

УДК 621.397

М.С. ЗРЯХОВ, В.В. ЛУКИН*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, Украина***АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
ОТФИЛЬТРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Рассмотрены особенности формирования изображений, требования, предъявляемые к сжатию изображений с потерями. Проведен подробный анализ эффективности сжатия зашумленных изображений. Показано, что помехи различного рода понижают эффективность вторичной обработки (сжатия), применяемой к изображению. Рассмотрен вопрос об автоматизации сжатия отфильтрованных изображений с допустимым ухудшением качества восстановленных данных.

автоматическое сжатие изображений, оценка эффективности фильтрации, оптимальная рабочая точка, оценка качества, JPEG2000**Введение**

На сегодняшний день во всем мире существует достаточно большое количество цифровых бортовых систем формирования изображений (СФИ) дистанционного зондирования (ДЗ). Практически все эти СФИ относятся к классу, где носителями информации являются электромагнитные волны оптического, инфракрасного или радиодиапазонов. Существуют также и такие СФИ, где в качестве носителя информации используют звуковые и ультразвуковые волны [1].

Специфика методов формирования данных подобного рода такова, что получить идеальное изображение чрезвычайно сложно. Этому препятствует достаточно большое количество различных факторов, которые приводят к появлению помех, – это и случайный характер излученных или отраженных объектом сигналов, и внешние шумы, и несовершенство СФИ.

Как правило, различают три основных типа помех: аддитивные, мультипликативные и импульсные. Обычно, в зависимости от СФИ и воздействующих на нее факторов, в полученном изображении преобладает один из типов перечисленных выше помех. Для оптических и инфракрасных изображений обычно полагается, что доминирующим яв-

ляется аддитивный шум, а для изображений радиодиапазона преобладающей считается мультипликативная помеха [1].

Наличие помех ухудшает не только визуальное качество, скрывая полезную информацию, но и ухудшает эффективность вторичной обработки, применяемой к изображению (например, при интерпретации и кодировании полученных данных) [1, 2]. Поэтому для многих практических приложений повышение качества изображения является стандартной процедурой (под понятием повышения качества чаще всего понимают фильтрацию), выполняемой на этапе, предшествующем основной обработке (интерпретации, сжатию).

Сжатие изображений применяется с целью уменьшения объема памяти, необходимой для их дальнейшего хранения или передачи по линиям связи. В настоящий момент актуальность сжатия возрастает по мере увеличения количества цифровых СФИ и объемов формируемых ими данных. Особенно сжатие актуально для многоканальных СФИ. Например, система типа AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer) формирует многоканальные изображения. Одно такое изображение охватывает диапазон длин волн от 369 до 2507 нм, состоит из 224 изображений со стандартной размерностью 512×614 точек (пикселей), каждый пиксель

представлен 16-битным числом. Таким образом, для хранения одного такого изображения в несжатом формате необходимо около 139 Мбайт памяти. А если учесть, что за время полета возможно накопление нескольких десятков или даже сотен многоканальных снимков, то вопрос о сжатии становится особенно актуальным.

Следует отметить, что при сжатии изображений в подавляющем большинстве случаев используют разрушающие методы сжатия, так как они обеспечивают приемлемое качество восстановленных данных при высоких степенях компрессии (CR – compression ratio) [3 – 5]. Напомним также и тот факт, что в системах ДЗ, как правило, получить изображения без помех практически невозможно.

Эффективность и целесообразность применения фильтрации при сжатии наглядно представлена в работах [4, 5]. Кроме того, в случае сжатия изображений с помехами оценка качества восстановленного после сжатия изображения относительно исходного (в данном случае зашумленного) не совсем корректна [4]. Это вызвано тем, что при сжатии таких изображений методами с потерями (основанными на ортогональных преобразованиях) осуществляется частичное подавление шумов. При этом визуальное качество данных после сжатия и декодирования может улучшиться, в то время как оценка качественного показателя PSNR (peak signal-to-noise ratio – пиковое соотношение сигнал-шум), основанная на сравнении исходного (зашумленного) изображения с изображением после восстановления, ухудшается.

Таким образом, из вышесказанного следует, что изображения ДЗ для повышения качества дальнейшей обработки желательно фильтровать. Одними из наиболее эффективных методов фильтрации считаются методы, основанные на дискретном косинусном преобразовании (ДКП) [2]. Однако даже для таких фильтров подавление шумов осуществляется не в полной мере, т.е. в изображении после фильтрации присутствуют остаточные флуктуации. В свя-

зи с этим возникает вопрос – «с какими вносимыми потерями желательно сжимать отфильтрованные изображения?», ведь и методы фильтрации и методы сжатия в определенной степени искажают данные, поступающие на вход соответствующей системы обработки.

