

УДК 621.397.6

ПРИНЦИПЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК КВАНТОВАНИЯ СПЕКТРА БЛОКОВ ПИКСЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Безруков В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой телевидения и звукового вещания Московского технического университета связи и информатики, e-mail: ldty@mail.ru.

Ключевые слова: цифровое телевидение, сигнал изображения, сжатие, многомерный спектр, квантование, блок пикселей, вычислительный анализ.

Введение

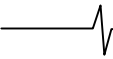
Проблема адаптивного сжатия многомерного спектра сигналов телевизионных (ТВ) изображений представляет большой теоретический и практический интерес для разработчиков и производителей оборудования цифровых систем передачи видеoinформации. Устранение избыточности в данном случае тесно связано с визуальным качеством передачи текущих изменений пространственной (внутрикадровой), межкадровой и цветовой структур сигналов изображений [1, 2, 3, 8, 9]. Увеличение степени её устранения или огрубления существенно влияет на точность передачи указанных изменений, что вызывает появление заметных для визуального контроля искажений пространственно-временной и цветовой структур ТВ изображений в условиях, когда фиксирована и является относительно низкой скорость выходного цифрового потока.

Метод сжатия спектра с фрагментацией пространственно-временной структуры сигнала ТВ изображения независимыми блоками пикселей (отсчётов) в реальном пространстве (в пределах одного и последовательности кадров) определяет раздельное сжатие спектра каждого из независимых блоков, с допустимыми при декодировании и воспроизведении погрешностями, отражающими в своей совокупности текущую пространственно-временную структуру исходных сигналов ТВ изображений.

В стандарте JPEG, например, последовательностями независимых блоков представлена структура общего ансамбля пикселей (отсчётов) изображений в пределах каждого отдельного кадра. Далее отсчёты каждого блока накапливают и подвергают ДКП с последующим, учитывающим особенности характеристик зрительной системы, частотно-зависимым взвешиванием полученных коэффициентов спектра в пределах соответствующей матрицы квантования. Дальнейшая селекция последних, по абсолютному значению уровня, обеспечивает в ходе работы систем цифрового телевидения адаптивную регулировку степени сжатия и сохранение (с учетом энтропийного кодирования и обратного частотного преобразования) наиболее заметных и интенсивных составляющих спектра сигналов изображений в условиях фиксированной скорости сформированного цифрового потока. Од-

Матричное представление таблиц частотного взвешивания при квантовании коэффициентов спектра в стандартах JPEG, MPEG затрудняет выявление специфики данного преобразования и его связь с характеристиками зрения. Реализована разработка принципов вычислительного анализа таких связей с использованием варианта таблицы частотного взвешивания блоков сигналов яркости, предложенного группой JPEG. Осуществлён вычислительный анализ двумерной импульсной характеристики, соответствующей данному варианту таблицы, и её сечений. Предложено использовать дискретизацию при преобразовании указанной импульсной характеристики или её сечений в частотное пространство для вычислительного анализа соответствующих одномерных (двумерных) функций коэффициентов передачи.

нако увеличение степени сжатия приводит к снижению точности передачи и к появлению нарушений на границах сопряжения смежных блоков текущей структуры сигнала изображения. Причиной является соответствующее снижение числа передаваемых уровней (огрубление) шкалы квантования коэффициентов ДКП. С учетом того, что наиболее высокочастотные коэффициенты имеют относительно большие коэффициенты матрицы квантования, то, по мере увеличения степени сжатия, полученные в результате взвешивания низкоинтенсивные высокочастотные составляющие спектра всё в большей мере обнуляются, обнуляются и другие, изначально относительно малого уровня, составляющие пространственного спектра. В связи с этим в пределах смежных блоков, чаще всего, имеют место индивидуальные трансформации формы функции устранения составляющих частот пространственного спектра сигнала изображения, которые определяются спецификой распределения их уровней. В соответствии с регулируемыми величинами шага шкалы квантования коэффициентов различной частоты, при текущем увеличении степени сжатия в структуре пространственного спектра сигнала ТВ изображений возрастает степень деградации всех частотных составляющих малой интенсивности. По мере дальнейшего увеличения шага шкалы квантования полностью исчезают низкочастотные и всё более высокие пространственные частотные составляющие относительно большой амплитуды. Такое нелинейное стробирование коэффициентов пространственного спектра сигнала изображения и определяет специфику искажений, возникающих в пределах каждого отдельного блока. В структуре распределения спектральных составляющих соответствующей матрицы в результате этого появляются ступенчатые перепады, ортогональные плоскости $\omega_x \ominus \omega_y$ (при строби-



ровании до нулевого значения). Появление последних отражается в реальном пространстве возникновением сопутствующих (колебательного типа) изменений среднего уровня и выбросов в структуре совокупности пикселей декодированного блока сигналов изображений, которые и провоцируют указанную выше заметность последовательностей блоков и их границ в локальных участках внутрикадрового пространства.

Известно, что анизотропия усреднённой пространственной спектральной интенсивности реальных изображений и пространственной частотной характеристики зрения имеют ромбовидную конфигурацию области граничных частот двумерного пространственного спектра [4, 5]. При этом максимальная протяжённость указанного пространственного спектра ориентирована в горизонтальном и вертикальном направлениях внутрикадрового пространства. Интегральные искажения (относительно резких ограничений) таких высокочастотных пространственных составляющих сигналов изображений, возникающих при сжатии, существенно влияют на субъективное качество восприятия ТВ изображений. Соответственно падает чёткость декодированных ТВ изображений, появляются выбросы на резких границах [3, 9]. Меньшее влияние на визуальное качество изображения, в соответствии с указанной выше спецификой пространственной спектральной интенсивности реальных изображений и пространственной частотной характеристики зрения, оказывает устранение малоинтенсивных высокочастотных пространственных составляющих в диагональном направлении.

