

УДК 621.391

Н.Н. ПОНОМАРЕНКО¹, В.В. ЛУКИН¹, Е.О. КОЛГАНОВА²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

УСКОРЕНИЕ ПОСТ-ОБРАБОТКИ ПРИ ДЕКОМПРЕССИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрены возможности повышения качества декомпрессированных изображений, сжатых кодеками на основе дискретного косинусного преобразования, путем деблокинга. Для оценки качества использованы как стандартная метрика PSNR, так и метрики, учитывающие аспекты визуального восприятия человеком. Показано, что пост-обработка (деблокинг) может выполняться с использованием ускоренных алгоритмов, в том числе для современных методов сжатия с потерями, выполняющих компрессию в блоках разного и достаточно большого размера. Благодаря этому удастся существенно, в разы и десятки раз, ускорить процедуру деблокинга. Приведены результаты тестирования рассматриваемых методов для стандартных цветных изображений и аэрофотоснимков.

Ключевые слова: сжатие и декомпрессия изображений, пост-обработка, деблокинг, ускорение, анализ эффективности.

Введение

Количество изображений, используемых для различных приложений (в системах мониторинга земной поверхности и дистанционного зондирования (ДЗ), в комплексах слежения и медицинской диагностики, бытовых цифровых фотоаппаратах и т.д.), стремительно возрастает [1, 2]. Одновременно увеличиваются типичные размеры изображений, улучшается разрешающая способность систем формирования изображений. Расширяются и приложения видео, то есть последовательностей изображений [2], все более привычными и доступными становятся мультимедийные и Интернет-технологии.

Получаемые при этом многомерные массивы данных необходимо хранить и/или передавать по линиям и сетям связи, пропускная способность которых, как правило, ограничена. В связи с этим широко используются методы сжатия многомерных данных [3]. Методы сжатия без потерь часто не обеспечивают необходимые значения коэффициента сжатия (КС), которые оказываются лишь немного больше единицы [2, 3]. Поэтому на практике все шире используют методы сжатия с потерями, способные, в принципе, обеспечить значения КС до нескольких десятков. При этом подавляющее большинство современных методов сжатия изображений и видео с потерями, как стандартных [3, 4], так и более эффективных [5, 6], основываются на использовании двумерных и многомерных ортогональных преобразований, прежде всего, вейвлетных и дискретного косинусного преобразования (ДКП). ДКП фактически стало основой стандартов сжатия цветных изображений и видео [1-3] благодаря многим достоинствам, в частности, высокому быстродействию

и хорошей декоррелирующей способности. Именно на основе ДКП созданы методы сжатия изображений в градациях серого (кодеры [6-8]), позволяющие при той же степени сжатия обеспечить более высокое качество сжатых изображений или, что эквивалентно, обеспечить заметно более высокие значения КС при фиксированном качестве в соответствии с заданным критерием [9].

Вместе с тем, для всех методов сжатия на основе ДКП характерны некоторые недостатки, основным из которых является присутствие блочных эффектов (blocking effects или blocking artifacts) [2]. Основными причинами их появления в изображениях и видео после декомпрессии являются выполнение сжатия в блоках (8x8 пикселей для стандартов сжатия, 32x32 пикселя для кодера AGU [6, 7] или блоков различного размера прямоугольной формы для кодера ADCT [8]) и квантование ДКП-коэффициента, соответствующего среднему в блоках. Блочные эффекты заметны на краях блоков, особенно на однородных участках изображений при больших значениях КС. Для блоков, захватывающих резкие перепады, появляются эффекты Гиббса. Блочные эффекты начинают проявляться (визуально) при коэффициентах сжатия порядка 10 для черно-белых изображений и порядка 20...25 для цветных изображений [10].

Поскольку блочные эффекты наблюдаются для изображений, сжатых стандартом JPEG [11], использование которого началось около 20 лет назад, то проблеме устранения блочных эффектов (деблокинга при пост-обработке изображений после декомпрессии) уделялось достаточное внимание [12].

Одна из причин постоянного интереса к мето-

дам устранения блочных эффектов состоит в том, что к методам и алгоритмам устранения блочных эффектов предъявляется достаточно широкий круг часто взаимно противоречащих друг другу требований. Перечислим основные из них [13]:

- они должны эффективно устранять блочные эффекты одновременно с сохранением основных границ и четкости изображения;
- не должны вноситься новые артефакты, в частности, смаз и искажение текстуры;
- должно обеспечиваться приемлемое быстродействие обработки, а часто и возможность внедрения алгоритмов в стандартные устройства декодирования;
- желательно, чтобы методы были применимы при достаточно широких пределах изменения коэффициента сжатия и не предусматривали введение пользователем некоторых эмпирических параметров (порогов) в зависимости от КС.

Постановка задачи исследования

Современные методы деблокинга можно классифицировать на четыре основные категории: фильтрационные [13-20], оценочно-теоретические подходы [21-24], основанные на аппроксимации полиномиальными плоскостями [12, 25, 26], работающие в области ДКП [27].

Для первого класса методов используются как линейные, так и нелинейные фильтры, включая локально адаптивные [17, 18]. Говорить о работоспособности и применимости этих методов сложно, поскольку никакие количественные оценки эффективности деблокинга в работах [17, 18] не приведены. Позднее были разработаны более сложные, но при этом и более разумные подходы к пост-фильтрации, например [10, 28-30]. Было осознано, что применение фильтра к любым типам пикселей, особенно к текстурным участкам, нецелесообразно, поскольку применение любого фильтра приводит в той или иной степени к внесению дополнительных искажений.

В [13] приведены некоторые количественные данные, позволяющие сравнить эффективность (в терминах пикового соотношения сигнал-шум - PSNR) и другие характеристики нескольких известных методов деблокинга. Среди методов, обладающих высоким быстродействием, наилучшие (в целом) результаты обеспечивают методы [14, 18].

Более обширные данные сравнительного анализа эффективности методов деблокинга приведены в работе [28]. Анализ проводится для набора стандартных тестовых изображений в градациях серого для КС порядка 22...53, то есть при существенном проявлении блочных эффектов. Рассматриваются

методы пост-фильтрации, используемые в стандартах H.263, MPEG4, а также предложенные в работах [15], [21] и [31]. Результаты анализа свидетельствуют о том, что в стандартах (H.263, MPEG4) внедрены неплохие методы деблокинга, которые практически всегда улучшают качество изображений в соответствии с критерием PSNR. Методы, основанные на сложной пост-фильтрации [28, 31], как правило, обеспечивают наибольший выигрыш, который, однако, никогда не превышает 1 дБ. Выигрыш, как правило, максимален для достаточно простых по контексту изображений (Lena, Peppers) и меньше для более сложных изображений (Baboon).

Алгоритмы деблокинга, относящиеся ко второй и третьей группам (оценочно-теоретические [21] и основанные на аппроксимации полиномиальными плоскостями [15]), не принадлежат к наилучшим. Более перспективны, разработанные в последние 10-15 лет, методы деблокинга на основе ортогональных преобразований, в частности, ДКП [27, 32-35]. Показано, что при больших степенях сжатия выигрыш, согласно критерия PSNR, может достигать 1,4 дБ при том, что методы [32, 34] обладают достаточно высоким быстродействием.

