтр 1	0	0.5	0.5	0
НЧ фильтр 2	0.5	0	0.25	0.25
НЧ фильтр 3	0.5	0.25	0	0.25
НЧ фильтр 4	0.5	0.25	0.25	0

При таком выборе коэффициентов точки, обработанные на предыдущем шаге, имеют большие веса.

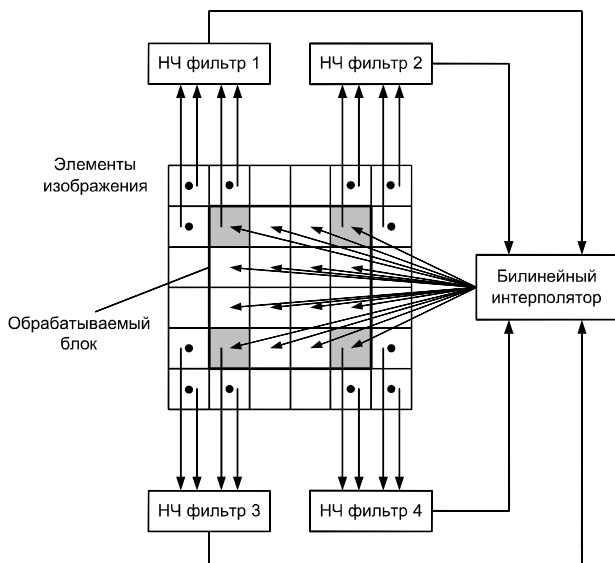


Рис 8. Схема использования билинейной интерполяции для обработки блока изображений с учетом D -окружения (\bullet) опорных S точек (выделены серым цветом).

Сравнительные характеристики разработанного алгоритма

Предлагаемый метод был реализован в виде программного модуля постобработки для MPEG-4 видео декодера. Модуль был оформлен в виде DirectShow фильтра и может быть использован с рядом Windows программ совместимых с DirectShow, например VirtualDUB. Требования к вычислительным

ресурсам оценивались путем измерения скорости работы алгоритма, при этом было установлено, что предлагаемый алгоритм требует 10-20% от ресурсов декодера, в то время как оригинальный алгоритм MPEG-4 превосходит декодер по вычислительной сложности (т.е. требует более 100% от ресурсов декодера).

Эффективность предлагаемого метода оценивалась с использованием следующих объективных характеристик качества изображения, предложенных в работах [10] и разработанного программного обеспечения в работе [11]:

- отношение пикового сигнала к шуму (PSNR);
- степень блочных искажений G_{hv} ;
- характеристика размытости G_{hv}' .

Метрики G_{hv} и G_{hv}' рассчитывались согласно методике, предложенной в работе [12]. Измерения проводились на 35 тестовых последовательностях, а усредненные результаты измерений приведены в Таблице 2.

В целом результаты измерений позволяют сделать вывод о том, что предлагаемый алгоритм сравним по качеству с алгоритмом MPEG-4. Хотя MPEG-4 немного более эффективно устраняет блочные искажения, но эта эффективность достигается за счет расфокусировки изображения и как следствие - размывания мелких деталей на изображении.

Скорость работы алгоритма определялась путем измерения скорости декодирования тестового файла, результаты измерений представлены в Таблице 3. Приведенные данные показывают значительное превосходство разработанного алгоритма по скорости по сравнению с алгоритмом постобработки MPEG-4.

Таблица 2

Качественные характеристики предлагаемого алгоритма в сравнении с алгоритмом постобработки MPEG-4

Характеристика	Предлагаемый метод	MPEG-4	Примечание
$\Delta PSNR$ (dB)	0.130	0.036	Предлагаемый метод лучше чем MPEG-4, но в обоих случаях эффект не очень значительный
ΔG_{hv}	-0.578	-0.752	MPEG-4 более эффективен при устранении блочных искажений
$\Delta G_{hv}'$	-0.111	-0.821	Предлагаемый метод незначительно «размывает» изображение в отличие от MPEG4

Таблица 3

Результаты измерения времени декодирования тестового файла средствами DirectShow

Алгоритм	Значение шага квантования Q	Время декодирования, сек.	Удельное время постобработки
Декодер	2	38	-
Декодер	30	26	-
Декодер и предлагаемый алгоритм	2	42	11%
Декодер и предлагаемый алгоритм	30	30	15%
Декодер и алгоритм MPEG-4	2	67	76%
Декодер и алгоритм MPEG-4	30	55	111%



