

Т.М. СУХОВ, С.Ю. СТРАХОВ, Л.Б. КОЧИН, Е.А. БЕЛЯЕВ
**ПРИМЕНЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ПОСТОЯННОЙ
ЦВЕТОВОЙ ЯРКОСТИ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ
КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ**

Сухов Т.М., Страхов С.Ю., Кочин Л.Б., Беляев Е.А. Применение и реализации принципа постоянной цветовой яркости в цифровых системах кодирования видеоинформации.

Аннотация. Современные средства обработки потока видеоданных для цветowego кодирования используют принцип постоянной яркости, предложенный при разработке аналоговой системы цветного телевидения NTSC. Этот принцип, как и его реализации, не свободен от недостатков: потеря информации о четкости кодируемых цветных изображений, ухудшение различимости ахроматических деталей по мере увеличения насыщенности цветов и другие. Кроме того, применение прореживания цветоразностных компонентов (4:2:2, 4:2:0, 4:1:1) в цифровых системах обработки видеоданных также искажает декодируемое видеоизображение.

Для кодирования цветовой видеоинформации существует альтернативный подход — применение принципа постоянной цветовой яркости. В работе представлен сравнительный анализ принципов постоянной яркости и постоянной цветовой яркости. Показано, что при использовании принципа постоянной цветовой яркости можно получить выигрыш более 6 дБ.

В работе предлагаются вещественная и целочисленные реализации принципа постоянной цветовой яркости. Выполнен сравнительный анализ разработанных реализаций и целочисленной реализации принципа постоянной яркости, показавший преимущество использования принципа постоянной цветовой яркости для некоторых современных процессоров.

Повышения качества декодируемых изображений в цифровых системах кодирования видеоинформации можно достичь, применив принцип постоянной цветовой яркости.

Ключевые слова: принцип постоянной яркости, принцип постоянной цветовой яркости, целочисленные преобразования цветowego пространства, сравнение преобразований цветowego пространства.

1. Введение. Человеческий зрительный анализатор, в соответствии с трехцветной теорией цвета [1-3], воспринимает результирующий цвет как сочетание трех основных цветов — красного, синего и зеленого. Поэтому все цвета можно выразить комбинацией этих трех «главных» цветов (в теории цвета их называют опорными). Существует информационная модель зрительной системы [4, 5], согласно которой цветовые отклики основных цветов преобразуются в амплитуду равноэнергетического белого цвета и оппонентные отклики зрительной системы человека, которые несут информацию о насыщенности и цветовом тоне.

При разработке цветных аналоговых телевизионных систем были введены в строй такие системы передачи цветовой информации, как PAL, NTSC, SECAM и их модификации. Основой кодирования цве-

товой информации в этих системах является применение принципа постоянной яркости (ПЯ). При кодировании цветовой информации допускается сокращение пространственного разрешения цветоразностных компонентов в 1,5 и более раз.

Термином «черно-белое изображение» в настоящей работе обозначаются изображения, представленные в градациях серого цвета (англоязычный аналог — «*grayscale*»).

Цифровые телевизионные системы унаследовали от аналоговых принцип ПЯ.

В работе рассмотрен метод кодирования цветовой видеoinформации на основе принципа постоянной цветовой яркости (ПЦЯ), реализации которого имеют преимущества перед используемыми на данный момент реализациями ПЯ. Проведен сравнительный анализ, который показал преимущества принципа ПЦЯ при кодировании цветовой видеoinформации. Высокая вычислительная сложность существующей реализации ПЦЯ затрудняет его использование в цифровых системах кодирования видеoinформации. В работе предлагаются быстрые реализации этого принципа, а также их сравнение с существующими реализациями принципа ПЯ.

Статья построена следующим образом. Во втором разделе описан принцип ПЯ, используемый в существующих системах кодирования видеoinформации. В третьем разделе рассмотрены наиболее распространенные форматы прореживания цветоразностных компонентов для сокращения избыточности видеoinформации. Четвертый раздел посвящен анализу недостатков, возникающих в системах, реализованных на основе принципа ПЯ. В пятом разделе описан альтернативный подход, основанный на принципе ПЦЯ. Проведен сравнительный анализ принципов ПЯ и ПЦЯ, на основе которого сделан вывод, что при применении принципа ПЦЯ лучше сохраняется информация о разрешении по яркости и цветности кодируемых видеоизображений. В шестом разделе приведены программные реализации принципов ПЯ и ПЦЯ. Седьмой раздел посвящен сравнительному анализу реализаций указанных принципов, показано, что принцип ПЦЯ имеет преимущества при его реализации на некоторых современных процессорах. В заключении подведены итоги работы.