Одним из их достоинств является то, что при деблокинге используется ДКП, которое одновременно служит основой декомпрессии, благодаря чему имеются возможности повысить быстродействие. Дополнительно быстродействие может быть повышено, если обработка осуществляется с частичным перекрытием блоков или не для всех их возможных положений.

Вместе с тем, большинство методов деблокинга разработано и протестировано для изображений в градациях серого или компоненты Y (интенсивности) цветных изображений применительно к JPEG или JPEG-подобным (работающим в блоках 8x8 пикселей) методам сжатия с потерями. Кроме того, хотя целью деблокинга является повышение визуального качества изображений после декомпрессии, при анализе эффективности по-прежнему широко используется метрика PSNR и визуальный анализ. Метрики визуального качества в последнее время активно применяются при разработке и анализе эффективности методов сжатия изображений [9] и видео [36, 37] в целом, но не для оценки эффективности собственно деблокинга. Одним из немногих исключений является работа [38], где анализ проведен с использованием метрики SSIM [39] и показано, что ее значения благодаря пост-обработке могут возрастать на 0,05...0,07.

Данная статья посвящена анализу эффективности деблокинга при декомпрессии черно-белых и цветных изображений, сжатых современными кодеками на основе ДКП. Специфика анализа состоит в

том, что используются современные метрики, учитывающие особенности визуальной системы человека (так называемые HVS-метрики). Кроме того, рассматриваются возможности ускорения постобработки изображений после декомпрессии за счет применения модификаций метода [27] с учетом степени сжатия и используемых при сжатии шагов квантования.

Рассматриваемые методы и алгоритмы деблокинга

Для проведения сравнительного анализа в данной работе использовались методы сжатия с потерями JPEG (разбиение изображения на одинаковые блоки 8x8 пикселей) и ADCT [8] (разбиение изображения на прямоугольные блоки разного размера). Структурные схемы проведения исследований для этих методов представлены соответственно на рис. 1 и 2.

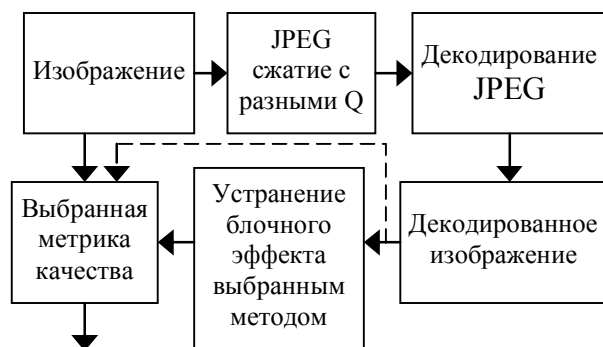


Рис. 1. Структурная схема проведения экспериментов по оцениванию эффективности устранения блочного эффекта на JPEG изображениях

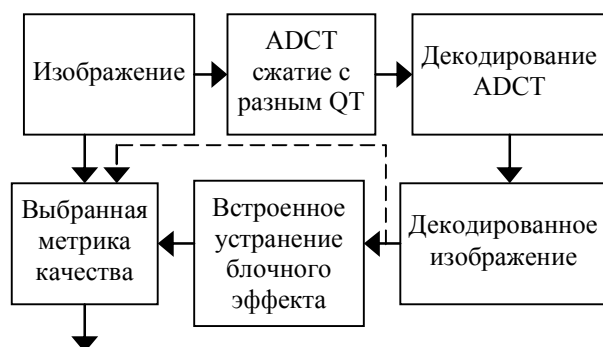


Рис. 2. Структурная схема проведения экспериментов по оцениванию эффективности устранения блочного эффекта для метода сжатия ADCT

Степень сжатия для ADCT (QT) выбиралась таким образом, чтобы обеспечить такую же степень сжатия изображения, как и соответствующее значение Q для JPEG. При кодировании изображений

использовалась версия ADCT, ориентированная на обеспечение максимального визуального качества (с неравномерной таблицей квантования) [9].

В качестве методов устранения блочного эффекта использовались метод, основанный на ДКП с адаптивным изменением формы блоков [32, 40] (SA-DCT) и метод подавления блочного эффекта, используемый в кодере ADCT (DB), а также ускоренные варианты этих двух методов: fast SA-DCT, x4 DB, x7 DB, x64 DB. Здесь обозначения "x4 DB" и "x7 DB" означают модификации метода DB, ускоренные соответственно в 4 и 7 раз за счет использования при фильтрации сдвига положений соседних блоков на число пикселей больше единицы. Для подавления блочного эффекта на основе SA-DCT в данной работе использовался плагин для программы Photoshop [40].

При подавлении блочного эффекта в кодере ADCT используется фильтр на основе ДКП в блоках 8x8 с порогом обнуления коэффициентов, равным половине шага квантования коэффициентов ДКП, заданного при сжатии изображения [6]. При использовании неравномерного квантования данный порог устанавливался индивидуально для каждого коэффициента ДКП в скользящем окне фильтра в соответствии с выражением:

$$T(i, j) = \begin{cases} QS(i, j)/2, & QS(i, j) > QS(1,1) \\ QS(1,1)/2, & QS(i, j) \leq QS(1,1) \end{cases}, \quad (1)$$

где $T(i, j)$ - порог обнуления для коэффициентов ДКП с индексами i, j ; $QS(i, j)$ - шаг квантования для коэффициентов ДКП с индексами i, j ; $i = 1 \dots 8, j = 1 \dots 8$.

Напомним, что ДКП-фильтрация с жестким порогом выполняется с использованием следующих операций. Для каждого блока рассчитываются ДКП-коэффициенты. Затем производят обнуление ДКП-коэффициентов, амплитуда которых не превосходит соответствующий порог, и выполняют обратное ДКП-преобразование. В результате для всех пикселей блока получают фильтрованные значения. Если данный пиксель изображения принадлежит нескольким разным блокам, то отфильтрованные значения усредняются.

В предельном случае (алгоритм DB) используется максимальная степень перекрытия блоков, то есть соседние блоки сдвинуты друг относительно друга всего на один пиксель. Если нужно ускорить фильтрацию, то она осуществляется не для всех возможных положений блоков, а только для тех, индексы m и n которых (координаты левого верхнего угла блока) соответствуют условию:

$$(\text{mod}(m,8) \in U) \wedge (\text{mod}(n,8) \in U), \quad (2)$$

где $\text{mod}(x,8)$ - результат нахождения остатка от деления числа x на 8; U - множество позиций блока,

для которых выполняется фильтрация, $m=0..M-8$; $n=0..N-8$; M, N - размеры изображения.

Для полного перекрытия $U=\{0,1,2,3,4,5,6,7\}$, для алгоритма $x4$ DB $U=\{1,3,5,7\}$, для алгоритма $x7$ DB $U=\{1,4,7\}$, для алгоритма $x64$ DB $U=\{4\}$.