Ответ на поставленный вопрос дается в данной статье, где проводится анализ эффективности фильтрации тестовых изображений фильтром, основанным на ДКП [2], и последующего сжатия этих изображений. На основе полученных данных о среднеквадратической ошибке остаточных флуктуаций σ_{ocm}^2 предлагается сжимать отфильтрованные изображения с величиной вносимых искажений, определяемой уровнем σ_{ocm}^2 . Причем задача состоит в синтезе автоматизированной процедуры такого сжатия и анализе ее эффективности.

1. Предварительный анализ эффективности сжатия зашумленных изображений

Прежде чем приступить к изложению идеи предлагаемой автоматической процедуры сжатия отфильтрованных изображений, рассмотрим модели изображений, с которыми в дальнейшем предстоит оперировать. Предположим, что имеются зашумленное исходное изображение ДЗ I_{ij}^{or} , истинное изображение I_{ij}^{tr} , изображение после фильтрации I_{ij}^f , декодированное изображение I_{ij}^{dor} , полученное после сжатия I_{ij}^{or} , и декодированное изображение I_{ij}^{df} , полученное при сжатии I_{ij}^f . При этом для тестовых изображений можно рассчитать различные зависимости $PSNR(bpp)$ в соответствии с обобщенным выражением (1):

$$PSNR = 10 \times \log \left(\frac{255^2}{\sigma^2} \right), \quad (1)$$

где σ^2 – среднеквадратическая ошибка (СКО), которая характеризует различие между двумя изобра-

жениями. Тогда можно определять различные $PSNR$: $PSNR^{doror}$ (σ^2 рассчитывается для изображений I_{ij}^{dor} и I_{ij}^{or}), $PSNR^{dff}$ (σ^2 вычисляется для I_{ij}^{df} и I_{ij}^f), $PSNR^{dortr}$ (σ^2 определяется для I_{ij}^{dor} и I_{ij}^{tr}), $PSNR^{dfftr}$ (σ^2 рассчитывается для I_{ij}^{df} и I_{ij}^{tr}).

В предлагаемой процедуре автоматического сжатия отфильтрованных изображений ДЗ в качестве кодера решено использовать стандартный архиватор JPEG2000 [6], доступный по адресу <http://www.kakadusoftware.com>. Данный кодер считается одним из наиболее эффективных среди распространенных методов сжатия с потерями и обеспечивает достаточно высокий CR при допустимых вносимых искажениях, обладая при этом сравнительно высокой скоростью архивации. Кроме того, при сжатии изображений указанным архиватором возможно управлять степенью сжатия путем выбора необходимого bpp (bits-per-pixel – количество бит, приходящееся на один пиксель сжатого изображения), которое определяется следующим образом

$$bpp = \frac{DBI}{CR}, \quad (2)$$

где DBI – depth-of-brightness-image – глубина яркости изображения (для рассматриваемых изображений в градациях серого $DBI = 8$).

Типичный характер поведения рассматриваемых зависимостей $PSNR(bpp)$, представлен на рис. 1.

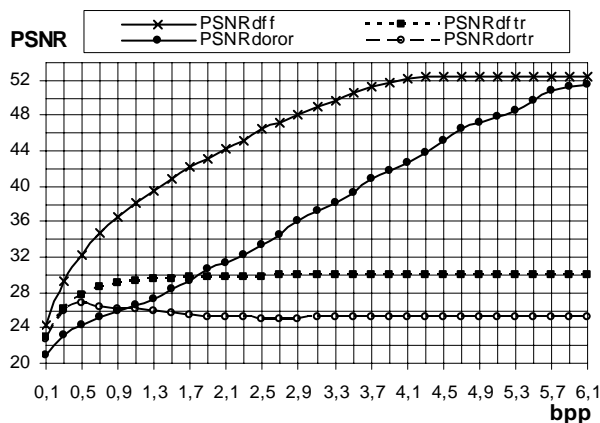


Рис. 1. Пример поведения различных зависимостей $PSNR(bpp)$

Аналогичное поведение кривых $PSNR(bpp)$ (см. также графики на рис. 3) характерно для всех тестовых изображений, приведенных на рис. 2. Отметим, что эти кривые построены для случая зашумления тестовых изображений аддитивным пространственно-некоррелированным гауссовым шумом с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{aui}^2 = 200$.

При фильтрации тестовых изображений в данной работе использовался фильтр, основанный на дискретном косинусном преобразовании [2, 7]. Данный фильтр является наиболее предпочтительным для обработки изображений ДЗ [7] и обеспечивает меньшую СКО остаточных помех, нежели другие распространенные фильтры, такие, как сигма, медианный, Ли [7] и т.д.

СКО остаточных помех может быть определена в соответствии с выражением

$$\sigma_{ocm}^2 = \frac{1}{MN} \times \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{ij}^{tr} - I_{ij}^f)^2, \quad (3)$$

где M и N – размер изображения (количество пикселей по горизонтали и вертикали).

Проанализируем поведение кривых на рис. 1 и 3.

Во-первых, из анализа зависимости $PSNR^{dortr}$ следует, что существует такая оптимальная точка ($bpp_{optimal}$), при которой значение $PSNR^{dortr}$ максимальное. Это, в свою очередь, говорит о том, что при сжатии/восстановлении зашумленного изображения осуществляется частичное подавление шумовой составляющей – своеобразная фильтрация.