Вычислительный анализ специфики импульсной характеристики частотного взвешивания коэффициентов пространственного спектра блоков сигналов яркости по стандарту JPEG

В процессе квантования, чаще всего, имеет место известное [8, 9] преобразование коэффициентов ДКП отдельных блоков в соответствии с соотношением:

$$C_{q(m,n)} = \text{Round} \left(\frac{C(m,n)}{\rho Q(m,n)} \right),$$

где $Q(m,n)$ – распределение весовых коэффициентов квантования, задаваемых в виде функции или таблицы целых чисел; ρ – параметр, определяющий степень сжатия изображения; Round – операция округления до ближайшего целого значения; $C(m,n)$ – исходные коэффициенты ДКП, соответствующие данному блоку; $C_q(m,n)$ – полученные в результате выполнения квантования коэффициенты ДКП, которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Как показали проведённые группой JPEG исследования, более высокую эффективность сжатия обеспечивает применение в качестве распределения $Q(m,n)$ эмпирически полученных таблиц в матричном представлении. Информация об используемой таблице квантования передаётся на приёмную сторону в общем потоке данных. Матричное представление данных таблиц затрудняет выявление специфики частотного взвешивания, реализуемого с помощью этих таблиц, и её связь с характеристиками зрения. Разра-

ботка методов вычислительного анализа таких связей является целью данной статьи.

В общем виде строки таблицы частотного взвешивания представим в виде матрицы с числом элементов $\bar{\alpha}_{\pm\mu, \pm\chi}$, равным $(2n_x + 1) \times (2n_y + 1)$, следующим образом:

$$\begin{matrix} \bar{\alpha}_{-n_x, n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x+2, n_y} & \dots & \bar{\alpha}_{0, n_y} & \dots & \bar{\alpha}_{n_x-2, n_y} & \bar{\alpha}_{n_x-1, n_y} & \bar{\alpha}_{n_x, n_y} & \dots \\ \bar{\alpha}_{-n_x, n_y-1} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, n_y-1} & \bar{\alpha}_{-n_x+2, n_y-1} & \dots & \bar{\alpha}_{0, n_y-1} & \dots & \bar{\alpha}_{n_x-2, n_y-1} & \bar{\alpha}_{n_x-1, n_y-1} & \bar{\alpha}_{n_x, n_y-1} & \dots \\ \bar{\alpha}_{-n_x, n_y-2} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, n_y-2} & \bar{\alpha}_{-n_x+2, n_y-2} & \dots & \bar{\alpha}_{0, n_y-2} & \dots & \bar{\alpha}_{n_x-2, n_y-2} & \bar{\alpha}_{n_x-1, n_y-2} & \bar{\alpha}_{n_x, n_y-2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{\alpha}_{-n_x, n_y-2} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, 0} & \bar{\alpha}_{-n_x+2, 0} & \dots & \bar{\alpha}_{0, 0} & \dots & \bar{\alpha}_{n_x-2, 0} & \bar{\alpha}_{n_x-1, 0} & \bar{\alpha}_{n_x, 0} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{\alpha}_{-n_x, -n_y+2} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, -n_y+2} & \bar{\alpha}_{-n_x+2, -n_y+2} & \dots & \bar{\alpha}_{0, -n_y+2} & \dots & \bar{\alpha}_{n_x-2, -n_y+2} & \bar{\alpha}_{n_x-1, -n_y+2} & \bar{\alpha}_{n_x, -n_y+2} & \dots \\ \bar{\alpha}_{-n_x-1, -n_y+2} & \bar{\alpha}_{-n_x, -n_y+2} & \bar{\alpha}_{-n_x-1, -n_y+1} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, -n_y+1} & \bar{\alpha}_{-n_x+2, -n_y+1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \bar{\alpha}_{0, -n_y+1} & \bar{\alpha}_{-n_x-2, -n_y+1} & \bar{\alpha}_{-n_x-1, -n_y+1} & \bar{\alpha}_{-n_x, -n_y+1} & \bar{\alpha}_{-n_x-1, -n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x, -n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, -n_y} & \dots & \dots \\ \bar{\alpha}_{-n_x+2, -n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x+1, -n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x, -n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x-1, -n_y} & \bar{\alpha}_{-n_x-2, -n_y} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \quad (1)$$

Чётный характер табл. 1 частотного взвешивания определяет равенство численных значений уровня её элементов $\bar{\alpha}_{\pm\mu, \pm\chi}$, симметрично расположенных по отношению к позиции элементов $\bar{\alpha}_{0,0}$ и центральных строки и столбца. Относительные значения элементов табл. 1 получим делением каждого элемента на значение $\bar{\alpha}_{0,0}$ и затем найдём преобразованные значения всех элементов $\alpha_{\pm\mu, \pm\chi}$ таблицы, в которой каждый из них определяется соответствующим частным от деления единицы на полученное относительное значение.

Таблица 1

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 11 | 10 | 16 | 24 | 40 | 51 | 61 |
| 12 | 12 | 14 | 19 | 26 | 58 | 60 | 55 |
| 14 | 13 | 16 | 24 | 40 | 57 | 69 | 56 |
| 14 | 17 | 22 | 29 | 51 | 87 | 80 | 62 |
| 18 | 22 | 37 | 56 | 68 | 109 | 103 | 77 |
| 24 | 35 | 55 | 64 | 81 | 104 | 113 | 92 |
| 49 | 64 | 78 | 87 | 103 | 121 | 120 | 101 |
| 72 | 92 | 95 | 98 | 112 | 100 | 103 | 99 |

