

УДК 621.327

А.Г. СНИСАРЕНКО, Ю.С. ЛИТВИНОВ, В.А. МАЛАХОВ, С.В. МАЛАХОВ

Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Украина

ВНУТРИКАДРОВАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗОНАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В работе представлены результаты моделирования процессов внутрикадрового кодирования и визуализации полутоновых изображений посредством проведения дискретного косинусного преобразования (ДКП). С целью уменьшения избыточности цифрового описания исходных видеоданных применен ранее предложенный модифицированный зональный метод селекции коэффициентов преобразования, базирующийся на двух различных способах группировки спектральных составляющих. В ходе моделирования процессов сжатия и восстановления видеоданных проводилось последовательное укрупнение формируемых зон селекции коэффициентов преобразования при поэтапном уменьшении количества сохраняемых спектральных составляющих. Процесс объединения зон инициируется в области группировки гармоник высших порядков и реализуется в направлении области трансформант, охваченных функцией зонального маскирования. Проанализирована зависимость величины искажений восстанавливаемых изображений от выбранного алгоритма обработки трансформант.

обработка изображений, средства компактного представления видеоинформации, кодирование с преобразованием, зональное кодирование

Введение

Проблема уменьшения избыточности видеоинформации сопровождала все этапы развития систем обработки и передачи данных на протяжении всей их истории. Пропускная способность действующих сетей передачи данных, вычислительная мощность используемого оборудования и емкость запоминающих устройств (в том числе носителей информации) всегда отставали от требований, предъявляемых к скорости передачи видеоинформации, с одной стороны, и качеству воспроизводимых изображений, с другой. Появление цифрового спутникового телевидения, широкое использование видеоконференций, эволюция технологий передачи изображений в системах сотовой связи, распространение новых типов носителей информации (Video-CD, DVD-диски) – все это стало возможным благодаря широкому использованию различных форматов компактного представления звуко- и видеоинформации (MPEG, DV, JPEG) с соответствующей им программно-аппаратной реализацией средств ком-

пактного представления информации [1 – 3]. При этом подавляющее большинство применяемых на сегодняшний день форматов компактного представления видеоданных базируются на использовании методов внутрикадрового и межкадрового кодирования изображений с преобразованием [4 – 7]. Кодирование с преобразованием относится к группе методов сжатия с частичной потерей качества восстанавливаемых изображений (СЧПК). В основу этих методов положена идея поиска и устранения избыточности визуально воспринимаемой информации (с точки зрения психофизиологической модели восприятия человека). Путем использования сложных алгоритмов обработки эти методы обеспечивают достижение достаточно высоких степеней компрессии [1, 4, 8]. Однако применяемые на практике методы отбора значащих коэффициентов [1, 4, 5, 7] во многих случаях не обеспечивают требуемую разрешающую способность декодируемых репродукций. Данное обстоятельство особенно проявляется при обработке полутоновых изображений (256 градаций серого) [2] или яркостной составляющей ком-

понтного TV сигнала, что обусловлено значительно большей чувствительностью зрительного аппарата человека к изменениям градаций яркости, нежели градаций цвета [1, 4]. Поэтому решение вопросов, связанных с уменьшением величины ошибок восстанавливаемых полутоновых изображений при сохранении высоких степеней компрессии всего массива видеоданных, является *актуальной задачей*.

Анализ различных источников информации, касающихся рассматриваемой проблематики, показал, что задача селекции коэффициентов преобразования на практике чаще всего решается путем использования зонального и порогового методов. Каждый из них имеет свои положительные и отрицательные стороны [1, 4, 7, 9]. Так, зональный метод характеризуется большей устойчивостью сжатого массива видеоданных к воздействию помех, возникающих в каналах связи (КС); относительной простотой реализации кодера и декодера; постоянной скоростью потока данных на выходе кодера. Как следствие, этот метод применяется в системах обработки и передачи изображений, функционирующих в масштабе времени, близком к реальному, с реализацией межкадрового режима кодирования (телеконференции). Однако при этом восстановленные изображения уступают по своему качеству изображениям, полученным при использовании порогового метода, так как зональное кодирование реализует неадаптивный к локальной статистике обрабатываемых блоков изображений отбор коэффициентов трансформант [4, 9].

