

различных значениях ρ ; здесь $\Delta t = 1$, $\varepsilon = 0,5\%$, а остальные параметры эксперимента имеют такие же значения, как и для рис. 1. Как видно из рис. 2, предлагаемый алгоритм идентификации является эффективным и при невысокой точности измерительной информации. Естественно, что все полученные результаты были инвариантны по отношению к любому изменению значений угла поворота и сдвига отдельных изображений.

Заключение. В данной работе получены соотношения алгоритма идентификации элементов бинарных изображений точечной динамической сцены, наблюдаемой в условиях помех. Алгоритм основан на редукации координат элементов зарегистрированных изображений к статистике максимального инварианта и применении принципа максимума апостериорной вероятности и является инвариантным по отношению к произвольным движениям отдельных изображений. Вследствие высокой вычислительной сложности представленного алгоритма предложена его приближенная модификация путем аппроксимации функционала идентификации и последующего перехода к задаче потокового программирования, для которой существуют методы решения, имеющие полиномиальную сложность невысокой степени. Приведенные результаты численного моделирования показывают, что приближенный алгоритм обеспечивает удовлетворительное качество идентификации в достаточно широком диапазоне значений параметров процесса регистрации изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В. М., Резник А. Л. Алгоритмы идентификации фрагментов двух изображений, инвариантные к повороту // Автометрия.— 1984.— № 5.
2. Белоглазов И. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы.— М.: Сов. радио, 1974.
3. Злобин В. К., Кобзев В. Н. Корреляционное отождествление звездных конфигураций для целей координатной привязки аэрокосмических снимков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.— 1982.— № 1.
4. Леман Э. Проверка статистических гипотез.— М.: Наука, 1979.
5. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность.— М.: Мир, 1985.

Поступила в редакцию 21 апреля 1988 г.

УДК 621.397.2 : 519.685

И. М. БОКШТЕЙН

(Москва)

АДАПТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ МЕТОДА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОМПОНЕНТ С ИНТЕРПОЛЯЦИЕЙ ПО ОТСЧЕТАМ

Введение. Метод кодирования изображений, использующий преобразование компонент с интерполяцией по отсчетам [1, 2], дает возможность уменьшить объем описания исходного изображения с 8 до $\sim 1,5$ бит/отсчет при малой погрешности восстановления и высоком визуальном качестве декодирования. В [1] показана целесообразность применения двух вариантов указанного метода — некомпенсированного и компенсированного с выделением «гладких» и «шумных» фрагментов; по аналогии с [1] будем называть их вариантами $Q3$ и $M3$ соответственно. Алгоритм кодирования и восстановления для варианта $Q3$ имеет следующий вид [1]:

1. Кодированное изображение I_0 разбивается на компоненты I_k , $k = 1, 2, 3$, путем «прореживания» отсчетов с шагом 2^k , и формируются разностные компоненты $I_{k-1} - I_k$ с отсчетами $y_{2^{k-1}i, 2^{k-1}j}$. Необходимые при этом промежуточные отсчеты компонент I_k находятся посредством билинейной интерполяции по их известным отсчетам.

2. Отсчеты компоненты I_3 и разностных компонент $I_2 - I_3$, $I_1 - I_2$ квантуются на $m_3 = 256$, $m_2 = 15$ и $m_1 = 5$ уровней соответственно (об оптимизации числа уровней квантования см. также [3]).

3. Отсчеты компоненты $I_0 - I_1$ квантуются на $m_0 = 2$ уровня, $\pm q$, если они принадлежат к «шумному» фрагменту изображения. В пределах «гладких» фрагментов им присваивается нулевое значение. «Гладкость» или «шумность» фрагментов определяется величиной среднего модуля значений компоненты $I_0 - I_1$ в пределах каждого фрагмента. Фрагмент считается «шумным», если эта величина превышает некоторый порог s^* .

4. Результаты квантования и информация о типах фрагментов кодируются, а затем передаются по каналу связи.

5. По принятым из канала кодам восстанавливаются квантованные значения разностных компонент и компоненты I_3 . По этим значениям путем билинейной интерполяции и суммирования восстанавливаются вначале компонент \hat{I}_2 , затем компонент \hat{I}_1 и, наконец, изображение I_0 .