Таблица 2

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.000 | 1.454 | 1.600 | 1.000 | 0.667 | 0.400 | 0.314 | 0.262 |
| 1.333 | 1.333 | 1.143 | 0.842 | 0.616 | 0.276 | 0.267 | 0.291 |
| 1.143 | 1.231 | 1.000 | 0.667 | 0.400 | 0.281 | 0.232 | 0.286 |
| 1.143 | 0.941 | 0.727 | 0.551 | 0.314 | 0.184 | 0.200 | 0.258 |
| 0.889 | 0.727 | 0.432 | 0.286 | 0.235 | 0.147 | 0.155 | 0.208 |
| 0.667 | 0.457 | 0.286 | 0.250 | 0.197 | 0.154 | 0.142 | 0.174 |
| 0.326 | 0.250 | 0.205 | 0.184 | 0.155 | 0.132 | 0.133 | 0.158 |
| 0.222 | 0.174 | 0.168 | 0.163 | 0.143 | 0.16 | 0.155 | 0.162 |

Нижний правый квадрант (оси координат делят общую плоскость на четверти или квадранты) варианта таблицы частотного взвешивания коэффициентов пространственного спектра блоков сигналов яркости с включением соответствующих элементов участков центральной строки и центрального столбца, предложенный

группой JPEG, представлен в табл. 1. Преобразованные значения $\alpha_{\mu, -\chi}$ элементов правого нижнего квадранта табл. 1, показанные в табл. 2, иллюстрируют степень изменения значений коэффициентов с увеличением значений пространственных частот по горизонтальному, вертикальному и другим направлениям. По существу, все четыре квадранта, соответствующие табл. 2, определяют совокупностью своих элементов $\alpha_{\pm j, \pm i}$ дискретные отсчеты характеристики коэффициента передачи фильтра низких пространственных частот, которая (в идеализированном случае) может быть отражена соответствующей совокупностью взвешенных дельта-функций

$$S_d(\omega_x, \omega_y) = \sum_{\mu=-n_x}^{\mu=n_x} \sum_{\chi=-n_y}^{\chi=n_y} \alpha_{\pm\mu, \pm\chi} \delta(\omega_x - \mu\omega_{x0}) \delta(\omega_y - \chi\omega_{y0}). \quad (2)$$

Соответствующая импульсная характеристика определяется соотношением

$$g_0(t_x, t_y) = \sum_{\mu=-n_x}^{\mu=n_x} \sum_{\chi=-n_y}^{\chi=n_y} \alpha_{\pm\mu, \pm\chi} \exp(-jt_x \mu\omega_{x0} - jt_y \chi\omega_{y0}). \quad (3)$$

С учётом значения частоты дискретизации и числа отсчётов в блоке ТВ сигнала, определим в частотном пространстве $f_{x0} = f_{y0} = 0.9 \cdot 10^6$ условной единицы. Общая импульсная характеристика (ИХ) может быть, с некоторым приближением, вычислена в данном случае как сумма характеристик, соответствующих строкам преобразованной матрицы (1). При этом общая ИХ такого фильтра может быть представлена в виде, например, суммы составляющих, соответствующих строкам всех четырёх квадрантов. С учётом чётности преобразованной матрицы и значений $\alpha_{\pm j, \pm i}$, входящих в выражение (3), каждая из таких составляющих выражается суммой соответствующих косинусов. Следовательно, имеют место следующие составляющие $g_k(t_x, t_y)$ для общего (интегрального) выражения:

$$\begin{aligned} g_{00}(0, 0) &= 1 \\ g_{10}(t_x, 0) &= 2 \cdot 1.454 \cos(2\pi f_{0x} t_x) + 2 \cdot 1.6 \cos(2\pi 2 f_{0x} t_x) + \dots + 2 \cdot 0.314 \cdot \cos(2\pi 6 f_{0x} t_x) + 2 \cdot 0.262 \cos(2\pi 7 f_{0x} t_x) \\ g_{01}(0, t_y) &= 2 \cdot 1.333 \cos(2\pi f_{0y} t_y) + 2 \cdot 1.143 \cos(2\pi 2 f_{0y} t_y) + \dots + 2 \cdot 0.326 \cos(2\pi 6 f_{0y} t_y) + 2 \cdot 0.222 \cos(2\pi 7 f_{0y} t_y) \\ g_2(t_x, t_y) &= 2 \cdot 1.333 (\cos(2\pi f_{0x} t_x + 2\pi f_{0y} t_y) + \cos(2\pi f_{0x} t_x - 2\pi f_{0y} t_y)) + 2 \cdot 1.143 (\cos(2\pi 2 f_{0x} t_x + 2\pi f_{0y} t_y) + \cos(2\pi 2 f_{0x} t_x - 2\pi f_{0y} t_y)) + \dots + 2 \cdot 0.291 (\cos(2\pi 7 f_{0x} t_x + 2\pi f_{0y} t_y) + \cos(2\pi 7 f_{0x} t_x - 2\pi f_{0y} t_y)) \\ g_3(t_x, t_y) &= 4 \cdot 1.231 (\cos(2\pi f_{0x} t_x + 2\pi 2 f_{0y} t_y) + \cos(2\pi f_{0x} t_x - 2\pi 2 f_{0y} t_y)) + 2 \cdot 1.0 (\cos(2\pi 2 f_{0x} t_x + 2\pi 2 f_{0y} t_y) + \cos(2\pi 2 f_{0x} t_x - 2\pi 2 f_{0y} t_y)) + \dots + 2 \cdot 0.286 (\cos(2\pi 7 f_{0x} t_x + 2\pi 2 f_{0y} t_y) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \cos(2\pi 7 f_{0x} t_x - 2\pi 2 f_{0y} t_y)) \\ &\quad \vdots \\ g_8(t_x, t_y) &= 2 \cdot 0.174 (\cos(2\pi f_{0x} t_x + 2\pi 7 f_{0y} t_y) + \cos(2\pi f_{0x} t_x - 2\pi 7 f_{0y} t_y)) + 2 \cdot 0.168 (\cos(2\pi 2 f_{0x} t_x + 2\pi 7 f_{0y} t_y) + \cos(2\pi 2 f_{0x} t_x - 2\pi 7 f_{0y} t_y)) + \dots + \\ &+ 2 \cdot 0.162 (\cos(2\pi 7 f_{0x} t_x + 2\pi 7 f_{0y} t_y) + \cos(2\pi 7 f_{0x} t_x - 2\pi 7 f_{0y} t_y)) + \end{aligned} \quad (4)$$