Пороговый метод отличает улучшенное качество восстановленных изображений [4, 7, 9], благодаря чему он находит широкое применение при внутрикадровой обработке изображений. При реализации данного метода особое внимание следует обратить на точность адресации значимых коэффициентов преобразования, вследствие чего по сравнению с зональным методом несколько увеличивается объем цифрового описания сжатого массива видеоданных. Кроме того, для поддержания постоянной скорости передачи данных в системе, использующей данный

метод, необходимо наличие буфера. Таким образом, пороговый метод реализует адаптивный к локальной статистике обрабатываемых изображений отбор значимых коэффициентов преобразования, но проявляет повышенную чувствительность к возможным ошибкам в адресации отобранных компонент трансформант [4].

Наряду с вышеуказанными, известен и ряд других решений [1, 5, 10]. Так, при реализации стандарта сжатия JPEG [1, 5] на этапе селекции коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП) [1, 4] используется матрица округления, значения которой формируются в зависимости от выбранного пользователем «фактора качества». Это позволяет выбрать компромисс между требуемой степенью сжатия и качеством восстанавливаемых изображений (потерей разрешения) [1, 4, 11]. В работе [10] рассмотрен метод сжатия видеоданных, позволяющий наряду с адаптацией процесса отбора коэффициентов уменьшить зависимость результатов восстановления изображений от возможных ошибок в адресации наиболее важных компонент трансформант, которые могут возникнуть в результате воздействия помех в КС.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод, что на этапе селекции коэффициентов преобразования в системах передачи малоподвижных изображений (телеконференция, мобильные телефоны, оборудованные камерой) наиболее «привлекательным» решением является использование зонального метода.

Однако во многих случаях (идентификация объектов изображений в режиме «стоп кадр», большое количество деталей в передаваемой сцене, съемка при недостаточной освещенности и др.) данный метод не обеспечивает достаточную разрешающую способность восстановленных репродукций. В связи с этим авторами статьи проведен ряд экспериментов, направленных на изучение механизмов улучшения качества восстанавливаемых полутоновых изображений при реализации модифицированного зонального кодирования.

Цель статьи – представить результаты, полученные при моделировании процессов кодирования и визуализации полутонных изображений со сложной структурой при проведении внутрикадрового кодирования с преобразованием (ДКП).

Основной целью, лежащей в основе проведенных экспериментов, являлось уменьшение величины ошибок восстановления изображений при сохранении высоких степеней компрессии и реализации относительно простых программно-аппаратных решений.

Результаты исследований

Модель отбора коэффициентов при реализации зонального кодирования заключается в следующем. Если через I_t обозначить адреса передаваемых коэффициентов трансформант (u, v) :

$$I_t = \{(u, v); |y_{u,v}| \geq 1\}, \quad (1)$$

то можно определить функцию зонального маскирования

$$m(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{где } u, v \in I_t; \\ 0, & \text{в противном варианте,} \end{cases} \quad (2)$$

которая равна 1 в зоне сосредоточения наибольших значений $y_{u,v}$. Таким образом, реализуется зональная селекция коэффициентов преобразования.

В ходе экспериментов исследовалась возможность улучшения качества восстанавливаемых репродукций путем формирования в области трансформант, не охваченных функцией зонального маскирования (2), дополнительных зон (областей) с заданной конфигурацией. Предложено два способа формирования областей селекции коэффициентов трансформант (ОСКТ) (рис. 1, а, б).

В отличие от известного метода «пирамиды Лапласа» [1, 13] в данном случае реализуется пропорциональное присутствие в каждой из зон контуров деталей изображения, имеющих вертикальную и горизонтальную протяженность; постепенное повышение пространственных частот составляющих спектра

в каждой из зон, причем оба способа охватывают всю пространственно-частотную область обрабатываемого блока изображения, благодаря чему удается точнее сохранить высокочастотную информацию и улучшить разрешающую способность восстанавливаемых репродукций.