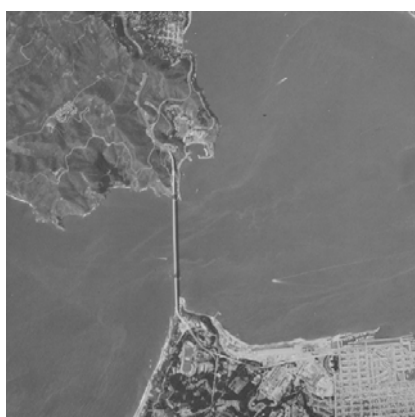
Во-вторых, кривая $PSNR^{dfftr}$ по всему диапазону значений bpp расположена выше, нежели кривая $PSNR^{dortr}$. Таким образом, предположение, высказанное в работах [4, 8] о том, что следует применять фильтрацию для повышения показателей эффективности сжатия (при одном и том же bpp обеспечивать более высокий $PSNR$) для зашумленных изображений, верно. Максимальные значения кривых $PSNR^{dfftr}$ определяют уровень остаточных флуктуаций в изображениях после их фильтрации.



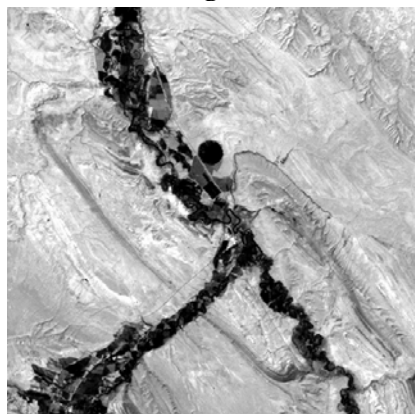
а



б

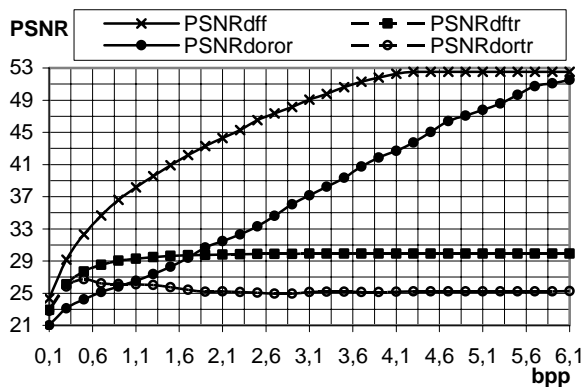


в

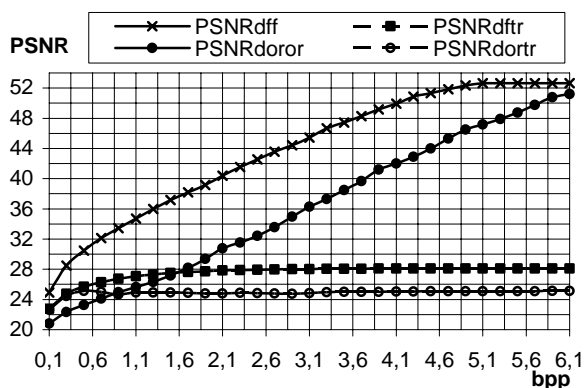


г

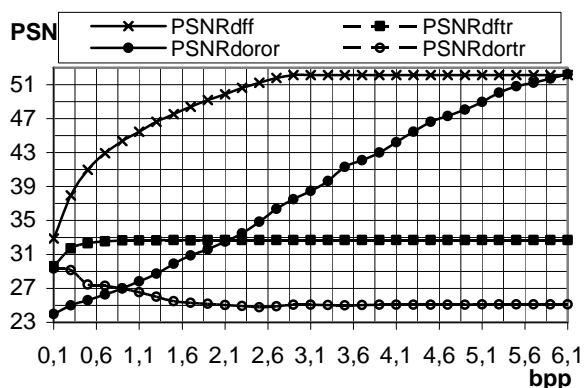
Рис. 2. Тестовые изображения: а – Аэродром, б – Диэго, в – Сан-Франциско, г – Поселок



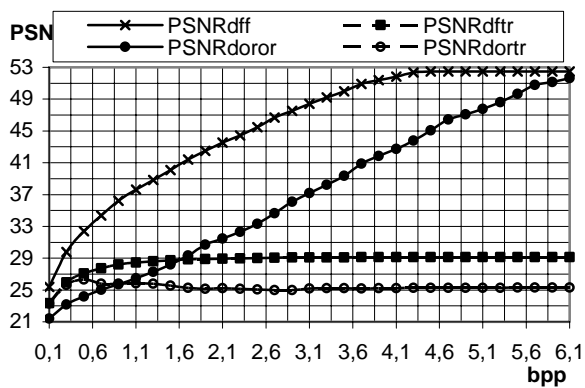
а



б



в



г

Рис. 3. Различные зависимости PSNR(bpp), построенные для изображений: а – Аэродром, б – Диэго, в – Сан-Франциско, г – Поселок