Как уже отмечалось, результирующее выражение для ИХ в данном частном случае определяется суммой составляющих (4). Относительное значение данной расчётной функции запишем в следующем виде:

$$g_0(t_x, t_y) = \sum_{k=1}^{k=8} g_k(t_x, t_y) / \sum_{k=1}^{k=8} g_k(0, 0). \quad (5)$$

На рис.1, а) представлены результаты вычислений относительной результирующей ИХ частотного взвешивания коэффициентов пространственного спектра блоков сигналов яркости по стандарту JPEG, осуществлённых в соответствии с табл. 2 и соотношениями (4, 5). Вид результирующей ИХ в данном случае, с некоторым приближением, определяется первым лепестком вычисленной функции. Следует учитывать возможность реализации различной конфигурации сечений расчётной результирующей ИХ при анализе частных случаев. Можно выбирать, например, различные зависимости между координатами по осям $0t_x, 0t_y$. Другим вариантом сечений является выбор различных, например, последовательностей (распределений коэффициентов спектра) пространственных частот в соотношениях (4, 5) и, наконец, можно получать комбинации распределений по частотам и по осям $0t_x, 0t_y$. Простейшими реализациями первого варианта является фиксация $t_y = 0$; $t_x = 0$; $t_x = t_y$. Подстановка указанных значений $t_y = 0$; $t_x = 0$; $t_x = t_y$ в соотношения (4, 5) определяют соответствующие частные совокупности данных соотношений. Простейшими реализациями второго варианта является фиксация $\mu = 0$; $\chi = 0$; $\mu = \chi$ ($-\mu = -\chi$, $\mu = -\chi$, $-\mu = \chi$). Подстановка указанных, например, значений $\chi = 0$; $\mu = 0$; $\mu = \chi$ в соотношения (2, 3, 4, 5) позволит получить соответствующие другие частные совокупности данных соотношений. При выполнении условия $t_y = 0$ имеем в реальном пространстве зависимости преобразования общей совокупности соотношений. Данный частный случай с некоторым приближением определяет изменение, после частотного взвешивания (коэффициентов спектра) в пределах блока, формы протяжённых, вертикально ориентированных границ (линий).

Зависимость 1 на рис. 1, б) отражает специфику изменения формы ИХ для такого условия. Зависимость 2 на рис. 1, б) демонстрирует вариант выполнения условия $t_x = 0$, а зависимость 3 $t_x = t_y$. Присутствие достаточно протяжённых, трапецеидального вида, компонент в форме главного лепестка зависимостей 1 и 2 (рис. 1, б)), рассматриваемых реализаций ИХ, свидетельствует о наличии соответствующего подъёма перед квантованием относительного уровня составляющих

спектра воздействия, ограниченного блоком, в области низких пространственных частот. И в то же время, наличие относительно короткой, импульсного типа, компоненты главного лепестка в сочетании с колебательной отражает относительно высокую степень сохранения и даже наличие подъёма частотных составляющих в области верхних пространственных частот. Реализация ИХ, изображённая зависимостью 3 (рис. 1. б), свидетельствует об относительно плавном подавлении, в данном случае ($t_x = t_y$) частотного взвешивания, уровня составляющих пространственного спектра воздействия с увеличением пространственных частот.

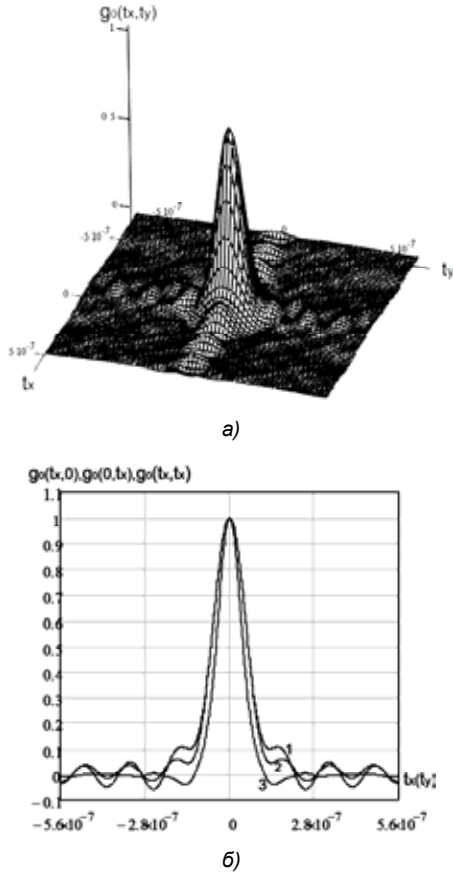


Рис. 1. Результаты вычисления относительной ИХ частотного взвешивания коэффициентов пространственно-го спектра блоков сигналов яркости по стандарту JPEG:

а) результирующая расчётная ИХ;

б) результаты расчётов сечений ИХ:

1 - при $t_y = 0$; 2 - при $t_x = 0$; 3 - при $t_x = t_y$.