В обоих рассматриваемых случаях все коэффициенты, образующие область 1 (рис. 1), как и при традиционном зональном кодировании, округлялись до целых и сохранялись с соответствующими знаками фаз [4, 7, 9]. Для каждой из последующих областей (обл. II – IV, рис. 1) сохраняется среднее значение амплитуды составляющих ее коэффициентов. Позднее, в декодере, эти значения используются при восстановлении исходных трансформант для заполнения отсутствующих позиций в соответствующих областях. При этом фазовые составляющие всех коэффициентов трансформанты сохраняются в виде отдельного массива матриц знаков (МЗ) [14].

Сокращение объема цифрового описания амплитудных составляющих

Уменьшение объема цифрового описания каждой из трансформант реализуется двумя путями. Первый – сокращение объема цифрового описания амплитудных составляющих. Он заключается в ограничении количества сохраняемых значений, характеризующих среднюю амплитуду коэффициентов в каждой из зон, и реализуется за счет слияния соседних зон (ОСКТ). При этом предусмотрено использование двух различных механизмов слияния зон:

- 1 – «попарное» объединение смежных зон (ПП);
- 2 – «высокочастотное» объединение смежных зон (ВЧ).

Рассмотрим механизм попарного объединения смежных зон (рис. 2). В ходе проведения экспериментов в силу ряда причин [4, 9] размер обрабатываемых блоков изображений был зафиксирован величиной 8 на 8 элементов. Соответственно после

проведения ДКП формируется матрица спектральных коэффициентов размером 8×8 элементов (эл.), т.е. трансформанта $F_N(U, V)$ (где $N = 7$ – количество формируемых зон). На рис. 2 левая верхняя трансформанта ($F_7(U, V)$) получена посредством применения 1-го способа (рис. 1, а) формирования ОСКТ, а левая нижняя – соответственно 2-м способом (рис. 1, б). ПП объединение смежных зон для $F_7(U, V)$ ограничено проведением 4-х шагов (τ) (рис. 2). Уже при $\tau = 3$ оба способа формируют трансформанту с одинаковой конфигурацией зон ($F_2(U, V)$, рис. 2). На 4-м шаге объединения смежных зон формируется матрица $F_1(U, V)$, аналогичная матрице, получаемой при использовании традиционного зонального метода (Zonal) [4, 9]. Типичный вид формируемой при этом трансформанты представлен на рис. 2 в 6-й позиции.

В отличие от ПП объединения смежных зон механизм ВЧ объединения (рис. 3) более гармоничен, так как в большей степени учитывает “психовизуальный фактор”. При этом процесс объединения ОСКТ зон инициируется в области группировки гармоник высших порядков и проводится в направлении области трансформант, охваченных функцией зонального маскирования, объединяющей в большей части гармоники низших порядков, к изменению состава и величины которых наиболее чувствителен зрительный аппарат человека [1, 4].

Механизм ВЧ объединения смежных зон представлен на рис. 3. В данном случае, также как и ранее для ПП объединения (рис. 2), исходной трансформантой $F_N(U, V)$ является матрица 8×8 эл. Однако в данном случае для базовой матрицы ($F_7(U, V)$) возможно проведение уже шести шагов (τ) по объединению смежных зон. При $\tau = 5$ оба способа формируют трансформанту с одинаковой конфигурацией зон ($F_2(U, V)$). На 6-м шаге синтезируется матрица $F_1(U, V)$, аналогичная Zonal (рис. 3, позиция 8).

В дополнение к принятым условным обозначениям, характеризующим состояние трансформант,

необходимо ввести следующие изменения. Условное сокращение $\kappa F_N(U, V) + \text{МЗ/ВЧ}$ следует понимать так: трансформанта, сформированная k -м способом, содержащая N зон; информация о фазовых составляющих всех спектральных компонент сохраняется путем формирования массива МЗ (+ МЗ); реализация ВЧ объединения смежных зон (/ВЧ).

Анализ результатов, полученных при моделировании процессов кодирования и восстановления полутонных изображений с использованием рассмотренных процедур, свидетельствует о значительно меньшей величине искажений при использовании ВЧ обработки, чем при использовании механизма ПП объединении смежных зон [12], причем данный результат характерен для двух рассмотренных конфигураций ОСКТ во всем диапазоне значений N .