Заключение

Разработан способ устранения блочных искажений, образующихся в результате сжатия видеоизображений, обеспечивающий качество обработки не уступающее общепринятым методам. Способ основан на линейной (билинейной) интерполяции, что существенно снижает требования к вычислительным затратам при реализации алгоритма. Высокое качество обработки изображения обеспечивается за счет того, что в отличие от известных методов, опорные точки интерполяции вычисляются с использованием дополнительных низкочастотных фильтров.

Предлагаемый способ не уступает аналогичному алгоритму стандарта MPEG-4 по объективным характеристикам качества и на порядок превосходит его по быстродействию. Способ позволяет обрабатывать кадр за один проход (вместо двух в общепринятых схемах) и легко интегрируется в обычно применяемые при сжатии стандарты.

Разработано устройство уменьшения блочных искажений на сжатом изображении, состоящее из классификатора блоков, принимающего решение о типе блочных искажений на обрабатываемом блоке, и интерполяторов, осуществляющих либо линейную интерполяцию по строкам, либо линейную интерполяцию по столбцам, либо билинейную интерполяцию по строкам и столбцам, в зависимости от классификации блочных искажений. Благодаря простоте реализации и возможности интеграции в применяемые при сжатии стандарты, устройство имеет малую стоимость и широкую перспективу использования для улучшения изображений, получаемых по цифровому каналу передачи данных в реальном масштабе времени.

Литература

1. Yuk-Hee Chan, Sung-Wai Hong, Wan-Chi Siu, A practical post-processing technique for real-time block-based coding system. // IEEE trans. on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.8, No.1, Feb 1998, pp.4-8.
2. C. Derviaux, F. X. Coudoux, M. G. Gazalet, P. Corlay and M. Gharbi, A POSTPROCESSING TECHNIQUE FOR BLOCK EFFECT ELIMINATION USING A PERCEPTUAL

DISTORTION MEASURE. // Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Vol. 4, pp 3001-3005.

3. Zixiang Xiong, Michael T. Orchard, Ya-Qin Zhang, A deblocking algorithm for JPEG compressed images using overcomplete wavelet representation. // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 7, pp. 433-437, April 1997.
4. Steven S.O.Choy, Yuk-Hee Chan, Reduction of coding artifacts in transform image coding by using local statistics of transform coefficients. // Proceedings, IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'97), Hong Kong, Jun 9-12, 1997, Vol II, pp.1089-1092.
5. J.Mayer, "Blending Models for Image Enhancement and Coding", Ph.D. Thesis, University of California Santa Cruz. Advisor: Prof. Glen G. Langdon, Ph.D., December 1999
6. Aria Nosratinia, Embedded Post-Processing for Enhancement of Compressed Images. // p. 62, Data Compression Conference (DCC '99), 1999.
7. Stephen A. Martucci, A NEW APPROACH FOR REDUCING BLOCKINESS IN DCT IMAGE CODERS. // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Volume: 5, pp. 2549-2552.
8. Yongyi Yang, Nikolas P. Galatsanos, Removal of compression artifacts using projection onto convex set and line process modeling. // IEEE Trans. on Image Processing, 6(10):1345--1357, Oct. 1997.
9. Л.М.Гольденберг, Б.Д.Матюшкин, М.Н.Поляк. Цифровая обработка сигналов: Справочник // М.: Радио и связь, 1985.
10. Петухов А.С., Свириденко В.А., Жеон Сеун-Хан. Способ уменьшения искажения сжатого видеоизображения и устройство для его реализации. // Заявка на изобретение № 2003114715/09, опубл. БИ и ПМ, №32 (ч.II), 2004, с.329.
11. Петухов А.С. Программное обеспечение для построения сжатых изображений в человеко-машинном интерфейсе // Сб. Трудов 1-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Мехатроника, Автоматизация, Управление», Владимир, 28-30 июня, 2004, с. 305-308.
12. Dwight Melcher, Stephen Wolf. Objective Measures for Detecting Digital Tiling. Committee T1 Contribution T1A1.5/95-104, January 1995.