Подстановка значений $\chi = 0$; $\mu = 0$; $\mu = \chi$ в (4, 5) определяется частными относительными соотношениями:

$$g_{0\mu}(t_x, 0) = \frac{g_{00}(0, 0) + g_{10}(t_x, 0)}{g_{00}(0, 0) + g_{10}(0, 0)};$$

$$g_{0\chi}(0, t_y) = \frac{g_0(0, 0) + g_{01}(0, t_y)}{g_0(0, 0) + g_{01}(0, 0)}; \quad g_{0\mu\mu}(t_x, t_y) = \frac{g_{\mu\mu}(t_x, t_y)}{g_{\mu\mu}(0, 0)},$$

где

$$g_{\mu\mu}(t_x, t_y) = g_{00}(0, 0) + 2 \cdot 1.333 \cos(2\pi f_{0x} t_x + 2\pi f_{0y} t_y) + 2 \cdot 1.0 \cos(2\pi 2 f_{0x} t_x + 2\pi 2 f_{0y} t_y) + 2 \cdot 0.552 \times \cos(2\pi 3 f_{0x} t_x + 2\pi 3 f_{0y} t_y) + 2 \cdot 0.235 \cos(2\pi 4 f_{0x} t_x + 2\pi 4 f_{0y} t_y) + 2 \cdot 0.154 \cos(2\pi 5 f_{0x} t_x + 2\pi 5 f_{0y} t_y) +$$

$$+ 2 \cdot 0.133 \cos(2\pi 6 f_{0x} t_x + 2\pi 6 f_{0y} t_y) + 2 \cdot 0.162 \times \cos(2\pi 7 f_{0x} t_x + 2\pi 7 f_{0y} t_y) \quad (6)$$

В первом случае предполагается наличие постоянно-го уровня составляющих спектра воздействия только по оси $0f_x$ и обнуление по всем другим координатам, во втором – только по оси $0f_y$, в третьем – только под со-рок пять градусов (по сечению через первый и третий квадранты).

Наличие соотношений для частных реализаций ИХ позволяет осуществить приблизительный анализ специфики соответствующих характеристик в частотном пространстве. Одним из относительно простых вариантов выполнения такого анализа является представление (в интервале главного лепестка) полученных сечений ИХ в виде последовательности дискретных отсчётов, следующих с достаточно высокой (в реальном пространстве) частотой, обеспечивающей низкую степень вносимых нелинейных искажений. При этом, за счёт ограничения интервала анализа в реальном пространстве имеет место выявление огибающей в частотной области. Задаваясь, например, интервалом дискретизации, равным в пространстве $T_x = 0,1 \cdot 10^{-7}$ условной единицы реального пространства, получим с использованием соотношений (4, 5, 6) совокупность отсчётов, соответствующих, например дискретизированному с заданным периодом, различным вариантам указанных выше функций сечений $g_0(t_x, 0)$, $g_{0\mu}(t_x, 0)$, $g_{0\mu\mu}(0,5t_x, 0,5t_y)$, представленных соответствующими зависимостями на рис. 1, б и 2, а. В частности, последовательность (в количестве 56) отсчётов, соответствующая дискретному варианту $g_0^d(t_x, 0)$ – зависимость 1 на рис. 1, б, может быть вычислена и представлена в следующем виде:

$$g_0^d(\pm 0, 0) = 1.0, \quad g_0^d(\pm 0.1 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.983, \\ g_0^d(\pm 0.2 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.932, \quad g_0^d(\pm 0.3 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.853, \dots \\ g_0^d(\pm 1.1 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.135, \dots, \quad g_0^d(\pm 1.4 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.108, \\ g_0^d(\pm 1.5 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.112, \quad g_0^d(\pm 1.6 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.114, \\ g_0^d(\pm 1.7 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.11, \dots, \quad g_0^d(\pm 2.2 \cdot 10^{-7}, 0) = -4,115 \cdot 10^{-3}, \\ \dots, \quad g_0^d(\pm 2.6 \cdot 10^{-7}, 0) = -0.05, \dots \\ g_0^d(\pm 2.9 \cdot 10^{-7}, 0) = 2,124 \cdot 10^{-3}, \dots, \quad g_0^d(\pm 3.3 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.056, \\ \dots, \quad g_0^d(\pm 3.7 \cdot 10^{-7}, 0) = 1,12 \cdot 10^{-3}, \dots \\ g_0^d(\pm 4.1 \cdot 10^{-7}, 0) = -0.043, \dots \\ g_0^d(\pm 4.4 \cdot 10^{-7}, 0) = -8,451 \cdot 10^{-3}, \dots, \quad g_0^d(\pm 4.8 \cdot 10^{-7}, 0) = 0.041, \\ \dots, \quad g_0^d(\pm 5.3 \cdot 10^{-7}, 0) = -8,927 \cdot 10^{-3}, \dots \\ g_0^d(\pm 5.6 \cdot 10^{-7}, 0) = -0.027. \quad (7)$$

В частотном пространстве ограниченной по протяженности последовательности отсчётов (7) соответствует характеристика передачи:

$$S_0(f_x) = 1.0 + 2 \cdot 0.983 \cos(2\pi T_x f_x) + 2 \cdot 0.932 \cos(2\pi 2T_x f_x) + 2 \cdot 0.853 \cos(2\pi 3T_x f_x) + \dots \\ + 2 \cdot 0.11 \cos(2\pi 17T_x f_x) + \dots - 2 \cdot 0.004115 \cos(2\pi 22T_x f_x) - \\ - 2 \cdot 0.05 \cos(2\pi 26T_x f_x) - \dots + 2 \cdot 0.056 \cos(2\pi \cdot 33T_x f_x) + \dots \\ - 2 \cdot 0.043 \cos(2\pi 41T_x f_x) - \dots + 2 \cdot 0.041 \cos(2\pi 48T_x f_x) + \dots$$

$$-2 \cdot 0.027 \cos(2\pi 56 T_x f_x). \quad (8)$$

Аналогичным образом могут быть вычислены, согласно полученным выше аналитическим выражениям, последовательности отсчётов и характеристики передачи $S_{0\mu}(f_x)$ и $S_{0\mu\mu}(f_x, f_x)$, соответствующие функциям сечений $g_{0\mu}(t_x, 0)$ и $g_{\mu\mu}(t_x, t_y)$.