Компенсированный вариант метода преобразования компонент позволяет устранить погрешность, обусловленную тем, что при кодировании разностные компоненты формируются по исходному изображению, а при восстановлении каждая следующая разностная компонента добавляется к компоненте, искаженной в результате квантования. Для компенсации этого явления в схему кодирования вводятся декодирующие элементы, аналогичные применяемым в системах с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией (ДИКМ) [4]. В результате вместо разностных компонент $I_{k-1} - I_k$ квантованию подвергаются разностные компоненты $I_{k-1} - \hat{I}_k$.

Весьма интересно рассмотреть возможности сделать метод преобразования компонент адаптивным к особенностям кодируемого изображения. Как и у подавляющего большинства других методов [5], введение адаптивности в метод преобразования компонент должно улучшить визуальное качество и снизить среднеквадратичную погрешность восстановления. Создание и исследование адаптивных вариантов метода и составляет основную цель данной работы.

Адаптивное определение типа фрагментов. Первой попыткой введения адаптивности является уже выделение «гладких» и «шумных» фрагментов. При этом, однако, результаты кодирования и степень сжатия сильно зависят от размеров этих фрагментов. Так, выбор фрагмента размером 4×4 отсчета обеспечивает гораздо лучшее восстановление, чем выбор фрагмента 8×8 отсчетов [1], но применение меньшего из этих фрагментов увеличивает среднюю длину кодовых комбинаций на $1/16 = 0,06$ бит/отсчет за счет информации о типе фрагмента. Попытки дальнейшего уменьшения размеров фрагментов разбиваются о значительный рост объема дополнительной информации (до 0,25 бит/отсчет для фрагментов, содержащих 2×2 отсчета).

При более внимательном рассмотрении ситуация, однако, оказывается не столь безвыходной. В самом деле, в состав фрагмента размером 2×2 отсчета входят три отсчета компоненты $I_0 - I_1$ (или $I_0 - \hat{I}_1$). Если этот фрагмент является «шумным», то после квантования может возникнуть одно из восьми распределений знаков уровней квантования отсчетов (рис. 1). Вероятности возникновения указанных распределений, очевидно, различны. Действительно, если рассматривать изображение как совокупность относительно больших областей медленно меняющейся яркости, разделенных контурами [6], то наиболее вероятны попадания фрагмента внутрь области (которым отвечают варианты распределения

Рис. 1. Распределения знаков уровней квантования в «шумном» фрагменте размером 2×2 отсчета

0	q	0	$-q$	0	q	0	$-q$
q	q	q	q	q	$-q$	q	$-q$
+++		-++		+--		---+	
0	q	0	$-q$	0	q	0	$-q$
$-q$	q	$-q$	q	$-q$	$-q$	$-q$	$-q$
++-		-+-		+--		---	

знаков +++ или --- или «гладкость» фрагмента). Остальные варианты соответствуют попаданию фрагмента на контур и менее вероятны. Поэтому можно волевым усилием считать допустимыми лишь семь наиболее вероятных распределений и выделить восьмую комбинацию знаков в качестве признака «гладкости». К достоинствам такого способа кодирования следует отнести высокую степень адаптивности, повышающую качество восстановления, и полное отсутствие дополнительной информации, подлежащей передаче. Его недостатком является некоторое занижение (как показывают приведенные ниже результаты моделирования, всего на 5—7 %) числа «шумных» фрагментов и, как следствие, сглаживание некоторых локальных особенностей изображения.

Адаптивное определение уровней квантования. Следующим шагом, направленным на повышение степени адаптивности и улучшение характеристик метода преобразования компонент, может являться адаптивный выбор уровней квантования q и порогов s^* . Оставаясь в рамках метода, описанного в предыдущем разделе (в зависимости от наличия или отсутствия компенсации мы будем называть его $M4$ или $Q4$), можно определять значения q и s^* , исходя из локальных особенностей изображения. Очевидно, что при правильном выборе этих значений качество восстановления резко возрастает. Так, на гладких участках изображения q и s^* должны быть небольшими, чтобы эти участки меньше искажались шумом квантования; детальным участкам, содержащим контуры, должны соответствовать большие значения q и s^* , что приведет к более эффективному воспроизведению этих контуров.