Отметим, что в реальных условиях получить зависимости $PSNR^{dfir}$ и $PSNR^{dortr}$ невозможно из-за отсутствия I_{ij}^{tr} , представляется возможным построить только $PSNR^{dovor}$ и $PSNR^{dff}$. Из сравнения характера поведения $PSNR^{dff}(bpp)$ и $PSNR^{dfir}(bpp)$ видно, что, начиная с некоторых значений bpp , значения $PSNR^{dff}(bpp)$ при увеличении CR постепенно уменьшаются, в то время, как значения $PSNR^{dfir}(bpp)$ продолжают оставаться примерно постоянными (на рис. 1 такие значения bpp соответствуют диапазону от 4,3 до 1,5).

Таким образом, при сжатии отфильтрованного изображения одновременно с незначительным внесением искажений в информационную составляющую осуществляется некоторое подавление остаточных флуктуаций (уменьшение σ_{ocm}^2), причем внесение искажений и подавление σ_{ocm}^2 происходит в примерно равной степени на участке значений bpp , на которых значения $PSNR^{dfir}(bpp)$ примерно постоянны.

Из вышесказанного следует, что оптимальную рабочую точку (ОПТ) при сжатии отфильтрованных изображений целесообразно выбирать на участке кривой $PSNR^{dfir}(bpp)$ в области значений bpp , где по мере уменьшения bpp значения $PSNR^{dfir}$ начинают постепенно уменьшаться и отличаются от максимальных ($PSNR^{max}$) на некоторую допустимую величину $\Delta PSNR_{don}$, например, на 0,5 дБ ($\Delta PSNR_{don} = PSNR^{max} - PSNR^{dfir}(bpp_{оптимальн})$). Однако, из-за того, что в реальных условиях I_{ij}^{tr} не доступно, возникает вопрос, каким образом определить $bpp_{оптимальн}$, анализируя те зависимости, которые можно получать на практике, например, $PSNR^{dff}(bpp)$.

Отметим, что процедура фильтрации изначально может быть включена в систему формирования изображений для повышения качества последующей обработки или выполняться непосредственно перед сжатием.

2. Процедура автоматического сжатия отфильтрованных изображений

Рассмотрим суть предлагаемого автоматического метода сжатия отфильтрованных изображений.

Как следует из анализа графиков на рис. 3, в точке $bpp_{оптимальн}$ кривая $PSNR^{dff}(bpp)$ имеет значения более высокие, нежели значения кривой $PSNR^{dfir}(bpp)$, при этом значения $bpp_{оптимальн}$ и $PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$ для разных изображений и изображений, содержащих неодинаковый уровень шумовой составляющей отличаются друг от друга. Чтобы подтвердить это, в табл. 1 приведены значения $PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$ для отфильтрованных тестовых изображений.

Исследования проводились для четырех значений дисперсии аддитивного шума $\sigma_{aui}^2 = 50, 100, 200, 400$. Соответствующие значения σ_{ocm}^2 для исследуемых тестовых изображений указаны в табл. 2.

Таблица 1

Значения $PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$ для тестовых изображений ($\Delta PSNR_{don} = 1,5$)

Изображение	Аэродром	Диего	Сан-Франциско	Поселок
$bpp_{оптимальн}$ (при $\sigma_{aui}^2 = 50$)	2,13	2,83	0,85	2,37
$PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$, дБ	42,84	41,49	44,01	42,49
$bpp_{оптимальн}$ (при $\sigma_{aui}^2 = 100$)	1,66	2,27	0,65	1,84
$PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$, дБ	41	39,7	42,19	40,81
$bpp_{оптимальн}$ (при $\sigma_{aui}^2 = 200$)	1,24	1,68	0,45	1,35
$PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$, дБ	39,07	38,06	40,22	39,05
$bpp_{оптимальн}$ (при $\sigma_{aui}^2 = 400$)	0,85	1,12	0,29	0,86
$PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$, дБ	36,9	36,45	38,01	37,28

Для определения $PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн})$ предлагается модифицировать уравнение (1) следующим образом:

$$PSNR^{dff}(bpp_{оптимальн}) = 10 \times \log \left(\frac{255^2}{\alpha \sigma_{ocm}^2} \right), \quad (4)$$

где α – вводимый параметр, который управляет уровнем искажений, вносимых при сжатии от-

фильтрованных изображений в точке $bpp_{оптималь}$.

Для реальных ситуаций, когда I_{ij}^{tr} отсутствует, и, соответственно, $\sigma_{осм}^2$ неизвестно, предлагается использовать автоматические методы оценки дисперсии шума в изображениях (в данном случае, остаточного шума), которые подробно изложены в работах [9, 10]. Проведенные исследования показали, что погрешность оценки $\sigma_{осм}^2$ при применении этих методов составляет не более 10%, что вполне приемлемо для практических приложений.