Таким образом, по результатам эксперимента предварительно синтезирован алгоритм перестройки вариантов обработки трансформант, обеспечивающий плавный рост величины искажений восстановленных изображений и ограниченный величиной ошибок, полученных при проведении Zonal. В соответствии с ним каждый последующий шаг алгоритма перестройки вариантов обработки трансформант (τ_a) представляет собой очередное упрощение базовой трансформанты ($\kappa F_7(U, V) + \text{МЗ}$), проводимое путем ВЧ объединения соседних ОСКТ (рис. 4).

При этом, чем больше зон сформировано в базовой трансформанте, тем выше качество восстанавливаемого изображения и тем больше вариантов перестройки (рис. 2, 3) обеспечивает алгоритм кодирования. Естественно, что процесс перехода от одного варианта к другому в обратном порядке невозможен, так как на каждом шаге алгоритма (τ_a) происходит потеря части информации, содержащейся в исходной базовой трансформанте.

Для реализации указанных выше операций на передающей стороне в оперативном запоминающем устройстве кодера формируется две базовые матрицы соответственно 1-го и 2-го способов (рис. 1).

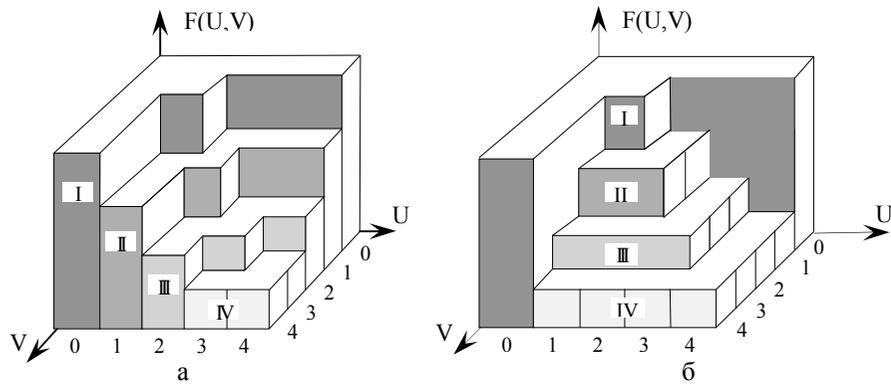


Рис. 1. Способы формирования ОСКТ

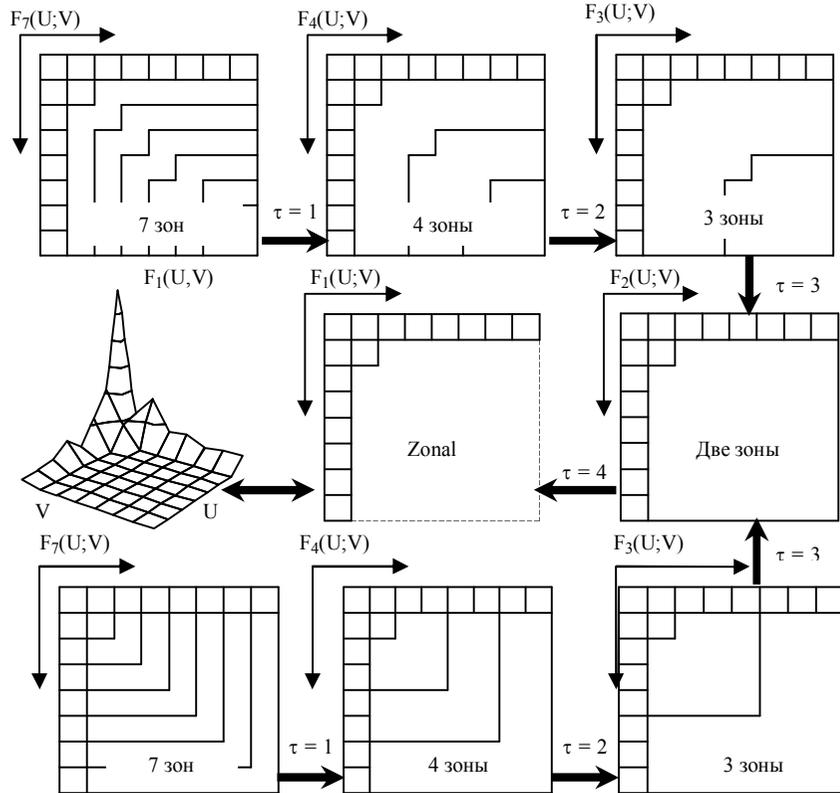


Рис. 2. Механизм объединения зон для матрицы 8×8 элементов

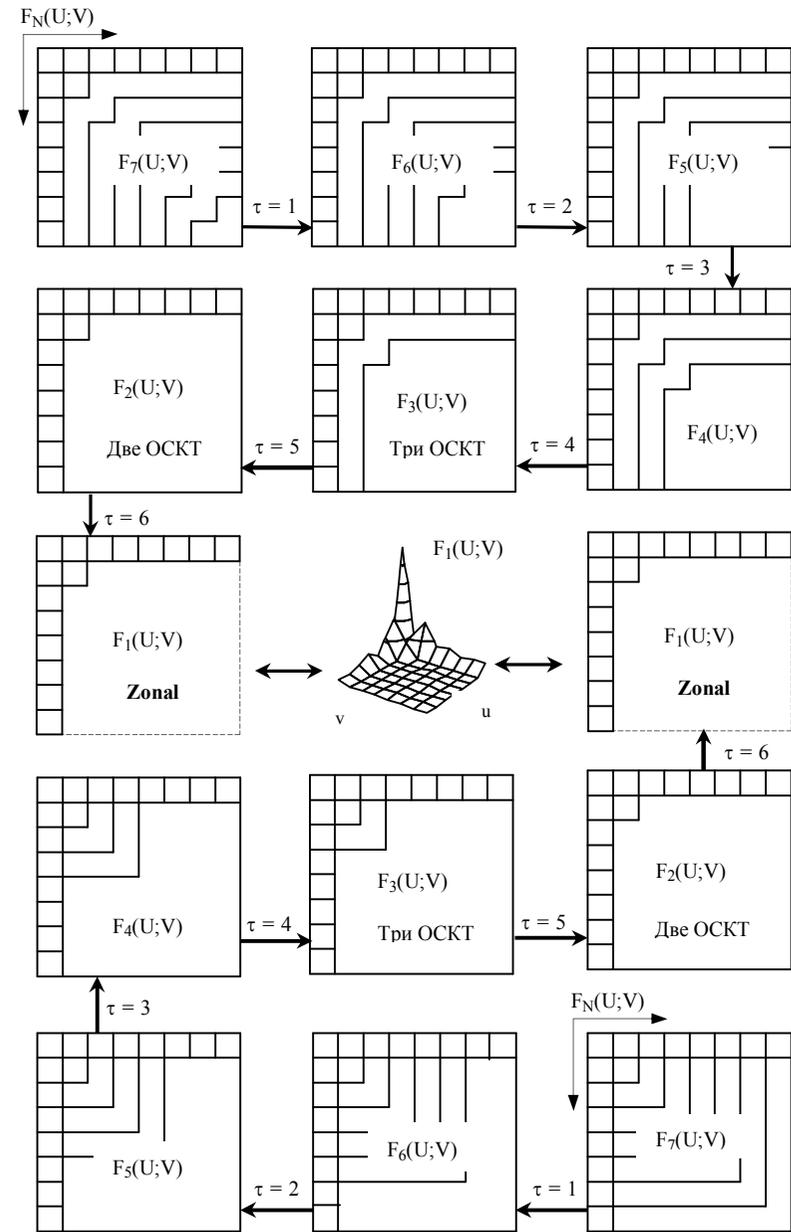


Рис. 3. ВЧ объединение ОСКТ для матрицы 8×8 элементов

$$\begin{aligned}
 & 2F_7(U;V) + MЗ / ВЧ \xrightarrow{\tau_a=1} 2F_6(U;V) + MЗ / ВЧ \xrightarrow{\tau_a=2} \dots \\
 & \rightarrow 2F_5(U;V) + MЗ / ВЧ \xrightarrow{\tau_a=3} 2F_4(U;V) + MЗ / ВЧ \xrightarrow{\tau_a=4} \dots \\
 & \rightarrow 1F_3(U;V) + MЗ / ВЧ \xrightarrow{\tau_a=5} 1F_2(U;V) + MЗ / ВЧ \xrightarrow{\tau_a=6} Zons.
 \end{aligned}$$

Рис. 4. ВЧ объединение соседних ОСКТ

Далее на их основе осуществляется переход от одного варианта обработки к другому или смена способа формирования зон. При этом для каждого изображения кодером формируется технический маркер с характеристикой проведенной обработки:

- размер трансформант;
- общее количество трансформант;
- способ формирования зон;
- количество зон в трансформанте;
- состояние МЗ (количество устраненных фазовых составляющих коэффициентов преобразования, если таковая операция проведена).