Результаты кодирования с адаптивным выбором q и s^* улучшаются с уменьшением размера фрагмента, для которого определяются эти параметры. Однако при этом одновременно квадратично возрастает объем подлежащей передаче дополнительной информации, что делает метод все менее привлекательным для практического использования. С другой стороны, определять q и s^* по фрагментам, содержащим более 8×8 отсчетов, неудобно, так как при работе с компонентами I_0, \dots, I_3 такие фрагменты не используются. Таким образом, целесообразно находить q и s^* для фрагментов размером 8×8 отсчетов.

Как уже указывалось в [1], единственным разумным вариантом является определение s^* , исходя из квантования отсчетов фрагмента (содержащего как «гладкие», так и «шумные» подфрагменты размером 2×2 отсчета) на три уровня: 0 и $\pm q$. Известно, что в этом случае имеет место соотношение

$$s^* = q/2. \quad (1)$$

Поскольку фрагмент с 8×8 отсчетами содержит всего 48 отсчетов компоненты $I_0 - I_1$ ($I_0 - \bar{I}_1$), задача оптимизации q может быть относительно легко решена путем полного перебора всевозможных значений (от 2 до 127) и выбора значения q_0 , минимизирующего среднеквадратичную погрешность квантования:

$$q_0 = \arg \min E(q), \quad (2)$$

где

$$E(q) = \sum_{|y_{ij}^0| \leq s^*} (y_{ij}^0)^2 + \sum_{|y_{ij}^0| > s^*} (y_{ij}^0 - q)^2, \quad (3)$$

y_{ij}^0 — отсчеты указанной компоненты, входящие в анализируемый фрагмент.

Для передачи найденных по формуле (2) значений q_0 (которым отвечает 7-разрядный код) необходимо $7/64 = 0,11$ бит/отсчет; значения s_0^* при декодировании можно определять по формуле (1). В результате средняя длина кодовых комбинаций для соответствующих некомпенсированной и компенсированной версий кодирования с преобразованием компонент ($Q5$ и $M5$) возрастает до 1,60 бит/отсчет (для вариантов $Q4$ и $M4$ она составляет 1,49 бит/отсчет).

Интуитивно ясно, что хорошие результаты можно получить и при грубом квантовании значений q_0 (отводя для их представления, например, 4 разряда). Поскольку зрение малочувствительно к искажениям яркости в местах ее резких изменений, 16 уровней квантования q_l целесообразно при этом расположить неравномерно (более тесно для малых и более редко для больших значений q). Поскольку желательно, чтобы резкие перепады яркости не сглаживались, максимальные значения \widehat{q}_{\max} должны соответствовать максимальным значениям q_0 .

С целью повышения качества восстановления и улучшения возможностей практической реализации метода удобно выбирать индивидуальные шкалы квантования для различных зон изображения. Наиболее естественно фиксировать шкалу для горизонтальной полосы, идущей вдоль всего изображения и имеющей ширину 8 отсчетов (более широкие полосы не используются при формировании компонент). Предварительное моделирование показало, что величина $q_{0\max}$ для таких полос хорошо коррелирована со среднеквадратичным значением отсчетов компонент $I_0 - I_1(I_0 - \widehat{I}_1)$:

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N} \sum |y_{ij}^0|^2 \quad (4)$$

— в пределах каждой полосы, содержащей N таких отсчетов. В среднем можно принять значение $\widehat{q}_{\max} = q_{0\max}$ равным $5\sigma_0$.

В принципе уровни шкалы квантования желательно располагать в соответствии с выражением

$$\widehat{q}_l = [1,43\sigma_0 \log(35/(31 - 2l))], \quad l = 0, \dots, 15, \quad (5)$$

отвечающим закону Вебера — Фехнера (нетрудно проверить, что этой шкале соответствует $\widehat{q}_{\max} = 5\sigma_0$). Однако в случае малого σ_0 (≤ 11) естественнее применять кусочно-линейную шкалу

$$\widehat{q}_l = \begin{cases} l + 2, & 0 \leq l \leq l_0; \\ l_0 + 2 + (\max(5\sigma_0, 17) - l_0 - 2)(l - l_0)/(15 - l_0), & l_0 \leq l \leq 15, \end{cases} \quad (6)$$

обеспечивающую различия между уровнями при небольших l . Эта шкала включает все уровни квантования от 2 до $l_0 + 2$; при $l > l_0$ уровни располагаются более редко, так что $\widehat{q}_{\max} = 5\sigma_0$. В достаточно частом случае $5\sigma_0 \leq 17$ шкала (6) вырождается в линейную шкалу с уровнями от 2 до 17. Из эмпирических соображений можно принять $l_0 = 11$, отводя четыре значения для уровня квантования отсчетов q_0 во фрагментах с повышенной детальностью.