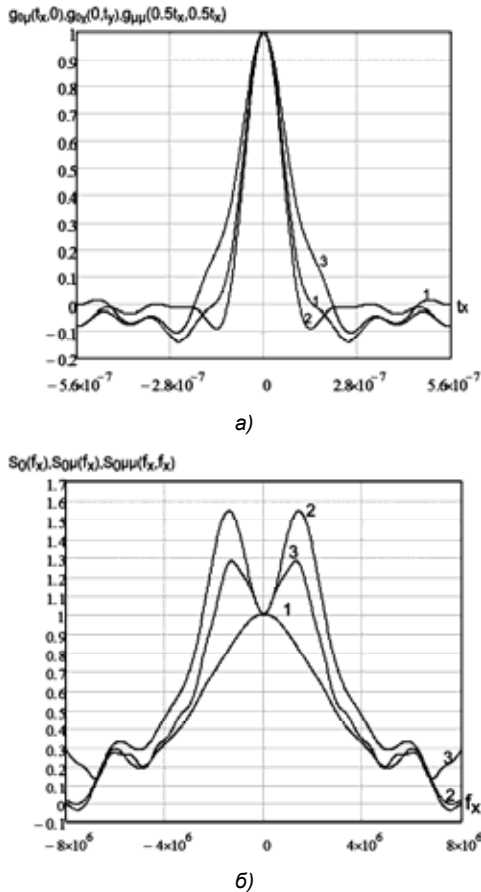


Рис. 2. Результаты вычисления сечений ИХ и характеристик передачи составляющих спектра частных воздействий:
 а) расчётные сечения ИХ при $\chi = 0$, $\mu = 0$, $\mu = \chi$ - соответственно зависимости 1,2,3;
 б) результаты расчётов характеристик передачи, полученных для сечений $g_0(t_x, 0)$, $g_{0\mu}(t_x, 0)$, $g_{0\mu\mu}(0.5t_x, 0.5t_y)$ - соответственно зависимости 1,2,3

Зависимостями на рис. 2, а) продемонстрированы расчётные варианты частных сечений $g_{0\mu}(t_x, 0)$; $g_{0\chi}(0, t_y)$; $g_{0\mu\mu}(t_x, t_y)$ при $\chi = 0$, $\mu = 0$ и $\mu = \chi$, зависимостями – рис. 2, б) – вычисленные характеристики передачи, соответствующие в частотном пространстве частным сечениям $g_0(t_x, 0)$, $g_{0\mu}(t_x, 0)$, $g_{0\mu\mu}(0.5t_x, 0.5t_y)$ соотношения (4) для ИХ.

Согласно результатам расчёта, представленным на рис. 1 и рис. 2, сечения ИХ, полученные для различных вариантов распределения (последовательностей) отсчётов спектра воздействия фиксированной амплитуды в пределах блока, существенно отличаются по виду и свидетельствуют о том, что при частотном взвешивании имеют место отличающиеся по типу преобразования исходного вида таких последовательностей. Указанные преобразования можно подразделить на варианты интегрального и варианты интегрально-дифференциального

типов. К первому типу можно отнести трансформации вида (сечения) ИХ, приведённые на рис. 1, б, а ко второму, с некоторым приближением, сечения ИХ, показанные на рис. 2, а. При этом, в первом случае, согласно зависимости 1 рис. 2, б, имеет место, при частотном взвешивании, относительный подъём составляющих спектра воздействия в области низких частот, который во втором случае (зависимости 2, 3 на рис. 2, б) сочетается с более высокой степенью подъёма в локальной зоне ($\approx (0.3 \div 1.5) \cdot 10^6$) низкочастотного участка спектра исходного воздействия.

Вычислительный анализ специфики двумерной характеристики частотного взвешивания коэффициентов пространственного спектра блоков сигналов яркости по стандарту JPEG

Совокупность дискретных элементов (табл. 2) частотного взвешивания определяет специфику распределённого в двумерном частотном пространстве амплитудного преобразования конкретной совокупности отсчётов (коэффициентов) спектра воздействия в пределах блока при квантовании. С учётом чётности, таблица частотного взвешивания, в идеализированном случае, может быть отражена соответствующей двумерной матрицей взвешенных дельта-функций (соотношение 2).

Выявление непрерывного вида дискретной характеристики частотного взвешивания $S_d(\omega_x, \omega_y)$ удобно осуществить на основе интегрального преобразования её дискретного варианта. Такое интегральное преобразование должно обеспечить эффективное выделение составляющих двумерной огибающей дискретного спектра и подавление гармоник дискретизации более высокого порядка. Для уменьшения протяжённости переходных процессов осуществим выделение упомянутой огибающей в соответствии с соотношением следующего вида:

$$S_n(\omega_x, \omega_y) = S_d(\omega_x, \omega_y) \otimes P(\omega_x, \omega_y) = \sum_{\mu=-n_x}^{\mu=n_x} \sum_{\chi=-n_y}^{\chi=n_y} \alpha_{\pm\mu, \pm\chi} P(\omega_x - \mu\omega_{x0}) P(\omega_y - \chi\omega_{y0}),$$

где

$$P(\omega_x, \omega_y) = \left[\frac{\sin(2\pi f_x T_x \cdot 7.5 + 10^{-16})^3}{(2\pi f_x T_x \cdot 7.5 + 10^{-16})} \right]^3 \times \left[\frac{\sin(2\pi f_y T_y \cdot 7.5 + 10^{-16})}{(2\pi f_y T_y \cdot 7.5 + 10^{-16})} \right]^3 \text{ и } T_x = T_y = 0.0465 \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

По существу вычислительное выявление непрерывного вида дискретной характеристики частотного взвешивания в данном случае, как следует из соотношения (9), выполняется за счёт позиционирования функции $P(\omega_x, \omega_y)$ с заданным (для конкретной точки наличия дискретных элементов табл. 2) весом в каждой точке четырёх квадрантов плоскости $\omega_x 0 \omega_y$. При этом, имеет место интегральное преобразование дискретной характеристики частотного взвешивания $S_d(\omega_x, \omega_y)$ в непрерывный вид за счёт заполнения соответствующей матрицы в плоскости $\omega_x 0 \omega_y$ совокупностью взвешенных функций $P(\omega_x, \omega_y)$.