При восстановлении исходной информации в декодере проведение расчетов базовых матриц не требуется, а восстановление трансформант осуществляется в соответствии с информацией, записанной в маркере декодируемого кадра изображения.

Сокращение объема цифрового описания фазовых составляющих

Задача сокращения объема цифрового описания фазовых составляющих трансформант решается двумя способами:

- 1 – применяя тот или иной метод сжатия без потери информации;
- 2 – ограничивая количество сохраняемых фазовых составляющих спектра.

Первый способ был рассмотрен ранее в работах [10, 14], поэтому остановимся на особенностях, связанных с использованием второго способа при проведении ПП объединения смежных зон (рис. 2). Следует помнить, что любые манипуляции с фазовой составляющей спектра изображений проявляются гораздо сильнее, чем изменение амплитудных составляющих, и влекут за собой значительные искажения контуров обрабатываемого изображения.

В ходе проведения экспериментов уменьшение объема цифрового описания фазовых составляющих спектра решалось поочередным (начиная с последней зоны) устранением фазовых составляющих коэффициентов преобразования (ДКП), причем данная процедура не затрагивает зону 1 (рис. 1).

Как отмечалось ранее, при проведении модифицированного зонального кодирования изображений информация о фазовых составляющих коэффициентов преобразования сохраняется путем формирования массива матриц знаков.

МЗ «выделяется» из полученной после проведения ДКП – трансформанты, имеет одинаковый с ней порядок и представляет собой матрицу, элементы которой принимают значения „1” и „0”, т.е. представляет собой бинарную матрицу.

Проведенные исследования, связанные с выяснением характера искажений полутоновых изображений при ограничении информации о фазовых составляющих, носили комплексный характер. Так, при их проведении выполнялось:

- 1 – уменьшение количества зон – N (см. п. 1);
- 2 – поэтапное уменьшение объема информации МЗ для каждой из $kF_N(U, V)$.

Введем условное обозначение состояния МЗ (табл. 1) после изъятия из нее части информации. Для этого представим трансформанту, содержащую N зон с исключенной информацией о знаках фаз коэффициентов ДКП в η -й зоне, как $kF_N(U, V) - MЗ_\eta$. Тогда, в соответствии с введенным сокращением, условная запись $1F_7(U, V) - MЗ_{2-7}$ расшифровывается так: использован первый способ формирования конфигурации зон; всего 7 зон селекции; полностью исключена информация о фазах коэффициентов ДКП во 2, 3, 4, 5, 6, 7-й зонах (левая верхняя матрица на рис. 3).

Таблица 1

Значение коэффициента сжатия при различных вариантах обработки

Способ (<i>k</i>)	Варианты обработки трансформант							
	$kF_7(U,V) \pm \text{состояние } M3$							
	+M3	-M3 ₇	-M3 ₆₋₇	-M3 ₅₋₇	-M3 ₄₋₇	-M3 ₃₋₇	-M3 ₂₋₇	Zonal
1	2,64	2,68	2,75	2,86	3,01	3,22	3,51	5,22
2	2,64	2,83	3,01	3,18	3,32	3,44	3,51	5,22
$kF_4(U,V) \pm \text{состояние } M3$								
	+M3	-M3 ₄	-M3 ₃₋₄	-M3 ₂₋₄	Zonal			
1	3,01	3,16	3,51	4,19	5,22			
2	3,01	3,51	3,94	4,19	5,22			
$kF_3(U,V) \pm \text{состояние } M3$								
	+M3	-M3 ₃	-M3 ₂₋₃	Zonal				
1	3,16	3,48	4,49	5,22				
2	3,16	3,97	4,49	5,22				
$kF_2(U,V) \pm \text{состояние } M3$								
	+M3	-M3 ₂	Zonal					
1	3,32	4,83	5,22					
2	3,32	4,83	5,22					

Таким образом, с учетом введенных обозначений в табл. 1 представлены значения коэффициента сжатия ($K_{сж}$) [4], полученные для случая ПП объединения смежных зон при различном количестве областей селекции коэффициентов трансформант и состоянии M3.