Отметим, что параметрический выбор шкалы связан с необходимостью передавать для каждой из полос только значение σ_0 , что не влияет на эффективность кодирования. Применение 16-уровневых шкал квантования позволяет в 8 раз снизить объем перебора в ходе оптимизации по формуле (2). Одновременно объем дополнительной информации о значениях q_0 , подлежащей передаче, уменьшается до $4/64 = 0,06$ бит/отсчет, и средняя длина кодовых комбинаций для адаптивных вариантов кодирования, использующих такие шкалы (методов $Q6$ и $M6$), доходит до 1,55 бит/отсчет. Поскольку формирование шкал по формуле (5) или (6) должно проводиться лишь один раз на полосу, оно практически не оказывает влияния на скорость и сложность реализации процедур кодирования и восстановления.



Рис. 2. Изображения, использованные при моделировании

Моделирование адаптивных вариантов кодирования. С целью проверки реальных возможностей описанных выше способов адаптивного определения типа фрагментов и уровней квантования было проведено моделирование соответствующих вариантов метода преобразования компонент. Как и в [1], оно выполнялось для четырех высококачественных изображений различных классов (рис. 2) — высокодетального натурального сюжета «Кремль», портретного снимка «Катя», аэрофотоснимка и сюжета среднего плана «Школьники». Все изображения содержали по 512×512 отсчетов оптической плотности, линейно квантованных на 256 уровней.

Изображения на рис. 2 подвергались некомпенсированному или компенсированному кодированию с преобразованием компонент. На первом этапе моделирования была проверена идея адаптивного определения типа фрагментов. Для этого прежде всего по гистограмме распределения значений компоненты $I_0 - I_1$ ($I_0 - \hat{I}_1$) каждого изображения определялся (с использованием критериев Макса [7] для квантования на три уровня) порог s^* . Затем для каждого фрагмента размером 2×2 отсчета находился средний модуль значений входящих в него отсчетов. Если эта величина не превосходила s^* , то фрагмент считался «гладким», в противном случае — «шумным». В результате просмотра всех фрагментов изображения находился единый уровень квантования q , равный среднему модулю отсчетов в «шумных» фрагментах, и определялось количество реализаций каждого из восьми возможных распределений знаков отсчетов (см. рис. 1). Полученные результаты приведены в табл. 1; они отвечают вариантам Q4 или M4. Табл. 2 содержит аналогичные результаты, полученные при применении описанной выше методики адаптивного выбора s^* и q и соответствующие вариантам Q5, M5, Q6 и M6.

Анализируя табл. 1 и 2, можно заметить следующее:

Распределения знаков отсчетов в фрагментах размером 2×2 отсчета для изображений рис. 2 (методы $Q4$ и $M4$)

Метод	Изображение	Число «шумных» фрагментов	Варианты распределения знаков, %							
			+++	--+	+-+	---	++-	-+-	+--	---
$Q4$	«Кремль»	9 281	22,6	13,3	3,0	11,2	12,7	2,8	11,5	22,9
	«Катя»	52 102	19,9	9,7	7,1	13,0	13,9	7,4	8,7	20,3
	«Аэрофото»	29 750	26,6	10,9	3,9	10,3	11,9	3,8	10,1	22,5
	«Школьники»	23 829	25,6	13,2	2,8	8,2	9,6	2,8	12,0	25,8
$M4$	«Кремль»	9 822	22,7	12,2	3,0	10,6	12,2	2,9	10,9	25,5
	«Катя»	36 534	16,2	7,5	4,7	12,5	11,6	7,0	7,9	32,6
	«Аэрофото»	24 995	23,6	9,5	2,9	9,6	9,7	3,7	9,1	31,9
	«Школьники»	21 218	24,9	10,7	2,0	7,5	7,8	2,7	10,0	34,4

1. Как и ожидалось, вероятности различных распределений знаков существенно неодинаковы. Наименее вероятными являются распределения $+-+$ и $-+-$.