Таблица 2

Значения $\sigma_{осм}^2$ для тестовых изображений

$\sigma_{аи}^2$	$\sigma_{осм}^2$			
	Аэро- дром	Диего	Сан- Франциско	Поселок
50	25,32	38,21	15,66	31,16
100	41,39	64,11	23,35	50,52
200	66,5	101,2	34,88	79,21
400	101,83	148,92	50,53	120,93

В принципе, параметр α зависит от $\Delta PSNR_{дон}$ и сжимаемого изображения. Определим α для каждого тестового изображения по следующему алгоритму:

- 1) получим кривые $PSNR^{dff}(bpp)$ и $PSNR^{dfir}(bpp)$;
- 2) определим значение $bpp_{оптималь}$, при котором кривая $PSNR^{dfir}$ отличается от своего максимального значения на величину $\Delta PSNR_{дон}$;
- 3) определим значение $PSNR^{dff}$ в точке $bpp_{оптималь}$;
- 4) согласно (3) найдем $\sigma_{осм}^2$;
- 5) используя (4), вычислим α как

$$\alpha = \frac{255^2}{\sigma_{осм}^2 \times 10^{\left(\frac{PSNR^{dff}(bpp_{оптималь})}{10} \right)}}. \quad (5)$$

Значения α , полученные для тестовых изображений с помощью приведенного выше алгоритма, при $\Delta PSNR_{дон}=0,5$ дБ и $\Delta PSNR_{дон}=1,5$ дБ представлены соответственно в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Значения α для тестовых изображений при $\Delta PSNR_{дон}=0,5$ дБ и соответствующих $\sigma_{осм}^2$

Аэродром		Диего		Сан-Франциско		Поселок	
$\sigma_{осм}^2$	α	$\sigma_{осм}^2$	α	$\sigma_{осм}^2$	α	$\sigma_{осм}^2$	α
25,32	0,13	38,21	0,12	15,66	0,16	31,16	0,11
41,39	0,12	64,11	0,11	23,35	0,17	50,52	0,11
66,5	0,12	101,2	0,10	34,88	0,17	79,21	0,10
101,83	0,13	148,92	0,10	50,53	0,2	120,93	0,10

Таблица 4

Значения α для тестовых изображений при $\Delta PSNR_{дон}=1,5$ дБ и соответствующих $\sigma_{осм}^2$

Аэродром		Диего		Сан-Франциско		Поселок	
$\sigma_{осм}^2$	α	$\sigma_{осм}^2$	α	$\sigma_{осм}^2$	α	$\sigma_{осм}^2$	α
25,32	0,39	38,21	0,38	15,66	0,41	31,16	0,36
41,39	0,37	64,11	0,35	23,35	0,41	50,52	0,34
66,5	0,37	101,2	0,32	34,88	0,41	79,21	0,32
101,83	0,34	148,92	0,3	50,53	0,44	120,93	0,29

Как видно из значений $\sigma_{осм}^2$, приведенных в табл. 2, в зависимости от особенностей изображения (количества однородных, площадных и малоразмерных объектов, контраста границ, положения и форме текстурных участков и т.д.) эффективность подавления шумовой составляющей рассматриваемым фильтром при одинаковых $\sigma_{аи}^2$ разная. Чем большее количество неоднородных участков, малоразмерных объектов и резких границ содержится в изображении, тем хуже оно поддается фильтрации.

Параметр α в соответствии с данными, представленными в табл. 3 и 4, ведет себя следующим образом. Для случая $\Delta PSNR_{дон}=0,5$ дБ для изображений Аэродром, Диего и Поселок α колеблется в диапазоне 0,1...0,13, а для изображения Сан-Франциско - в диапазоне 0,16...2. При этом с ростом $\sigma_{осм}^2$ для изображения Сан-Франциско наблюдается увеличение α , для изображений Диего и Поселок α уменьшается, а для изображения Аэродром α примерно постоянное на всем диапазоне $\sigma_{осм}^2$.

Для случая $\Delta PSNR_{\text{доп}}=1,5$ дБ значения α увеличились примерно в три раза по сравнению с предыдущим случаем и находятся в диапазоне значений 0,29..0,44. Изменилось также и поведение параметра α для некоторых изображений при различных $\sigma_{\text{ост}}^2$. Для изображений Аэродром, Диего и Поселок наблюдается уменьшение α примерно от 0,38 до 0,3, а для изображения Сан-Франциско α (при $\sigma_{\text{ост}}^2$ в пределах от 15,5 до 35) имеет постоянные значения 0,41, а затем увеличивается до 0,44.

Следовательно, коэффициент α ведет себя несколько неоднозначно, и определить закономерность его поведения в соответствии с анализом кривых $PSNR^{diff}(bpp)$ и $PSNR^{dfr}(bpp)$ и приведенных выше таблиц сложно. В связи с этим было принято решение выбрать параметр α , руководствуясь особенностями реальных данных.