Необходимо отметить, что в ходе выполнения экспериментов основное внимание было обращено не на достижение максимального коэффициента сжатия, а на подбор вариантов обработки трансформант, позволяющих получить, по сравнению с Zonal, более высокое качество восстанавливаемых изображений при соразмерном с ним коэффициенте сжатия.

Выводы

1. Для двух рассмотренных способов формирования областей селекции коэффициентов трансфор-

мант в случае исключения фазовых составляющих коэффициентов преобразования происходит резкое увеличение амплитуд ошибочно восстанавливаемых элементов изображений.

2. Сравнение результатов ВЧ кодирования трансформант и попарного объединения смежных зон показало проигрыш последнего, особенно в варианте трехзонной ($F3$) обработки трансформант.

3. С точки зрения визуальной заметности искажений, лучший результат получен при использовании 2-го способа формирования областей селекции коэффициентов трансформант (рис. 1, б) при реализации ВЧ кодирования.

4. Большие значения усредненной среднеквадратической ошибки при попарном объединении смежных зон ($F3$ и $F4$), на наш взгляд, обусловлены:

– значительным перераспределением энергии изображений между спектральными составляющими

ми, которые характеризуют контуры вертикальных и горизонтальных деталей изображений;

– перераспределением и усреднением энергии изображений между спектральными компонентами, в рамках вновь образованных зон.

5. Механизм перераспределения энергии в рамках зон связан с процессом усреднения величины образующих их коэффициентов (вычисление среднего значения амплитуды в каждой из зон) [12].

6. Механизм переноса энергии между спектральными составляющими, характеризующими вертикальные детали изображения в горизонтальные и, наоборот, обусловлен конфигурацией сформированных зон, причем его интенсивность в значительной степени связана с процессом укрупнения зон.

7. Использование ВЧ кодирования зон значительно ограничивает процесс переноса энергии низкочастотных компонент трансформант на ВЧ компоненты, а основная ошибка при восстановлении исходных трансформант связана с перераспределением энергии внутри зон, что обусловлено вычислением среднего значения амплитуд, образующих зону коэффициентов.

8. На основе анализа полученных результатов авторами разработан алгоритм перестройки вариантов обработки трансформант, а также обозначены основные пути дальнейшего совершенствования полученных наработок.

Литература

1. Зубарев Ю.Б., Дворкович В.П. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. – М.: МЦНТИ, 1997. – 212 с.
2. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
3. Рихтер С.Г. Цифровое радиовещание. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 352 с.

4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т. 1, 2. – М.: Мир, 1985. – 736 с.

5. Мاستрюков Д. Алгоритмы сжатия информации // Монитор. – 1994. – № 6. – С. 12 – 20.

6. Бондарев В.Н., Трестер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. – Севастополь: СевГТУ, 1999. – 398 с.

7. Уинтц П.А. Кодирование изображения посредством преобразований // ТИИЭР. – 1972. – № 7. – С. 69 – 81.

8. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. – 280 с.

9. Джайн А.К. Сжатие видеoinформации: Обзор // ТИИЭР. – 1981. – № 3. – С. 71 – 113.

10. Королев А.В., Рубан И.В., Малахов С.В. Метод сжатия видеоданных посредством преобразований // Электронное моделирование. – 1999. – № 4. – С. 47 – 56.

11. Королев А.В. Оценка информативности трансформант дискретного косинусного преобразования // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вип. 3. – С. 81 – 85.

12. Малахов С.В., Буханцов А.Д. Зональное кодирование изображений с различным разбиением пространственно-частотной области // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вып. 4 (14). – С. 121 – 125.

13. Burt P.J., Adelson E.H. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code // IEEE Trans. Commun. – 1993. – V. COM-31. – P. 229 – 236.

14. Королев А.В., Рубан И.В., Малахов С.В. Сжатие матрицы знаков при использовании кодирования с преобразованием // ИУСЖТ. – 1997. – № 3. – С. 12 – 14.

Поступила в редакцию 4.04.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е.Л. Казаков, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.