В качестве тестовых изображений использовались четыре аэрофотоснимка в градациях серого (рис. 3) и два тестовых цветных изображения Baboon и Peppers (рис. 4). Для оценивания визуального качества подавления блочных эффектов на изображениях в оттенках серого использовались метрики качества PSNR, MSSIM [39] и PSNR-HVS-M [41]. Метрика PSNR является наиболее широко используемой на практике, а MSSIM и PSNR-HVS-M показывают наибольшие значения корреляции с восприятием человека при оценивании визуального качества результатов сжатия и фильтрации [42].

Для оценивания визуального качества подавления блочных эффектов на цветных изображениях использовались метрики PSNR и PSNR-HMA [43] (метрики MSSIM и PSNR-HVS-M не предназначены для оценивания качества цветных изображений).

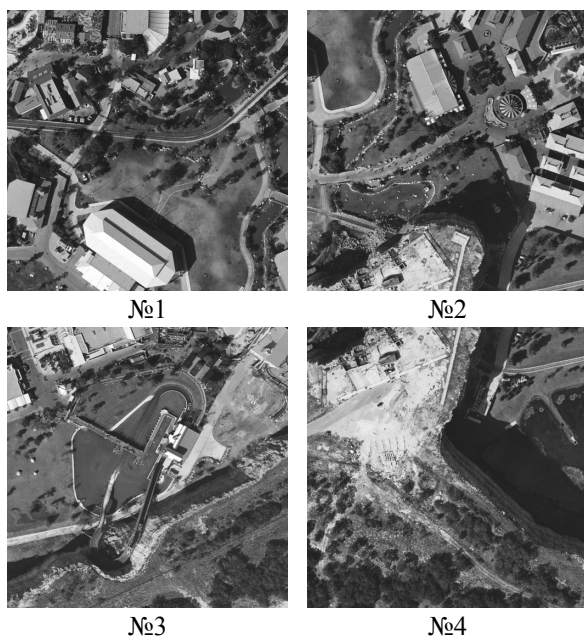


Рис. 3. Тестовые аэрофотоснимки в оттенках серого цвета

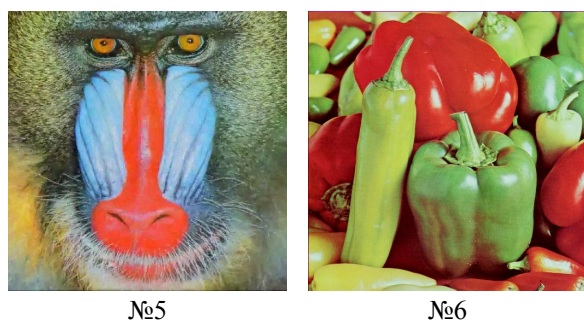


Рис. 4. Стандартные цветные тестовые изображения

Анализ эффективности деблокинга для изображений в оттенках серого цвета

Ниже приведены результаты экспериментов по пост-обработке тестовых аэрофотоснимков, сжатых с потерями методами JPEG и ADCT. При сжатии использовалось шесть градаций уровня качества (Q) для JPEG. Верхний порог для $Q=30$ был выбран таким образом, чтобы искажения от блочного эффекта были визуально заметными.

В таблице 1 приведены значения метрики PSNR для JPEG. Видно, что наилучшие результаты обеспечивает метод SA-DCT, повышая значение PSNR изображения на 0,4..1 дБ. При этом метод DB обеспечивает сравнимые с SA-DCT результаты подавления блочного эффекта (качество изображений ниже всего на 0,05..0,2 дБ), в то же время, являясь более быстрым (приблизительно в 10 раз).

Таблица 1
Деблокинг для JPEG изображений в оттенках серого цвета, PSNR, дБ

JPEG Q	Изобр. №	Без обработки	fast SA-DCT	SA-DCT	x7 DB	x4 DB	DB
30	1	30,54	31,16	31,27	30,80	30,84	31,13
	2	30,15	30,69	30,80	30,40	30,44	30,72
	3	30,13	30,58	30,67	30,42	30,46	30,67
	4	30,30	30,66	30,73	30,38	30,42	30,74
25	1	30,00	30,63	30,75	30,28	30,33	30,59
	2	29,62	30,18	30,28	29,86	29,90	30,17
	3	29,60	30,07	30,16	29,89	29,94	30,14
	4	29,81	30,20	30,28	29,91	29,95	30,25
20	1	29,35	30,03	30,16	29,67	29,72	29,97
	2	28,99	29,60	29,72	29,27	29,33	29,57
	3	28,96	29,47	29,57	29,25	29,31	29,49
	4	29,20	29,63	29,71	29,35	29,38	29,67
15	1	28,52	29,25	29,41	28,89	28,94	29,17
	2	28,17	28,84	29,00	28,51	28,57	28,80
	3	28,13	28,69	28,80	28,49	28,54	28,72
	4	28,42	28,90	28,99	28,64	28,68	28,94
10	1	27,27	28,10	28,28	27,76	27,81	28,02
	2	26,92	27,65	27,82	27,37	27,42	27,63
	3	26,91	27,55	27,67	27,36	27,41	27,58
	4	27,25	27,80	27,89	27,59	27,63	27,85
5	1	24,92	25,71	25,87	25,63	25,69	25,85
	2	24,60	25,45	25,62	25,24	25,30	25,46
	3	24,66	25,49	25,61	25,34	25,39	25,52
	4	25,04	25,75	25,82	25,58	25,62	25,79

В таблице 2 приведены оценки визуального качества этих же изображений с помощью метрики MSSIM. Для данных таблицы 2 наблюдаются те же тенденции, что и для данных таблицы 1, за тем исключением, что метод DB в ряде случаев обеспечивает даже лучшие результаты, чем метод SA-DCT. Отметим также, что согласно значениям метрик PSNR и MSSIM, использование быстрого деблокинга всегда приводит к повышению качества изобра-

жений, хотя положительный эффект при этом меньше.

Таблица 2
Деблокинг для JPEG изображений
в оттенках серого цвета, MSSIM

JPEG Q	Изобр. №	Без обработки	fast SA-DCT	SA-DCT	x7 DB	x4 DB	DB
30	1	0,9848	0,9860	0,9863	0,9859	0,9861	0,9864
	2	0,9845	0,9859	0,9861	0,9857	0,9859	0,9862
	3	0,9816	0,9821	0,9823	0,9822	0,9824	0,9828
	4	0,9817	0,9818	0,9820	0,9823	0,9825	0,9829
25	1	0,9818	0,9833	0,9836	0,9830	0,9832	0,9836
	2	0,9816	0,9832	0,9835	0,9829	0,9831	0,9835
	3	0,9780	0,9787	0,9791	0,9787	0,9789	0,9794
	4	0,9781	0,9786	0,9789	0,9788	0,9790	0,9795
20	1	0,9773	0,9793	0,9797	0,9789	0,9792	0,9797
	2	0,9770	0,9790	0,9794	0,9787	0,9790	0,9795
	3	0,9724	0,9734	0,9737	0,9733	0,9735	0,9742
	4	0,9721	0,9730	0,9733	0,9731	0,9733	0,9740
15	1	0,9699	0,9727	0,9731	0,9720	0,9724	0,9731
	2	0,9697	0,9724	0,9729	0,9721	0,9725	0,9731
	3	0,9632	0,9646	0,9651	0,9645	0,9649	0,9659
	4	0,9630	0,9636	0,9640	0,9641	0,9644	0,9653
10	1	0,9541	0,9592	0,9599	0,9580	0,9586	0,9594
	2	0,9538	0,9582	0,9588	0,9577	0,9581	0,9591
	3	0,9444	0,9473	0,9478	0,9464	0,9470	0,9483
	4	0,9439	0,9448	0,9452	0,9458	0,9462	0,9475
5	1	0,9082	0,9193	0,9205	0,9160	0,9173	0,9188
	2	0,9053	0,9163	0,9175	0,9133	0,9147	0,9162
	3	0,8872	0,8964	0,8971	0,8931	0,8941	0,8959
	4	0,8795	0,8871	0,8876	0,8853	0,8864	0,8880