Поскольку на практике чаще встречаются изображения ДЗ достаточно сложные по своим характеристикам (такие, как Аэродром, Диего и Поселок), то для автоматизации процесса сжатия при $\Delta PSNR_{\text{доп}}=0,5$ дБ предлагается параметр α выбирать равным 0,1, а при $\Delta PSNR_{\text{доп}}=1,5$ дБ устанавливать α равным 0,3. При таких значениях α в подавляющем большинстве случаев гарантированно можно получить уменьшение значений $PSNR^{diff}$ не более чем на 0,5 и 1,5 дБ от ее максимального значения.

Таким образом, структурная схема предлагаемого автоматического метода сжатия отфильтрованных изображений примет вид, представленный на рис. 4.

Таким образом, предлагаемая автоматическая процедура сжатия изображений состоит в следующем:

1) на вход блока оценки $\sigma_{\text{ост}}^2$ подается отфильтрованное изображение (предполагается, что изображение до процедуры сжатия уже отфильтровано, в противном случае его следует отфильтровать);

2) производится оценивание остаточной дисперсии шума $\sigma_{\text{ост}}^2$;

3) в соответствии с предпочтительным $\Delta PSNR_{\text{доп}}$ определяется параметр α и затем вычисляется значение $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$ согласно (3);

4) осуществляется поиск $PSNR^{diff}(bpp_{\text{оптим}})$ для обрабатываемого изображения, после чего определяется $bpp_{\text{оптим}}$;

5) поданное на вход изображение сжимается с помощью архиватора JPEG2000 с заданным параметром $bpp=bpp_{\text{оптим}}$.

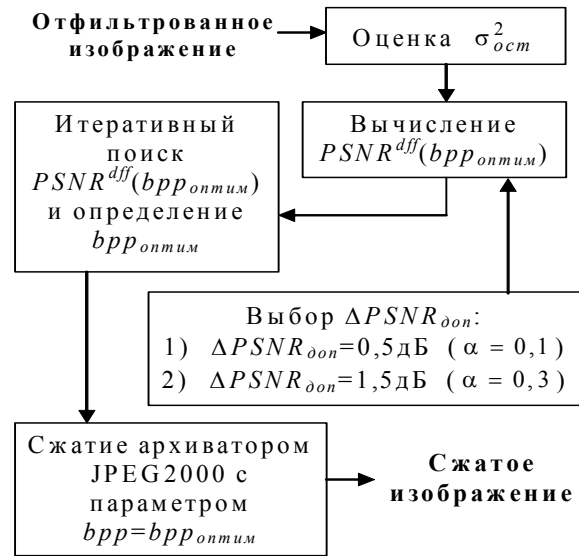


Рис. 4. Структурная схема предлагаемого автоматического метода сжатия отфильтрованных изображений

Отметим, что значение $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$ может быть получено за несколько шагов итеративной процедуры. В работе [5] показано, что для определения $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$ с помощью процедуры линейной интерполяции ошибка определения $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$ для диапазона значений превышающих 30 дБ, не превосходит 0,05 дБ.

Процедура линейной интерполяции [5] состоит в следующем:

1) исходной точкой для запуска $bpp_{\text{исх}}$ предлагается взять значение $bpp_{\text{исх}}=1,0$ (практические исследования, результаты которых отображены в

табл. 1, показали, что при начальном значении $bpp_{\text{исх}}=1,0$ обеспечиваются, в среднем, такие значения $PSNR$, которые лежат достаточно близко к $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$, что позволяет за несколько циклов определить необходимое значение $bpp_{\text{оптим}}$. Затем сжатое изображение восстанавливается и определяется текущее искомое $PSNR$;

2) если текущее $PSNR$ ($PSNR_i$) меньше $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$, то $bpp_{i+1}=bpp_i+\Delta bpp$ (Δbpp – дискретность значений bpp , определяющая точность процедуры линейной интерполяции, в рассматриваемом случае вполне достаточно взять $\Delta bpp=0,2$) процедура повторяется до тех пор, пока $PSNR_i$ восстановленного изображения не достигнет или не превысит требуемое значение;

3) если $PSNR_i$ больше $PSNR_{mp}$, то $bpp_{i+1}=bpp_i-\Delta bpp$, далее процедура повторяется аналогично пункту 2, пока значение $PSNR_i$ для восстановленного изображения не достигнет или не станет меньше $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$;

4) в соответствии с найденными значениями $PSNR_i$, bpp_i , $PSNR_{i-1}$, bpp_{i-1} и $PSNR(bpp_{\text{оптим}})$ (i – последний шаг пункта 2 или 3), находится $bpp_{\text{оптим}}$:

$$bpp_{\text{оптим}} = \frac{PSNR(bpp_{\text{оптим}}) - PSNR_i}{PSNR_{i+1} - PSNR_i} \times (bpp_{i+1} - bpp_i) + bpp_i. \quad (6)$$

3. Анализ точности предложенной процедуры

Основываясь на полученных в предыдущих разделах результатах, были даны соответствующие рекомендации о выборе параметра α , которые удовлетворяют поставленному условию: значение $PSNR^{dfir}$ в точке $bpp_{\text{оптим}}$ не должно отличаться от $PSNR^{max}$ более чем на $\Delta PSNR_{\text{доп}}$. При этом пользователю предлагается выбор предельно допустимой величины вносимых при сжатии искажений в отфильтрованное изображение ($\Delta PSNR_{\text{доп}}$ не более 0,5дБ или не более 1,5 дБ).