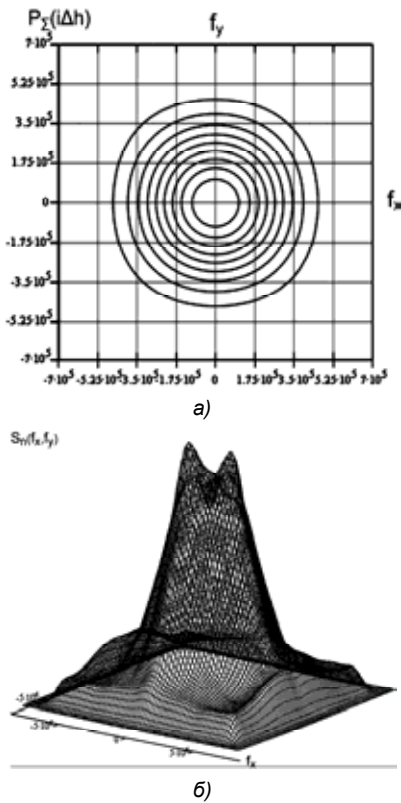


Рис. 3. Проекция совокупности на плоскость $f_x 0 f_y$

сечений фиксированных изменений уровня функции интегрального преобразования дискретной характеристики частотного взвешивания (а) и общего вида вычисленной интегрированием двумерной функции её огибающей (б)

Выбор вида функции $P(\omega_x, \omega_y)$ должен обеспечивать в данном случае минимальную степень интегральных искажений огибающей и в достаточной мере подавить остаточные составляющие дискретизации. Соответственно, анизотропия в форме функции $P(\omega_x, \omega_y)$ должна быть сопряжена со спецификой распределения дискретных элементов табл. 2 в квадрантах плоскости $\omega_x 0 \omega_y$, т.е. учитывать увеличение периода следования дискретных элементов таблицы в направлении (плоскость $\omega_x 0 \omega_y$) под сорок пять градусов. На рис. 3, а, б отображена специфика изменений $P(i\Delta h)$ проекций совокупности сечений (квантование по уровню) фиксированных (Δh) изменений уровня h выбранной функции $P(2\pi f_x, 2\pi f_y)$ на плоскость $f_x 0 f_y$ и общего вида двумерной функции огибающей дискретной характеристики частотного взвешивания $S_n(2\pi f_x, 2\pi f_y)$, вычисленных в соответствии с соотношениями 9.

По виду совокупности сечений выбранной (соотношение 9), рис. 3, а функции интегрального преобразования типа $P(f_x, f_y) = [\sin c(\omega_x T_{x0}) \sin c(\omega_y T_{y0})]^3$ можно установить, что для данной функции по сравнению, например, с вариантом $P(f_x, f_y) = [\sin c(\omega_x T_{x1}) \sin c(\omega_y T_{y1})]$ характерен достаточно высокий и относительно равномерный градиент падения уровня при увеличении аргументов, очень низкий (менее процента) уровень сопутствующих

разнополярных выбросов по осям $0 f_x$ и $0 f_y$ и, согласно последнему, незначительная эквивалентная длительность переходных процессов при реализации интегрирования. К тому же, радиус показанных на рис. 3 сечений несколько возрастает под углом сорок пять градусов в плоскости $f_x 0 f_y$. Последнее позволяет снизить искажения, сопутствующие реализуемому, при выделении огибающей, интегрированию, которые обусловлены увеличением расстояния между отсчётами (табл. 2) под углом, в плоскости $f_x 0 f_y$, сорок пять градусов.

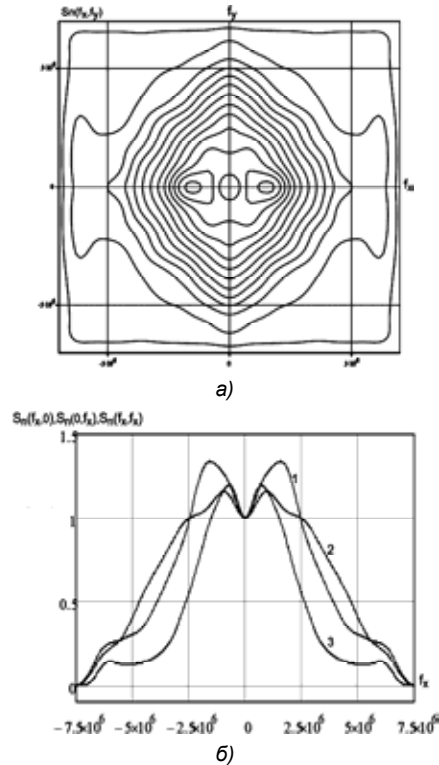


Рис.4. Проекция на плоскость $f_x 0 f_y$ совокупности сечений фиксированных изменений уровня функции интегральной огибающей характеристики частотного взвешивания – (а) и её сечений (б): 1 – $S_n(f_x, 0)$, $S_n(0, f_x)$, $S_n(f_x, f_x)$

На рис. 4, а показан результат вычисления проекций совокупности сечений (результат квантования по уровню) фиксированных изменений уровня расчётной функции огибающей дискретной характеристики частотного взвешивания $S_n(2\pi f_x, 2\pi f_y)$ на плоскость $f_x 0 f_y$; на рис. 4, б показаны зависимости 1, 2, 3 частных сечений данной огибающей, соответственно, при $f_y = 0$, $f_x = 0$ и $f_x = f_y$.