Таблица 3
Деблокинг для JPEG изображений
в оттенках серого цвета, PSNR-HVS-M, дБ

JPEG Q	Изобр. №	Без обработки	fast SA-DCT	SA-DCT	x7 DB	x4 DB	DB
30	1	39,88	39,78	39,87	37,17	37,20	39,84
	2	40,06	39,99	40,13	37,20	37,21	39,99
	3	39,71	39,39	39,48	37,73	37,75	39,47
	4	39,76	39,35	39,45	36,21	36,22	39,59
25	1	38,00	38,17	38,28	36,08	36,10	38,13
	2	38,18	38,37	38,50	36,07	36,10	38,25
	3	37,78	37,84	37,94	36,38	36,42	37,73
	4	37,88	37,82	37,92	35,23	35,26	37,83
20	1	35,67	36,21	36,29	34,56	34,60	36,08
	2	35,90	36,24	36,32	34,53	34,58	36,13
	3	35,35	35,64	35,72	34,55	34,60	35,53
	4	35,54	35,73	35,80	33,80	33,82	35,69
15	1	32,88	33,62	33,69	32,45	32,51	33,48
	2	33,04	33,64	33,74	32,46	32,52	33,56
	3	32,48	33,07	33,14	32,24	32,31	32,99
	4	32,67	33,05	33,12	31,92	31,95	33,17
10	1	29,05	30,19	30,29	29,37	29,46	30,03
	2	29,13	30,05	30,15	29,30	29,36	30,00
	3	28,74	29,70	29,77	29,10	29,15	29,62
	4	28,91	29,65	29,72	29,05	29,10	29,78
5	1	23,38	24,71	24,87	24,48	24,55	24,82
	2	23,29	24,66	24,78	24,27	24,34	24,63
	3	23,18	24,56	24,65	24,26	24,32	24,54
	4	23,37	24,55	24,61	24,26	24,30	24,59

И, наконец, в таблице 3 приведены оценки визуального качества этих же изображений с помощью метрики PSNR-HVS-M.

Отметим, что наилучшим методом в соответствии с метрикой PSNR-HVS-M также является SA-DCT, который для Q=5...10 обеспечивает повышение качества изображений на 0,7...1,5 дБ. Метод DB обеспечивает сравнимые результаты (на 0,02-0,25 дБ хуже). В то же время анализ данных таблицы 3 позволяет сделать несколько важных выводов.

Во-первых, для качества JPEG Q=30 ни один из анализируемых методов деблокинга не обеспечивает повышения визуального качества изображений, а, значит, применение деблокинга при качестве JPEG Q=30 и выше не является оправданным. Во-вторых, применение быстрых методов деблокинга (в частности, x7 DB и x4 DB) являются оправданными только при большом блочном эффекте (Q≤10).

В-третьих, выводы, которые можно сделать на основании значений метрик MSSIM и PSNR-HVS-M, заметно отличаются. Это свидетельствует о несовершенстве одной или обеих используемых метрик и необходимости их доработки.

В таблице 4 приведены значения метрики PSNR для анализа метода ADCT.

Таблица 4
Деблокинг для изображений в оттенках серого цвета, сжатых методом ADCT, PSNR, дБ

ADCT QF	Изобр. №	Без обработки	x64 DB	DB
30	1	31,81	31,81	32,23
	2	31,39	31,38	31,81
	3	31,39	31,35	31,74
	4	31,44	31,37	31,68
25	1	31,27	31,28	31,68
	2	30,86	30,85	31,27
	3	30,87	30,84	31,20
	4	30,97	30,89	31,20
20	1	30,73	30,74	31,12
	2	30,31	30,32	30,70
	3	30,32	30,29	30,65
	4	30,47	30,40	30,68
15	1	30,03	30,05	30,39
	2	29,62	29,63	30,00
	3	29,60	29,57	29,90
	4	29,84	29,77	30,05
10	1	29,01	29,03	29,39
	2	28,63	28,66	29,02
	3	28,58	28,57	28,89
	4	28,95	28,91	29,20
5	1	27,50	27,56	27,94
	2	27,02	27,08	27,44
	3	27,11	27,10	27,44
	4	27,62	27,61	27,88

Согласно метрике PSNR ускоренный деблокинг не улучшает качество изображений, в то время как полный деблокинг обеспечивает его несущественное повышение (на 0,2...0,4 дБ).

В таблице 5 приведены результаты оценивания визуального качества этих же изображений с помощью метрики MSSIM. Согласно данным в этой таблице качество в результате стандартного варианта деблокинга изображений возрастает на 0,001-0,004 (незначительно), а применение ускоренного деблокинга не приводит к улучшению визуального качества изображений.

Таблица 5

Деблокинг для изображений в оттенках серого цвета, сжатых методом ADCT, MSSIM

ADCT QF	Изобр. №	Без обработки	x64 DB	DB
30	1	0,9896	0,9896	0,9905
	2	0,9895	0,9895	0,9905
	3	0,9875	0,9874	0,9882
	4	0,9875	0,9874	0,9882
25	1	0,9875	0,9876	0,9886
	2	0,9874	0,9875	0,9886
	3	0,9850	0,9849	0,9859
	4	0,9851	0,9850	0,9859
20	1	0,9850	0,9851	0,9863
	2	0,9848	0,9849	0,9863
	3	0,9820	0,9818	0,9829
	4	0,9820	0,9818	0,9828
15	1	0,9809	0,9810	0,9825
	2	0,9808	0,9808	0,9825
	3	0,9768	0,9766	0,9780
	4	0,9768	0,9767	0,9779
10	1	0,9724	0,9725	0,9747
	2	0,9723	0,9726	0,9748
	3	0,9661	0,9660	0,9680
	4	0,9678	0,9676	0,9692
5	1	0,9539	0,9542	0,9580
	2	0,9523	0,9526	0,9564
	3	0,9424	0,9421	0,9452
	4	0,9465	0,9458	0,9481

В таблице 6 приведены результаты оценивания визуального качества тестовых аэрофотоснимков с помощью метрики PSNR-HVS-M.

Из данных таблицы 6 видно, что стандартный деблокинг DB для QF=5..15 увеличивает визуальное качество на 0,2...0,6 дБ. В то же время для QF=25...30 увеличение качества является несущественным, что делает неоправданным применение деблокинга в этих ситуациях. Использование быстрого деблокинга в большинстве ситуаций не приводит к увеличению визуального качества изображения или увеличивает его незначительно (меньше, чем на 0,2 дБ).