В предлагаемом автоматическом методе сжатия точность определения $bpp_{\text{оптим}}$ зависит от трех фак-

торов: во-первых, это точность определения $\sigma_{\text{ост}}^2$; во-вторых, невозможность на практике оптимизировать выбор параметра α для конкретного изображения; в-третьих, при решении задачи линейной интерполяции точность определения координат соответствующих аргументов зависит от дискретности их представления (в данном случае $\Delta bpp=0,2$).

Покажем, что рекомендованные значения параметра α , хоть и выбраны в некотором смысле эмпирическим путем (для значения $\Delta PSNR_{\text{доп}}=0,5$ дБ $\rightarrow \alpha = 0,1$, а для значения $\Delta PSNR_{\text{доп}}=1,5$ дБ $\rightarrow \alpha = 0,3$), тем не менее, вполне удовлетворяют поставленному условию.

Приведем значения оптимальной рабочей точки ($bpp_{\text{оптим}}$), полученные с помощью предложенной процедуры автоматического сжатия отфильтрованных изображений для случаев $\Delta PSNR_{\text{доп}}=0,5$ дБ (табл. 5) и $\Delta PSNR_{\text{доп}}=1,5$ дБ (табл. 6). Заметим, что $\Delta PSNR$ является разностью между максимальным значением кривой $PSNR^{dfir}$ ($PSNR^{max}$) и значением $PSNR^{dfir}(bpp_{\text{оптим}})$, при этом $\Delta PSNR$ и $bpp_{\text{оптим}}$ получены при условии:

$$\sigma_{\text{ост}}^2 = \sigma_{\text{реал}}^2 + 0,1\sigma_{\text{реал}}^2 \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{реал}}^2$ – действительное значение остаточной дисперсии шума.

Таблица 5

Значения $\Delta PSNR$ и $bpp_{\text{оптим}}$ для случая $\Delta PSNR_{\text{доп}}=0,5$

		$\Delta PSNR_{\text{доп}}=0,5$			
Аэродром	$\sigma_{\text{ост}}^2$	25,32	41,39	66,5	101,83
	$\Delta PSNR$ дБ	0,37	0,4	0,4	0,38
	$bpp_{\text{оптим}}$	2,36	1,79	1,36	0,97
Диего	$\sigma_{\text{ост}}^2$	38,21	64,11	101,2	148,92
	$\Delta PSNR$ дБ	0,41	0,46	0,49	0,49
	$bpp_{\text{оптим}}$	2,98	2,32	1,69	1,14
Сан-Франциско	$\sigma_{\text{ост}}^2$	15,66	23,35	34,88	50,53
	$\Delta PSNR$ дБ	0,3	0,2	0,18	0,1
	$bpp_{\text{оптим}}$	1,03	0,85	0,65	0,55
Поселок	$\sigma_{\text{ост}}^2$	31,16	50,52	79,21	120,93
	$\Delta PSNR$ дБ	0,42	0,47	0,49	0,48
	$bpp_{\text{оптим}}$	2,9	1,87	1,34	0,88

Вычисление $\sigma_{ост}^2$ в соответствии с уравнением (7) дало возможность симитировать наихудший вариант для определения $\overline{b_{pp_{опт}}}$ (уравнения (3) и (6)), при котором автоматический метод оценки дисперсии шума дает десяти процентную погрешности в большую сторону.

Таблица 6

Значения $\Delta PSNR$ и $\overline{b_{pp_{опт}}}$ для случая $\Delta PSNR_{дон}=1,5$

$\Delta PSNR_{дон}=1,5$					
Аэродром	$\sigma_{ост}^2$	25,32	41,39	66,5	101,83
	$\Delta PSNR$ дБ	1,18	1,23	1,28	1,3
	$\overline{b_{pp_{опт}}}$	1,58	1,11	0,74	0,48
Диего	$\sigma_{ост}^2$	38,21	64,11	101,2	148,92
	$\Delta PSNR$ дБ	1,22	1,33	1,4	1,48
	$\overline{b_{pp_{опт}}}$	2,09	1,44	0,88	0,45
Сан-Франциско	$\sigma_{ост}^2$	15,66	23,35	34,88	50,53
	$\Delta PSNR$ дБ	1,1	1,07	1,02	1,05
	$\overline{b_{pp_{опт}}}$	0,61	0,45	0,3	0,2
Поселок	$\sigma_{ост}^2$	31,16	50,52	79,21	120,93
	$\Delta PSNR$ дБ	1,3	1,34	1,41	1,49
	$\overline{b_{pp_{опт}}}$	1,65	1,1	0,69	0,41

Проанализировав приведенные выше результаты, можно сделать вывод, о корректном выборе параметра α . Для всех изображений с различной остаточной дисперсией шума, несмотря на то, что α не адаптирован под конкретное изображение, удалось удовлетворить поставленное ранее условие ($\Delta PSNR \leq \Delta PSNR_{дон}$).