2. Вероятности появления наиболее редкого распределения при кодировании всех изображений рис. 2 не превышают 7,1 % для некомпенсированных и 5,4 % для компенсированных вариантов кодирования. Поэтому предложенное выше использование кодов соответствующих распределений для указания на «гладкие» фрагменты не должно оказывать значительного влияния на резкость восстановленных изображений.

3. Для некомпенсированных вариантов кодирования иногда наименее вероятно распределение знаков $+-+$, а иногда распределение $-+-$; различие между их вероятностями при этом весьма невелико. При кодировании с компенсацией в силу неясных причин практически всегда наименее вероятно распределение $+-+$. Таким образом, целесообразно во всех случаях использовать для указания на «гладкость» фрагмента код распределения $+-+$.

Второй этап моделирования состоял в проведении собственно адаптивного кодирования изображений рис. 2 методами $Q4 - Q6$ и $M4 - M6$ с последующим восстановлением этих изображений. Полученные при этом значения среднеквадратичной погрешности восстановления σ , а также средние длины кодовых комбинаций $N_{ср}$ для каждого из предложенных вариантов кодирования сведены в табл. 3. Для сравнения в ней приведены также значения σ и $N_{ср}$, отвечающие описанным в [1] методам $Q3$ и $M3$. Визуальное качество восстановленных изображений оказалось во всех случаях высоким; в силу полной неотличимости их полиграфических версий от изображений на рис. 2 они не приведены в данной статье.

Анализ табл. 3, а также визуальная оценка соответствия исходных и восстановленных изображений свидетельствуют о следующем:

1. Применение адаптивных методов $Q4$ и $M4$ позволяет снизить среднеквадратичную погрешность восстановления по сравнению с неадаптивными методами $Q3$ и $M3$. Снижение достигает 9 % для сюжета «Кремль», содержащего мощную высокочастотную компоненту, 3—6 % для сюжетов средней детальности «Аэрофото» и «Школьники» и всего 0—5 % для портрета «Катя».

2. Использование методов $Q5$ и $M5$ дополнительно уменьшает среднеквадратичную погрешность восстановления в среднем на 4 и 8 % по сравнению с методами $Q4$ и $M4$.

Таблица 2

Распределения знаков отсчетов в фрагментах размером 2×2 отсчета для изображений рис. 2 (методы $Q5$, $Q6$, $M5$ и $M6$)

Метод	Изображение	Число «шумных» фрагментов	Варианты распределения знаков, %							
			+++	--+	+-+	--+	++-	-+-	+--	---
$Q5$	«Кремль»	31 964	21,6	11,7	6,2	10,8	12,8	5,6	10,3	21,0
	«Катя»	40 399	21,8	9,5	6,7	12,7	14,2	6,6	8,0	20,5
	«Аэрофото»	39 771	23,5	11,2	5,4	10,9	12,1	5,4	10,2	21,3
	«Школьники»	37 490	22,1	13,2	5,1	8,7	10,1	5,1	12,5	23,2
$Q6$	«Кремль»	32 209	21,6	11,8	6,2	10,8	12,8	5,6	10,2	21,0
	«Катя»	40 479	21,8	9,5	6,7	12,7	14,2	6,6	8,0	20,5
	«Аэрофото»	39 856	23,5	11,2	5,4	10,9	12,0	5,4	10,3	21,3
	«Школьники»	37 558	22,1	13,2	5,1	8,7	10,1	5,1	12,5	23,2
$M5$	«Кремль»	33 013	23,0	10,3	5,2	9,6	11,1	5,4	9,1	26,3
	«Катя»	40 394	15,2	7,7	5,0	12,7	14,2	6,6	8,0	31,6
	«Аэрофото»	39 856	23,5	11,2	5,4	10,9	12,0	5,4	10,3	21,3
	«Школьники»	38 241	20,8	11,4	4,1	8,5	8,4	5,2	11,2	30,4
$M6$	«Кремль»	33 315	22,9	10,3	5,2	9,6	11,1	5,5	9,1	26,3
	«Катя»	40 463	15,2	7,7	5,0	12,7	11,7	7,4	8,4	31,9
	«Аэрофото»	39 798	20,0	9,6	4,3	10,7	10,2	6,0	9,6	29,6
	«Школьники»	38 450	20,8	11,4	4,1	8,5	8,4	5,2	11,2	30,4

3. Результаты кодирования методами $Q6$ и $M6$ (которые более просты в реализации и обеспечивают меньшую среднюю длину кодовых комбинаций по сравнению с методами $Q5$ и $M5$) по всем параметрам практически тождественно совпадают с результатами, полученными с помощью методов $Q5$ и $M5$.