Проверим, так ли это. На рис. 5 приведен фрагмент изображения с блочным эффектом и результаты использования для него разных методов деблокинга.

Видно, что все методы (в том числе и быстрые варианты) хорошо устранили блочный эффект. Изображения, полученные путем быстрого деблокинга (рис. 5 д и рис. 5 з), выглядят визуально качественнее,

чем соответствующие изображения с блочным эффектом (рис. 5 б и 5 е). Наблюдаемая существенная разница в визуальном качестве не соответствует количественным показателям качества, вычисленным с помощью метрик PSNR, MSSIM, PSNR-HVS-M. Возможно, это связано с недооцениванием метриками вклада блочных артефактов в интегральное визуальное качество изображения, что приводит к формированию завышенных оценок визуального качества для изображений с блочным эффектом. Закономерности, наблюдаемые на рис. 5, являются справедливыми и для других тестовых изображений (привести здесь несколько примеров не представляется возможным из-за ограниченного размера публикации).

Изображения, для которых выполнена процедура деблокинга DB, визуально выглядят несколько лучше, чем изображения после быстрого деблокинга. И в данном случае метрики достаточно адекватно оценивают эту разницу. Отметим также, что сжатые изображения на рис. 5 б (сжатие JPEG) и 5 е (сжатие ADCT) занимают на диске одинаковое количество памяти, в то время как визуально изображение на рис. 5 е выглядит намного качественнее.

На рис. 6, 7 и 8 приведены усредненные (по всем 4-м тестовым изображениям) графики, позволяющие сравнить эффективность сжатия и деблокинга для кодеров JPEG и ADCT с помощью метрик PSNR, MSSIM и PSNR-HVS-M.

Таблица 6

Деблокинг для изображений в оттенках серого цвета, сжатых методом ADCT, PSNR-HVS-M, дБ

ADCT QF	Изобр. №	Без обработки	x64 DB	DB
30	1	42,92	42,72	42,95
	2	43,03	42,82	43,07
	3	42,39	42,19	42,40
	4	42,25	42,12	42,30
25	1	41,09	40,96	41,19
	2	41,22	41,06	41,30
	3	40,59	40,46	40,68
	4	40,55	40,41	40,64
20	1	39,23	39,09	39,36
	2	39,31	39,17	39,42
	3	38,73	38,61	38,87
	4	38,76	38,67	38,88
15	1	36,80	36,79	37,08
	2	36,92	36,87	37,16
	3	36,27	36,24	36,53
	4	36,35	36,35	36,62
10	1	33,34	33,46	33,83
	2	33,45	33,52	33,89
	3	32,81	32,89	33,23
	4	33,32	33,41	33,73
5	1	28,88	29,16	29,62
	2	28,62	28,86	29,27
	3	28,47	28,66	29,03
	4	29,19	29,33	29,67

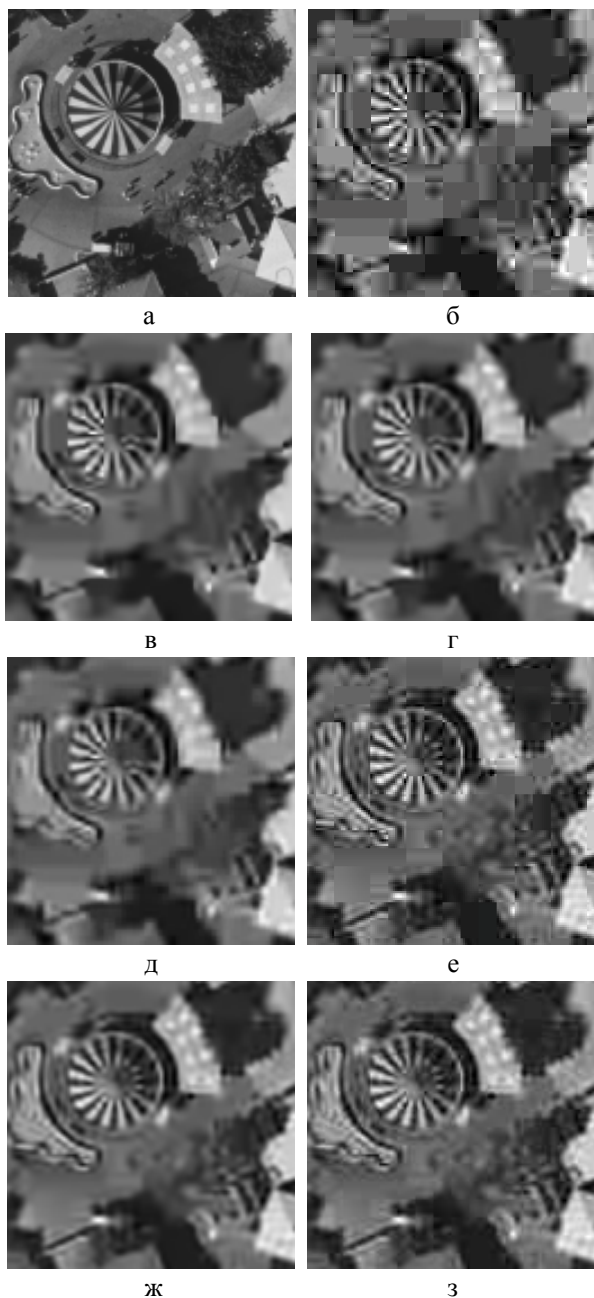


Рис. 5. Увеличенный фрагмент изображения №2: а - эталонное изображение; б - сжатие JPEG, $Q=5$; в - SA-DCT для изображения б; г - DB для изображения б; д - x7 DB для изображения б; е - сжатие ADCT, $QF=5$; ж - DB для изображения е; з - x64 DB для изображения е

Из приведенных графиков видно, что ADCT в соответствии со всеми метриками обеспечивает более высокое качество сжатых изображений (на 3...4 дБ по метрике PSNR-HVS-M на всем рассматриваемом диапазоне bpp).

Также можно отметить практически линейный вид зависимости для метрики PSNR-HVS-M, в то время как для метрики MSSIM зависимости носят явно нелинейный характер.