2. Принцип постоянной яркости. Подробно суть принципа постоянной яркости изложена в [6]. Первичные цветовые сигналы телевизионной камеры E_R , E_G , E_B после введения предвысказаний, необходимых для коррекции нелинейных характеристик устройств отображения [6], преобразуются в сигналы $E'_R = E^\gamma_R$, $E'_G = E^\gamma_G$, $E'_B = E^\gamma_B$,

где $\gamma = 0,45$, из которых далее формируются сигналы E'_Y , E'_{R-Y} , E'_{B-Y} . При выборе опорного источника белого C_{6500} (стандартный источник белого цвета, который соответствует полуденному освещению при сплошной облачности) уравнения связи между сигналами E'_R , E'_G , E'_B и сигналами E'_Y , E'_{R-Y} , E'_{B-Y} выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} E'_Y = 0,299E'_R + 0,587E'_G + 0,114E'_B, \\ E'_{R-Y} = 0,701E'_R - 0,587E'_G - 0,114E'_B, \\ E'_{B-Y} = -0,299E'_R - 0,587E'_G + 0,886E'_B. \end{cases} \quad (1)$$

Выбор другого опорного источника белого, например D_{6500} (стандартный источник белого цвета, соответствующий излучению абсолютно черного тела при 6504°K), приводит лишь к изменению значений коэффициентов в этих уравнениях.

Сигнал E'_Y содержит информацию о черно-белой составляющей изображения — яркости и называется яркостным сигналом [6]. Этот сигнал обеспечивает совместимость черно-белых и цветных систем телевидения и передается в более широкой полосе частот по сравнению с сигналами E'_{R-Y} , E'_{B-Y} , так как для наблюдения черно-белых изображений необходима максимальная четкость.

Сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} несут информацию о цветности изображения, то есть о цветовом тоне и насыщенности.

Реализация принципа ПЯ в цветных вещательных телевизионных системах способствовала их широкому распространению.

3. Прореживание цветоразностных компонентов. Международный комитет по телевидению и радиовещанию (МККР) рекомендовал для цифровых телевизионных студий основной цифровой стандарт с соотношениями полосы для сигналов яркости и цветности 4:2:2.

В цифровых системах обработки видеoinформации также как и в аналоговых применяется прореживание цветоразностных компонентов для сокращения цветовой избыточности, которое приводит к потере видеoinформации.

3.1. Форматы прореживания. Чтобы понять причины искажения изображений, возникающих при усреднении цветоразностных компонентов, рассмотрим наиболее распространенные форматы прореживания цветоразностных сигналов.

Наиболее распространенные форматы прореживания [7] представлены на рисунке 1. Чаще всего при обработке цветовой информации без

потерь применяется формат без прореживания цветоразностных компонентов (4:4:4). Часто встречаются также форматы с прореживанием вдвое по горизонтали (4:2:2) и с прореживанием вдвое как по горизонтали, так и по вертикали (4:2:0). В таких системах цветового кодирования, как PAL, SECAM, NTSC, используются форматы с прореживанием цветоразностных компонентов в четыре раза по горизонтали (4:1:1).

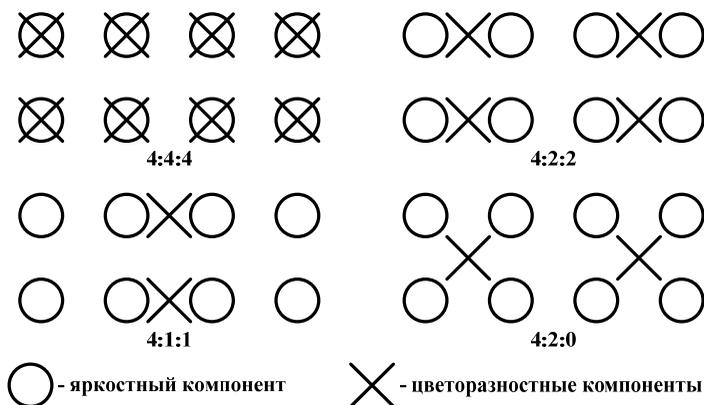


Рис. 1. Форматы прореживания цветоразностных отсчетов

Прореживание цветоразностных сигналов приводит к сокращению потока видеoinформации, что, однако, вызывает потери при передаче цветовой видеoinформации.