4. Компенсированные варианты кодирования всегда обеспечивают на 5—14 % меньшую погрешность восстановления, чем соответствующие некомпенсированные варианты.

5. Визуальные отличия исходных и восстановленных изображений во всех случаях достаточно малы. Переход от методов $Q3$ и $M3$ к методам $Q4$ и $M4$ слабо уменьшает эти отличия; применение методов $Q5$, $M5$ (или $Q6$, $M6$) вызывает значительное уменьшение отличий и делает практически невозможным их выявление наблюдателем. Такой результат обусловлен тем, что при адаптивном выборе q и s^* более успешно восстанавливаются мелкие резкие детали изображений (особенно замстно улучшается качество восстановления сюжета «Кремль», содержащего как однородные области, так и значительное число таких деталей).

Итак, наиболее привлекательным для использования оказывается метод $M6$, обеспечивающий минимальную погрешность и наилучшее визуальное качество восстановления при малой средней длине кодовых комбинаций (1,55 бит/отсчет). Отметим, что, несмотря на кажущуюся сложность, этот метод допускает относительно простую аппаратную

Т а б л и ц а 3

Среднеквадратичная погрешность восстановления изображений рис. 2

Сюжет	Метод кодирования	№ ср. бит/отсчет	σ , в уровнях квантования исходного изображения	
«Кремль»	Q3	1,55	11,8	
	Q4	1,49	10,8	
	Q5	1,60	10,6	
	Q6	1,55	10,6	
	M3	1,55	11,3	
	M4	1,49	10,3	
	M5	1,60	9,9	
	M6	1,55	9,9	
	«Катя»	Q3	1,55	3,7
		Q4	1,49	3,7
Q5		1,60	3,6	
Q6		1,55	3,6	
M3		1,55	3,6	
M4		1,49	3,4	
M5		1,60	3,3	
M6		1,55	3,3	
«Аэрофото»		Q3	1,55	7,3
		Q4	1,49	7,1
	Q5	1,60	6,6	
	Q6	1,55	6,6	
	M3	1,55	6,9	
	M4	1,49	6,6	
	M5	1,60	6,0	
	M6	1,55	6,0	
	«Школьники»	Q3	1,55	6,8
		Q4	1,49	6,5
Q5		1,60	6,2	
Q6		1,55	6,2	
M3		1,55	6,2	
M4		1,49	5,8	
M5		1,60	5,3	
M6		1,55	5,3	

реализацию. Чуть более простыми в реализации, но несколько худшими по своим возможностям являются методы Q6, M4 и Q4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокштейн И. М. Метод преобразования компонент и его предельные возможности // Кодирование и обработка изображений.— М.: Наука, 1988.
2. Бокштейн И. М. Использование метода преобразования компонент для сокращения избыточности цветных изображений // Автометрия.— 1988.— № 6.
3. Бокштейн И. М. Статистическая оценка возможностей метода преобразования компонент с интерполяцией по отсчетам // Шестой междунар. симп. по теории информации: Тез. докл.— Москва; Ташкент: АН СССР, АН УзССР, 1984.— Ч. 2.
4. Коннор Дж., Брейнард Р., Лимб Дж. Внутрикадровое кодирование изображений для передачи по цифровому каналу // Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин.— М.: Мир, 1973.
5. Nabibi A. Survey of adaptive image coding techniques // IEEE Trans. Commun.— 1977.— COM-25, N 11.— P. 1275.
6. Лебедев Д. С., Миркин Л. И. Статистическая модель изображения // VI конф. по теории кодирования и передачи информации.— Томск: ТГУ, 1975.— Ч. 3.
7. Max J. Quantizing for minimum distortion // IRE Trans. on Inform. Theory.— 1960.— IT-6, N 3.— P. 7.

Поступила в редакцию 24 апреля 1989 г.