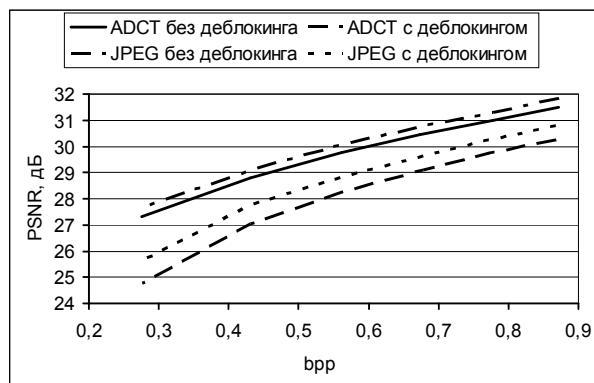


Рис. 6. Зависимость PSNR от bpp для анализируемых методов

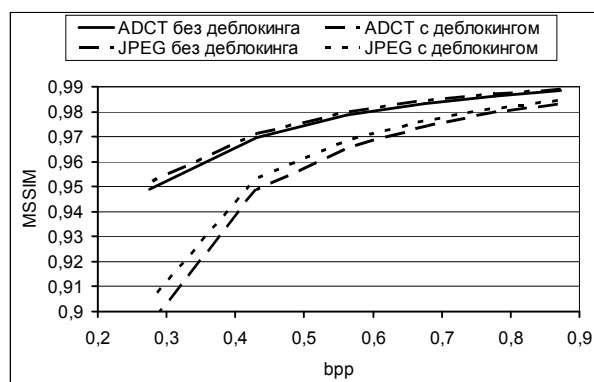


Рис. 7. Зависимость MSSIM от bpp для анализируемых методов

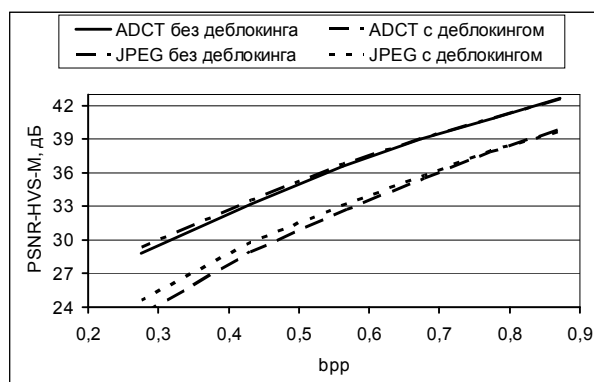


Рис. 8. Зависимость PSNR-HVS-M от bpp для анализируемых методов

Анализ эффективности деблокинга для цветных изображений

При сжатии цветных изображений (№5 и №6) использовалась та же методика проведения экспериментов, как и при сжатии изображений в оттенках серого цвета. В таблице 7 приведены значения метрики PSNR для постобработки JPEG-изображений.

Видно, что наблюдаются те же тенденции, как и для черно-белых изображений, однако выигрыш

от деблокинга для цветных изображений оказывается более высоким (0,3...1 дБ).

печивает улучшение визуального качества изображений в соответствии с метрикой PSNR-HMA.

Таблица 7
Деблокинг цветных JPEG изображений, PSNR, дБ

JPEG Q	Изобр. №	Без обработки	fast SA-DCT	SA-DCT	x7 DB	x4 DB	DB
30	5	28,96	29,28	29,39	28,11	28,07	29,29
	6	28,40	28,47	28,56	26,40	26,42	28,76
25	5	28,42	28,81	28,91	27,68	27,64	28,79
	6	28,04	28,11	28,19	26,22	26,25	28,46
20	5	27,74	28,19	28,30	27,18	27,15	28,16
	6	27,57	27,82	27,96	25,97	26,01	28,08
15	5	26,85	27,39	27,49	26,50	26,48	27,35
	6	26,88	27,50	27,67	25,72	25,77	27,50
10	5	25,49	26,17	26,26	25,40	25,41	26,13
	6	25,77	26,55	26,70	25,07	25,14	26,57
5	5	22,77	23,54	23,63	23,13	23,16	23,59
	6	23,14	24,21	24,34	23,37	23,46	24,20

В таблице 8 для этих же изображений приведены значения метрики PSNR-HMA (модификация метрики PSNR-HVS-M для корректного учета искажений яркости, контраста и неодинаковой чувствительности системы визуального восприятия человека к искажениям в яркостной и цветовых составляющих).

Таблица 8
Деблокинг цветных JPEG изображений, PSNR-HMA, дБ

JPEG Q	Изобр. №	Без обработки	fast SA-DCT	SA-DCT	x7 DB	x4 DB	DB
30	5	34,92	35,37	35,60	31,38	31,39	35,33
	6	31,45	31,62	31,77	27,79	27,80	31,87
25	5	33,92	34,49	34,72	30,94	30,96	34,40
	6	30,83	30,99	31,13	27,59	27,61	31,32
20	5	32,54	33,21	33,42	30,27	30,30	33,09
	6	30,05	30,45	30,66	27,27	27,31	30,65
15	5	30,72	31,47	31,63	29,27	29,31	31,39
	6	28,94	29,75	29,99	26,99	27,04	29,69
10	5	28,04	28,95	29,09	27,46	27,52	28,89
	6	27,21	28,23	28,42	26,12	26,17	28,20
5	5	23,63	24,55	24,66	23,94	23,98	24,58
	6	23,81	25,04	25,15	24,12	24,19	25,03

Также подтверждаются тенденции, наблюдаемые ранее для изображений в оттенках серого цвета. На рис. 9 приведен фрагмент изображения №6 до и после быстрого деблокинга.

Хорошо видно, что визуальное качество изображения существенно увеличилось, хотя значение метрики PSNR-HVS-M увеличилось лишь на 0,3 дБ.

В таблицах 9 и 10 приведены результаты аналогичного анализа эффективности деблокинга для цветных изображений при их сжатии ADCT. Наблюдаются те же тенденции, как и для сжатия JPEG. Однако для метода ADCT оказывается, что быстрый деблокинг во всех рассмотренных ситуациях обес-

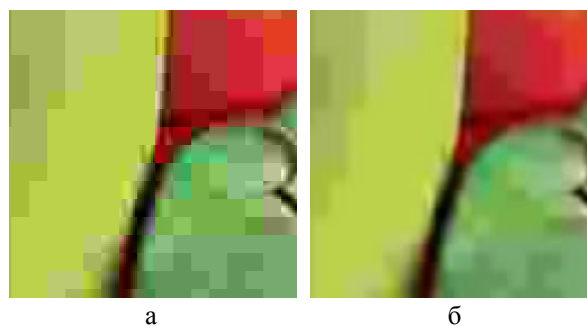


Рис. 9. Фрагмент: а - изображения №6, сжатого JPEG; б - результат пост-обработки методом x7 DB

Также интересным является тот факт, что для текстурных изображений (изображение №5) деблокинг оказывается менее эффективным, чем для изображений с большим количеством гладких участков (изображение №6), обеспечивая увеличение значений метрики PSNR-HMA, меньшее на 0,4...0,7 дБ.

Таблица 9
Деблокинг цветных ADCT изображений, PSNR, дБ

ADCT QF	Изобр. №	Без обработки	x64 DB	DB
30	5	29,98	29,94	30,17
	6	31,05	31,12	31,55
25	5	29,65	29,61	29,83
	6	30,74	30,82	31,27
20	5	29,18	29,13	29,36
	6	30,44	30,54	31,01
15	5	28,51	28,47	28,70
	6	29,89	30,00	30,54
10	5	27,68	27,65	27,91
	6	29,28	29,42	29,97
5	5	26,28	26,25	26,52
	6	28,10	28,25	28,91

Таблица 10
Деблокинг цветных ADCT изображений, PSNR-HMA, дБ

ADCT QF	Изобр. №	Без обработки	x64 DB	DB
30	5	38,85	38,86	39,12
	6	36,85	37,09	37,60
25	5	37,85	37,89	38,17
	6	35,98	36,25	36,78
20	5	36,46	36,51	36,79
	6	35,20	35,50	36,05
15	5	34,57	34,65	34,94
	6	33,90	34,23	34,83
10	5	32,34	32,41	32,74
	6	32,50	32,89	33,48
5	5	29,01	29,09	29,39
	6	30,14	30,56	31,22

На рис. 10 и 11 приведены интегральные графики, позволяющие сравнить эффективность сжатия

и деблокинга цветных изображений для методов JPEG и ADCT с помощью метрик PSNR и PSNR-HMA.