4. Недостатки принципа постоянной яркости. Основные недостатки принципа ПЯ: неточное воспроизведение яркости насыщенных цветов, ухудшение четкости в ахроматических деталях и изображениях по мере увеличения насыщенности цветов.

Численно характеризовать потери для различных цветов можно, используя коэффициент постоянной яркости K_L :

$$K_L = L_Y / L, \quad (2)$$

где L_Y — воспроизводимая яркость, L — номинальная яркость.

Рассмотрим случай, когда яркостный сигнал передается по каналу с большей пропускной способностью, чем канал, по которому передаются цветоразностные компоненты. Частотные характеристики системы передачи различных цветов оказываются в этом случае неодинаковыми (рисунок 2). Коэффициент постоянной яркости, заданный формулой (2), зависит от полосы пропускания канала связи.

Анализируя приведенный на рисунке 2 график можно сделать

вывод, что наибольшим потерям подвержены изображения, содержащие красный и синий цвета (29,9% и 11,4% соответственно). Потери для других цветов: пурпурный — 41,3%, зеленый — 58,7%, голубой — 70,1%, желтый — 88,6%.

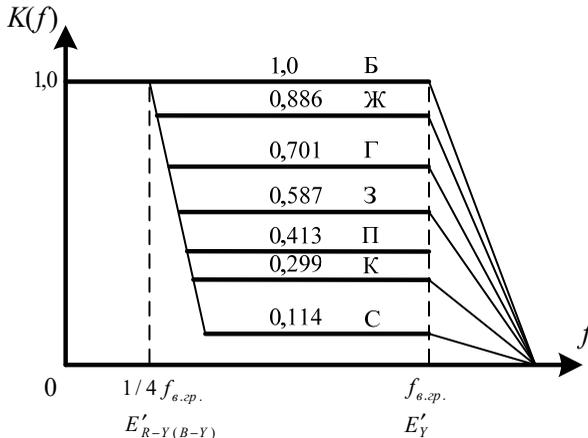


Рис. 2. Частотные характеристики передачи для различных цветов

Потеря видеоинформации из-за преобразований на основе принципа ПЯ недопустима в некоторых системах кодирования: цифровые системы видеонаблюдения [8], цифровые системы улучшенного видеона [9], в том числе работающие в условиях низкой освещенности [10], системы компьютерного зрения.

5. Принцип постоянной цветовой яркости. Кодирование цветовой видеоинформации можно осуществить, используя принцип ПЦЯ [6]. Преимущества и недостатки этого принципа рассмотрены в [6, 11].

Прямое цветовое преобразование согласно ПЦЯ можно осуществить следующим образом:

$$\begin{cases} E'_C = \sqrt{(E'_R)^2 + (E'_G)^2 + (E'_B)^2}, \\ E'_1 = E'_R / E'_C, \\ E'_2 = E'_B / E'_C, \end{cases} \quad (3)$$

где E'_C — цветовая амплитуда передаваемого цвета, E'_1 , E'_2 — насыщенность данного цвета красным и синим первичными цветами соответственно.

Обратное преобразование требует получения восстановленных гамма-корректированных цветов — красного и синего:

$$\begin{aligned} E'_R &= E'_C E'_1, \\ E'_B &= E'_C E'_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Восстановление зеленого цвета осуществляется по формуле:

$$E'_G = \sqrt{(E'_C)^2 - (E'_R)^2 - (E'_B)^2}. \quad (5)$$

Черно-белые изображения при кодировании с использованием принципа ПЦЯ передаются с полной четкостью, для них $E'_1 = E'_2 = const$, а все изменения передаются по более широкополосному каналу. При кодировании цветных изображений по более узкополосным каналам передается информация о количестве цветных деталей синими и красными цветами, а также изменения пурпурной составляющей цвета.

Использование принципа ПЦЯ позволит повысить эффективность кодирования цветовой информации для лучшего ее восприятия зрительной системой человека [6].

5.1. Сравнение по уровню искажений цветовых компонентов.

Сравнение уровня искажений при потере цветовой информации будем проводить с помощью общепринятой метрики [12] отношения пика сигнала к шуму (PSNR — peak signal-to-noise ratio). Для наглядности построим график зависимости уровня искажения изображения от количества отбрасываемых уровней цветоразностных отсчетов. Такой подход соответствует ранее описанным процедурам прореживания сигналов и дальнейшего кодирования компонентов современными стандартами сжатия видеoinформации [13].