Результаты анализа. Заключение

Сопоставление расчётных данных и зависимостей, полученных выше при проведении вычислительного анализа, выявляет существенное влияние на результат реализации частотного взвешивания особенностей распределения коэффициентов спектра каждой частной реализации пространственной структуры изображения в пределах блока. Полученные, с использованием разработанных принципов вычислительного анализа соотношения и зависимости, представленные на рис. 1-4, отра-

зили жёсткую связь эмпирически полученных таблиц в матричном представлении с характеристиками зрительного анализатора человека [6, 7, 9]. Прежде всего следует отметить, что относительный подъём в области низких пространственных частот и соответствующее увеличение точности их передачи при сжатии обеспечивается при обратном частотном преобразовании весовую трансформацию пространственных составляющих спектра искажений сжатия и помех в область относительно высоких пространственных частот, т.е. в область пониженной заметности. Соответственно расчётным результатам, представленных зависимостями 1 рис. 1, б и рис. 2, б), наиболее высокая точность в части передачи низких пространственных частот обеспечивается при кодировании низкочастотных вертикально ориентированных составляющих значительной протяжённости. Именно такие составляющие существенно влияют на визуальную идентификацию объектов. Трансформация возникающих искажений сжатия (блочность) в область верхних пространственных частот, в данном случае, позволяет (из-за сокращения протяжённости переходов) эффективно использовать адаптивную сглаживающую фильтрацию для снижения заметности возникающих, в смежных блоках, составляющих блочной структуры и сопряжения пространственной структуры изображений на их границах. Следует также отметить наличие локальных корректирующих преобразований (относительный подъём составляющих спектра в диапазоне $\approx (0.3 \div 1.5) \cdot 10^6$ условной частоты) в области их максимальной заметности [6, 7, 9], что иллюстрируется зависимостью 2 на рис. 2, б, двумерной функцией огибающей на рис. 3, б и зависимостью 1 на рис. 4, б. При обратном частотном преобразовании имеет место сопутствующее подавление соответствующих составляющих спектра, возникших при реализации его сжатия.

По существу результат вычисления проекций на плоскость $f_x 0 f_y$ совокупности сечений фиксированных изменений уровня функции интегральной огибающей характеристики частотного взвешивания, представленный на рис. 4, а), отражает трансформации конфигурации границ области воспроизводимых (пропускания) пространственных частот при воздействии с фиксированным уровнем спектра и последовательном огрублении (возрастании степени сжатия) шкалы квантования. При выборе низкой степени сжатия имеет место существенное преимущество по сохранению (существенно влияющих на визуальное качество ТВ изображений) высокочастотных в горизонтальном направлении, но относительно низкочастотных в вертикальном, составляющих спектра реализаций в пределах блока. Следует отметить в данном случае и дополнительное увеличение точности передачи в вертикальном направлении наиболее высокочастотных составляющих горизонтального направления. В условиях последующего возрастания степени сжатия конфигурация границ области воспроизводимых пространственных частот, при воздействии с фиксированным уровнем пространственного спектра, приобретает, как и ожидалось, ромбовидный вид. При максимальной степени сжатия более высокая точность передачи обеспечивается, согласно рис. 4, а, в горизонтальном направлении, а конфигурации границ области воспроизводимых пространственных частот при воздей-

ствии с фиксированным уровнем спектра теряют ромбовидный характер по оси $0 f_y$.

По существу учтённые вариантом, подвергнутой данному вычислительному анализу эмпирической таблицы, особенности характеристик и функционирования зрительной системы человека не исчерпаны. Выполненные работы [7] показывают наличие здесь дополнительных резервов, использование которых может существенно увеличить степень сжатия спектров ТВ изображений в системах цифрового телевидения.

Литература

1. А.с. 748903 СССР Способ передачи и воспроизведения сигнала изображения / Безруков В.Н. – Заявл. 1976. – Опубл. 1980, Бюлл. № 26.
2. А.с.1211892 СССР Способ формирования телевизионного сигнала цветного изображения и устройство для реализации/Безруков В.Н. – Заявл. 1983. – Опубл. – 1986, Бюлл. № 6.
3. Безруков В.Н., Романов С.Г., Седов М.О. Адаптивность при сжатии спектра сигналов изображений в система цифрового телевидения // Электросвязь. – 2013. – № 3. – С.22-26.
4. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
5. Безруков В.Н. О некоторых особенностях характеристик зрительной системы наблюдателя телевизионных изображений / Труды учебных институтов связи. – 1976. – Вып.74. – С.28 – 36.
6. Безруков В.Н., Королёв А.В., Ляпунов В.Н., Новаковская О.С. Выбор параметров систем телевидения высокой визуальной чёткости и качества // Техника кино и телевидения. – 1985, – №10, – С.22-28.
7. Безруков В.Н. Специфика видеоконтроля изображений вещательного телевидения, Материалы международного конгресса НАТ. – Москва, 2002, – С. 215-216.
8. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеотелекоммуникационные системы (теория и практика). М.: Техносфера, 2012. – 1007 с
9. Безруков В.Н., Балобанов В.Г. Системы цифрового вещательного и прикладного телевидения. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 607 с.

PRINCIPLES FOR COMPUTATIONAL ANALYSIS OF IMAGE SIGNAL PIXEL BLOCK SPECTRUM QUANTIZATION CHARACTERISTICS IN DIGITAL TELEVISION SYSTEMS

Bezrukov V.N.

Matrix representation of frequency weights tables in spectrum coefficients quantation in JPEG and MPEG makes it difficult to find out specificity of that transform and its connection to the vision characteristics. The principles of computational analysis of these connections using the variant of frequency weights table for luma signal blocks proposed by JPEG are designed. The computational analysis of two-dimensional impulse response, corresponding to this table and its slices was held. It was proposed to use discretisation in transform of the mentioned impulse response or its slices into the frequency domain for computational analysis of corresponding one-dimensional (two-dimensional) functions of transform coefficients. Based on this integral transform the function of two-dimensional envelope is picked out and the analysis of considered frequency weights matrix table subtle features is held out. The rigid connection of this empirical variant of table with spatial frequency characteristics of human vision system is shown.