Тем не менее, при таком подходе существует определенный недостаток. Он состоит в том, что для некоторых изображений при заданном $\Delta PSNR_{дон}$ возможно обеспечить более низкий b_{pp} (более высокий CR), нежели значения, полученные предложенным методом.

Однако, в соответствии с практическими наблюдениями более низкий b_{pp} достижим для изображений с несложными характеристиками, например, таких, как Сан-Франциско. При этом искажения, вносимые архиватором, для человеческого восприятия на них более заметны. Следовательно, в данном случае обеспечение более низких b_{pp} , а значит и более высоких $PSNR$ можно рассматривать как положительный факт.

Выводы

Таким образом, на основе проведенного анализа эффективности сжатия зашумленных изображений показано, что для повышения показателей эффективности сжатия необходимо применять фильтрацию.

Предложен оригинальный способ оценки такого $b_{pp_{опт}} (коэффициента сжатия), при котором уровень вносимых искажений в сжатое изображение не превышает заданного значения $\Delta PSNR_{дон}$. Оценка $b_{pp_{опт}}$ основана на установлении пользователем необходимого $\Delta PSNR_{дон}$ и автоматическом определении дисперсии остаточного шума. Это дало возможность предложить подход для автоматического сжатия отфильтрованных изображений, который отличается приемлемой точностью и удобством для пользователя.$

Основное применение предложенного архиватора – сжатие изображений в градациях серого. При этом вычислительные затраты для предложенной процедуры определяются количеством операций сжатия/восстановления изображений, которое зависит от Δb_{pp} (для $\Delta b_{pp}=0,2$ обычно достаточно 3–4 итерации).

На практике, при использовании компьютера с процессором Celeron (тактовая частота которого 1 ГГц) и операционной системой Windows XP время, затрачиваемое на сжатие изображения в градациях серого размерностью 512×512 пикселей, составило не более 1,5 секунд.

Литература

1. Беседин А.Н., Зеленский А.А., Кулемин Г.П., Лукин В.В. Обработка случайных сигналов и процессов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 469 с.
2. Öktem R. Transform Domain Algorithms for Image Compression and Denoising, Thesis for the degree of Doctor of Technology. – Tampere University of Technology (Tampere, Finland), 2000. – 142 p.
3. Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Pogrebnyak O. Methods for Lossy Compression of Images Corrupted by Multiplicative Noise // Proceedings of the International Conference “Modern Problems of Radioengineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, Feb.-March 2006. – P. 278-281.
4. Егизарян К., Зеленский А.А., Лукин В.В., Пономаренко Н.Н. Анализ эффективности сжатия РСА изображений // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2002. – № 7. – С. 23-32.
5. Зряхов М.С., Лукин В.В. Обеспечение заданного качества при сжатии изображений с потерями // Радиотехника: Сб. научн. тр. – Х.: ХНУРЭ, 2005. – Вып. 143. – С. 76-82.
6. Taubman D., Marcellin M., JPEG 2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice [Electronic resource]. – Boston: Kluwer, cop. 2002. – 1 electronic optical disc (CD-ROM); – System requirements: IBM-compatible PC; Windows 98 or higher; 1MB RAM; hard disk with 700 MB free space; CD-ROM player.
7. Tsymbal O.V., Lukin V.V., Ponomarenko N.N., Zelensky A.A., Egiazarian K.O., Astola J.T. Three-state Locally Adaptive Texture Preserving Filter for Radar and Optical Image Processing // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – May 2005. – No 8. – P. 1185-1204.
8. Зеленский А.А., Лукин В.В., Зряхов М.С., Пономаренко Н.Н. Особенности сжатия радиолокационных изображений дистанционного зондирования // Труды 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», сентябрь 2005 г. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. – Т. 2. – С. 409-412.
9. Lukin V.V., Abramov S.K., Vozel B., Cheddi K. A method for blind automatic evaluation of noise variance in images based on bootstrap and myriad operations // Proceedings of SPIE/EUROPTO Symp. On Satellite Remote Sensing, Bruges, Belgium, SPIE Vol. 5982, 2005. – P. 299-310.
10. Lukin V.V., Abramov S.K., Zelensky A.A., Astola J. Blind evaluation of noise variance in images using myriad operation // Proceedings of IS&T/SPIE International Conference on Image Processing: Algorithms and Systems. – San Jose, USA, SPIE Vol. 4667, 2002. – P. 192-203.

Поступила в редакцию 5.07.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.П. Кулемин, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.