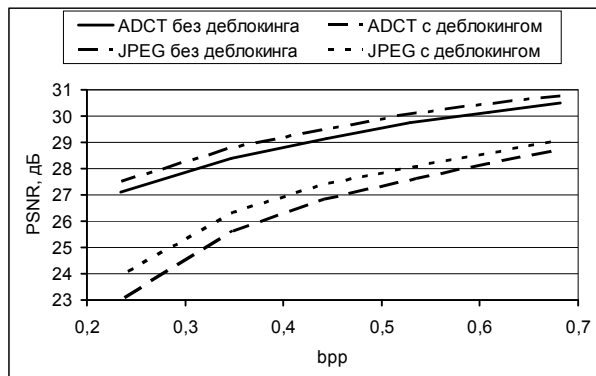


Рис. 10. Зависимость PSNR от bpp для анализируемых методов

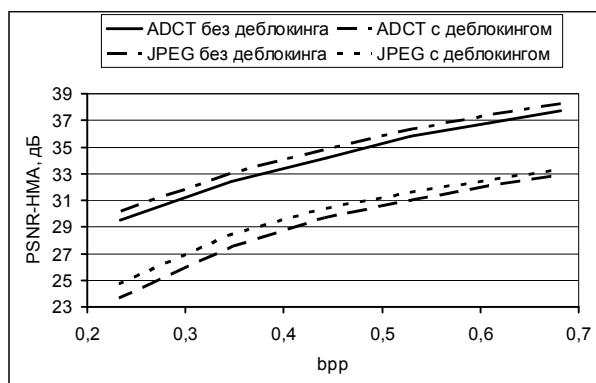


Рис. 11. Зависимость PSNR-HMA от bpp для анализируемых методов

Видно, что согласно метрике PSNR-HMA метод ADCT обеспечивает до 2-х раз большую степень сжатия изображений, чем JPEG, при обеспечении такого же визуального качества.

Заключение

Согласно результатам проведенного исследования показано, что деблокинг способен приводить к существенному повышению визуального качества изображений сжатых с потерями. При этом, применение деблокинга является целесообразным при значениях bpp, меньших 0,6.

Показано также, что наиболее эффективные из известных метрик визуального качества изображений, метрики MSSIM, PSNR-HVS, PSNR-HMA, для задачи оценивания качества изображений, искаженных блочным эффектом, не обеспечивают удовлетворительного соответствия восприятию человека и нуждаются в доработке.

Литература

- Hoffman, R. *Interpreting Remote Sensing Imagery: Human Factors [Text]* / R. Hoffman, A. Markman. - CRC Press, LLC. - 2001. - 424 p.
- Bovik, A. *Handbook of Image and Video Processing [Text]* / A. Bovik. - Academic Press. - USA, 2000. - 1429 p.
- Чобану, М.К. *Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. [Текст]* / М.К. Чобану. - М.: Техносфера, 2009. - 480 с.
- Said, A. *A new fast and efficient image codec based on the partitioning in hierarchical trees [Text]* / A. Said, W. Pearlman // *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technology*. - 1996. - Vol. 6. - P. 243-250.
- Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений [Текст] / С.С. Кривенко, В.В. Лукин, М.С. Зряхов, А.А. Зеленский // *Радиотехника*. - 2009. - Том 159. - С. 248-254.
- DCT Based High Quality Image Compression [Text] / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Proc. of 14th Scandinavian Conference on Image Analysis*. - Finland, June 2005. - P. 1177-1185.
- AGU - DCT Based High Quality Image Compression [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ponomarenko.info/agu.htm> - 14.11.2012 г.
- ADCT: A new high quality DCT based coder for lossy image compression [Электронный ресурс] / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *CD ROM Proceedings of LNLA*. - Switzerland, 2008. - 6 p. - Режим доступа: <http://eurasip.org/Proceedings/Ext/LNLA2008/contents.html> - 14.11.2012 г.
- Performance Analysis of Visually Lossless Image Compression [Text] / N. Ponomarenko, A. Zemlyachenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of VPQM*. - Scottsdale, USA, Jan. 2012. - 6 p.
- Kundu, A. *Enhancement of JPEG coded images by adaptive spatial filtering [Text]* / A. Kundu // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. - Vol. 1. - 1995. - P. 187-190.
- Pennebaker, W.B. *JPEG-still Image Data Compression Standard [Text]* / W.B. Pennebaker, J.L. Mitchell, Eds. - New York: Van Nostrand Reinhold. - 1992. - 650 p.
- Kieu, T. *Surface fitting approach for reducing blocking artifacts in low bit rate DCT decoded images [Text]* / T. Kieu, D.T. Nguyen // *IEEE Catalogue No 01 CH37239*. - 2001. - P. 23-27.
- Meier, T. *Reduction of blocking artifacts in image and video coding [Text]* / T. Meier, K.N. Ngan, G. Grebbin // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1999. - Vol. 9(3). - P. 490-500.
- Reeve, H.C. *Reduction of blocking effects in image coding [Text]* / H.C. Reeve, J.S. Lim // *Optical Engineering*. - 1984. - Vol. 23(1). - P. 34-37.
- Zakhor, A. *Iterative procedures for reduction effects in transform image coding [Text]* / A. Zakhor // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1992. - Vol. 2(3). - P. 91-95.