Для сравнительного анализа преобразований предлагается следующий подход. Исходное изображение в формате RGB переводится в яркостные и цветоразностные составляющие с помощью преобразования, согласно принципам ПЯ или ПЦЯ, затем проводится скалярное квантование цветоразностных (цветностных) отсчетов, после чего — обратное преобразование в RGB. Для исходного и полученного RGB-изображений будем использовать метрику PSNR по каждой из составляющих в отдельности (R, G, B).

Стоит отметить, что большинство современных стандартов кодирования видеoinформации после цветового преобразования работают с сокращенным в 1,5–2 раза (в зависимости от формата прореживания) потоком, что равноценно квантованию и восстановлению отсчетов с коэффициентом 2. То есть, применяя прореживание согласно формату 4:2:2, цифровой поток сокращается в 1,5 раза относительно входного, при использовании формата 4:2:0 и 4:1:1 — в 2 раза. Также стоит отметить, что описанный подход характерен для большинства стандартов

сжатия видеоинформации с потерями, где устранение пространственно-временной избыточности достигается путем квантования трансформант с коэффициентами от 2 и более. Далее, после квантования трансформант в большинстве случаев выполняется сжатие полученного потока видеоинформации без потерь.

Для оценки взято изображение «flower_foveon» [14], насыщенное красным и синим цветами. Графики на рисунках 3-5 показывают зависимость уровня искажений восстановленных изображений (относительно оригинала) от коэффициента квантования для красного (3), зеленого (4) и синего (5) цветов.

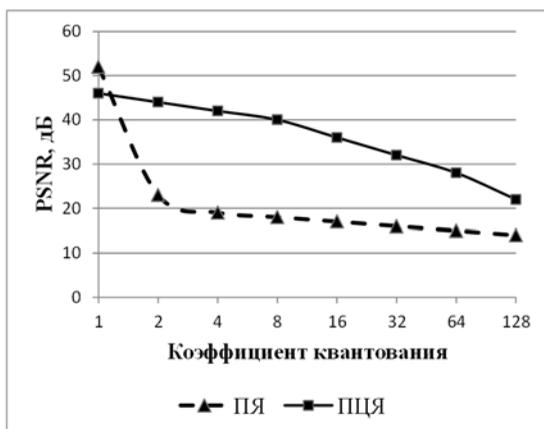


Рис. 3. Зависимость уровня искажения красного цвета восстановленного изображения от коэффициента квантования

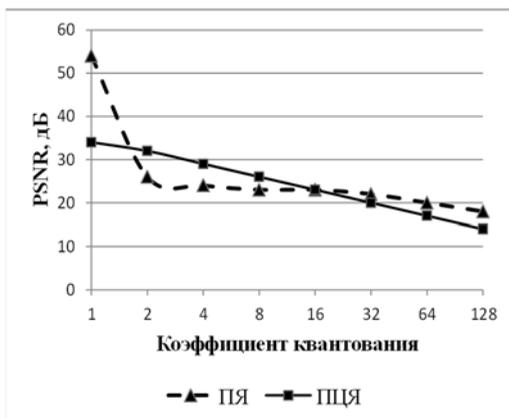


Рис. 4. Зависимость уровня искажения зеленого цвета восстановленного изображения от коэффициента квантования

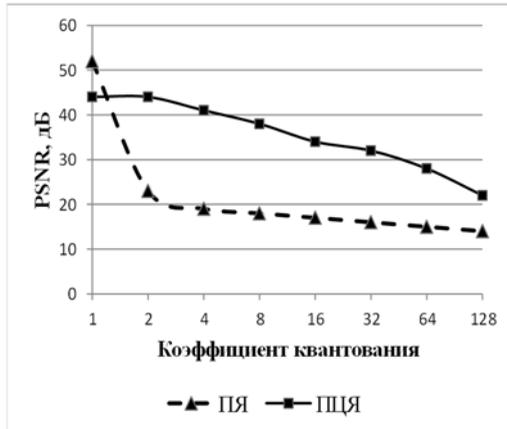


Рис. 5. Зависимость уровня искажения синего цвета восстановленного изображения от коэффициента квантования

Анализируя приведенные графики, можно заметить, что при коэффициентах квантования больше 2 применение цветового преобразования на основе принципа ПЦЯ дает выигрыш по качеству передаваемых цветов, а следовательно, сохраняет и четкость изображений. Значения PSNR показывают, что при обнулении значений составляющих цветоторазностных сигналов принцип ПЦЯ меньше искажает обрабатываемое изображение, чем принцип ПЯ.