16. Rabiee, H.R. Image deblocking with Wavelet based multiresolution analysis and spatially variant OS filters [Text] / H.R. Rabiee, R.L. Kashyap // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. - Vol. 1. - 1997. - P. 318-321.
17. Jarske, T. Post-filtering methods for reducing blocking effects from coded images [Text] / T. Jarske, P. Haavisto, I. Defee // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. - 1994. - Vol. 40(3). - P. 521-526.
18. Hsu, Y.F. A new adaptive separable filter for removing blocking effects [Text] / Y.F. Hsu, Y.C. Chen // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. - 1993. - Vol. 39(3). - P. 510-513.
19. Copinath, R.A. Wavelet based post-processing of low bit rate transform coded images [Text] / R.A. Copinath et al. // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. - Vol. 2. - 1994. - P. 913-917.
20. Liu, T.S. Adaptive post-processing algorithms for low bit rate video signals [Text] / T.S. Liu, N.S. Jayant // *Proceedings of ICASSP*. - Adelaide, Australia, 1994. - P. V-401 – V-404.
21. Yang, Y. Regularized reconstruction to reduce blocking artifacts of block discrete cosine transform compressed images [Text] / Y. Yang, N.P. Galatsanos, A.K. Katsaggelos // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1993. - Vol. 3(6). - P. 421-432.
22. Yang, Y. Projection based spatially adaptive reconstruction of block transform decoded images [Text] / Y. Yang, N.P. Galatsanos, A.K. Katsaggelos // *IEEE Transactions on Image Processing*. - 1995. - Vol. 4. - P. 896-908.
23. O'Rourke, T.P. Improved image decompression for reduced transform coding artifacts [Text] / T.P. O'Rourke, R.L. Stevenson // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1995. - Vol. 5. - P. 490-499.
24. Minami, S. An optimization approach for removing block effects in transform coding [Text] / S. Minami, A. Zakhor // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1995. - Vol. 5(2). - P. 74-82.
25. Niss, B. Prediction of AC coefficients from DC values [Text] / B. Niss // *ISO/IEC JTC1/SC2/WG8 N745*. - May 1988.
26. Lakhani, G. Improved equations for JPEG's blocking artifact reduction approach [Text] / G. Lakhani // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1997. - Vol. 7(6). - P. 930-934.
27. Removal of blocking and ringing artifacts using transform domain denoising [Text] / K. Egiazarian, M. Helsingius, P. Kuosmanen, J. Astola // *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. - Vol. 4. - Jun. 1999. - P. 139-142.
28. Chen, T. Adaptive postfiltering of transform coefficients for the reduction of blocking artifacts [Text] / T. Chen, H.R. Wu, B. Qiu // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 2001. - Vol. 11(5). - P. 594-602.
29. Kuo, C.J. Adaptive post-processor for block encoded images [Text] / C.J. Kuo, R.J. Hsieh // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1995. - Vol. 5. - P. 298-304.
30. Artifact reduction in low bit rate DCT-based image compression [Text] / J. Luo, C.W. Chen, K.J. Parker, T.S. Huang // *IEEE Transactions on Image Processing*. - 1996. - Vol. 5. - P. 1363-1368.
31. Paek, H. On the POCS-based post-processing technique to reduce the blocking artifacts in transform coded images [Text] / H. Paek, R.C. Kim, S.U. Lee // *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. - 1998. - Vol. 8. - P. 358-367.
32. Foi, A. Pointwise Shape-Adaptive DCT for High-Quality Denoising and Deblocking of Grayscale and Color Images [Text] / A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian // *IEEE Transactions on Image Processing*. - 2007. - Vol. 16(5). - P. 1396-1411.
33. Wang, C-Y. Deblocking of Compressed Images Based on All Phase Biorthogonal Transform Using Noise Injection Followed by Image Denoising [Text] / C-Y. Wang, Z-X. Hou, S-Y. Zhao // *Proceedings of ICSP*. - 2008. - P. 1161-1164.
34. Efficient image deblocking based on postfiltering in shifted windows [Text] / G. Zhai, W. Zhang, X. Yang, W. Lin, Y. Xu // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. - 2008. - Vol. 18(1). - P. 122-126.
35. Zhang, R. Image deblocking using dual adaptive FIR Wiener filter in the DCT transform domain [Text] / R. Zhang, W. Ouyang, W-K. Cham // *Proceedings of ICASSP*. - 19-24 April, 2009. - P. 1181-1184.
36. You, J. Attention modeling for video quality assessment [Text] / J. You, J. Korhonen, A. Perkis // *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. - 19-23 July, 2010. - P. 914-919.
37. Xvid 1.3.0-rc1 available [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [http://xvid.org/News.64.0.html?&cHash=b71c9d3dabfaff6f77dcf6790bec6af0&tx_ttnews\[backPid\]=64&tx_ttnews\[tt_news\]=8](http://xvid.org/News.64.0.html?&cHash=b71c9d3dabfaff6f77dcf6790bec6af0&tx_ttnews[backPid]=64&tx_ttnews[tt_news]=8). - 14.11.2012 г.
38. Efficient Quadtree Based Block-shift Filtering for Deblocking and Deringing [Text] / G. Zhai, W. Lin, J. Cai, X. Yang, W. Zhang // *J. Visual Communication and Image Representation*. - 2009. - P. 595-607.
39. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [Text] / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // *IEEE Transactions on Image Processing*. - 2004. - Vol. 13(4). - P. 600-612.
40. Pointwise Shape-Adaptive DCT Plug-ins for Adobe Photoshop [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.cs.tut.fi/~foi/SA-DCT/SA-DCT_Photoshop_Plug-ins_v100.zip. - 14.11.2012 г.
41. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Електронний ресурс] / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // *VPQM 2007: Proceedings of the Third International Workshop, Scottsdale (USA)*. - Vol. 3. - January 2007. - 4 p. - Режим доступу: <http://enpub.fulton.asu.edu/resp/vpqm/vpqm2007/>

templatepapers.htm. - 14.11.2012 з.

42. TID2008 – A Database for Evaluation of Full-Reference Visual Quality Assessment Metrics [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, A. Zelensky, K. Egiazarian, J. Astola, M. Carli, F. Battisti // М.: Ученых современной радиоэлектроники. –2009. – No 10. – С. 30-45.

43. Modified image visual quality metrics for contrast change and mean shift accounting [Text] / N. Ponomarenko, O. Ereemeev, V. Lukin, K. Egiazarian, M. Carli // CADSM: Proc. of int. conf. - Polyana-Svalyava, Ukraine, 23-25 February 2011. – P. 305-311.

Поступила в редакцію 3.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов» Э.Н. Хомяков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПРИСКОРЕННЯ ПОСТ-ОБРОБКИ ПРИ ДЕКОМПРЕСІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

М.М. Пономаренко, В.В. Лукін, О.О. Колганова

Розглянуто можливості підвищення якості зображень після декомпресії з використанням кодерів на основі дискретного косинусного перетворення та деблокінга. Для оцінки якості використано як стандартну метрику PSNR, так і метрики, що враховують аспекти візуального сприйняття людиною. Показано, що пост-обробку (деблокінг) можна виконувати із використанням прискорених алгоритмів, в тому числі й для сучасних методів стиску з втратами, що використовують компресію у блоках різного й досить великого розміру. Завдяки цьому вдається суттєво, у рази й десятки разів, прискорити деблокінг. Наведені результати тестування розглянутих методів для стандартних кольорових зображень й аерофотознімків.

Ключові слова: стиск та декомпресія зображень, пост-обробка, деблокінг, прискорення, аналіз ефективності.

SPEEDING-UP POST-PROCESING IN IMAGE DECOMPRESSION

N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, E.O. Kolganova

Possibilities to increase image quality after decompression by deblocking using DCT-based coders are considered. For quality assessment, both standard PSNR metric and HVS-metrics are employed. It is shown that post-processing can be carried out using speeding-up algorithms including the compression methods that use blocks of different size. Due to this, deblocking can be essentially accelerated. Results of the considered method testing for standard color and aerial images are presented.

Key words: image compression/decompression, post-processing, deblocking, speeding-up, efficiency analysis.

Пономаренко Николай Николаевич - д-р техн. наук, доцент каф. приёма, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: nikolay@ponomarenko.info.

Лукін Владимир Васильевич – д-р техн. наук, профессор, профессор каф. приёма, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: lukin@ai.kharkov.com.

Колганова Елена Олеговна – канд. техн. наук, докторант каф. защиты информации, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.