При использовании принципа ПЦЯ выигрыш при коэффициенте квантования 2 составил: 24,2 дБ на красном цвете, 6,1 дБ на зеленом цвете и 25,0 на синем цвете. Выигрыш применения ПЦЯ при коэффициенте квантования 16 составил: 20,6 дБ на красном цвете, 0,1 дБ на зеленом цвете и 18,2 дБ на синем цвете. При коэффициентах квантования от 32 и более на зеленом цвете проигрыш составил не более 1 дБ.

6. Реализации принципов постоянной яркости и постоянной цветовой яркости. Рассмотрим реализации принципов ПЯ и ПЦЯ.

Пусть R, G, B — оцифрованные первичные основные цвета телевизионной камеры (видеосенсора). Y, C_b, C_r — цифровое представление величин E'_Y, E'_{R-Y}, E'_{B-Y} соответственно. W — целочисленное значение, соответствующее цветовой амплитуде передаваемого цвета (E'_C), P — передает значение насыщенности цвета красным ос-

новным первичным цветом (E'_1), Q — передает значение насыщенности цвета синим основным первичным цветом (E'_2). Разрядность входных и выходных отсчетов — восемь бит, то есть отсчеты представляют собой целочисленные значения в диапазоне от 0 до 255.

6.1. Принцип постоянной яркости. Одна из наиболее быстродействующих целочисленных реализаций согласно формуле (1) предложена в стандарте [15]:

$$\begin{cases} Y = (77 \cdot R + 150 \cdot G + 29 \cdot B) \gg 8; \\ C_b = (-44 \cdot R - 87 \cdot G + 131 \cdot B) \gg 8; \\ C_r = (131 \cdot R - 110 \cdot G - 21 \cdot B) \gg 8, \end{cases} \quad (6)$$

где \gg — операция логического сдвига вправо.

6.2. Принцип постоянной цветовой яркости. Разработаем вещественную реализацию принципа ПЦЯ для цифровых систем обработки видеoinформации. Реализация математических преобразований на языке Си++ приведена в листинге 1.

Первый этап вычисления — нормализация каждого из входных отсчетов к уровню от 0 до 1, которая осуществляется делением значения на константу 255 (см. строки 16-18 листинга 1). Далее с полученными нормализованными значениями вычисления производятся в вещественной арифметике. Вычислим промежуточные значения (строки 19-21 листинга 1):

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{r^2 + g^2 + b^2}, \\ q &= r / w, \\ p &= b / w, \end{aligned} \quad (7)$$

где w — вещественное число, определяющее значение цветовой амплитуды, q, p — вещественные числа, определяющие значения насыщенности цвета красным и синим первичными основными цветами соответственно, r, g, b — нормализованные вещественные значения первичных основных цветов.

```

1: void ccl_forward_444_float(unsigned char *RGB24, // Входной поток R,G,B-отчетов
2:   unsigned char *CCL8, // Выходной поток W,U,V-отчетов
3:   unsigned short width, // Ширина кадра
4:   unsigned short height) { // Высота кадра
5:
6:   #define Clip3(MinVal, MaxVal, a) (((a)<(MinVal)) ? (MinVal) : \
7:     (((a)>(MaxVal)) ? (MaxVal) :(a))
8:
9:   unsigned char *line1, *w, *p, *q;
10:  w = CCL8;
11:  p = CCL8 + width * height;
12:  q = p + width * height;
13:  line1 = RGB24;
14:  for ( int c = 0; c < height * width; ++c ) { // Проход по всем пикселям изображения
15:    float r, g, b, W, P, Q;
16:    r = (float) line1[0] / 255.0; // Нормализация красной компоненты
17:    g = (float) line1[1] / 255.0; // Нормализация зеленой компоненты
18:    b = (float) line1[2] / 255.0; // Нормализация синей компоненты
19:    W = sqrt ( r * r + g * g + b * b ); // Вычисление вещественного значения w
20:    P = (W > 0)? (b / W) : (1 / sqrt( 3.0 )); // Вычисление вещественного значения
21:    P
22:    Q = (W > 0)? (r / W) : (1 / sqrt( 3.0 )); // Вычисление вещественного значения
23:    q
24:    // Приведение значений к диапазону [0:255]
25:    w[c] = (unsigned char) Clip3(0,255,255.0 * ( W / sqrt( 3.0 ) ) );
26:    p[c] = (unsigned char) Clip3(0,255,255.0 * P);
27:    q[c] = (unsigned char) Clip3(0,255,255.0 * Q);
28:    line1 += 3;
  }
}

```

Листинг 1. Процедура прямого преобразования согласно ПЦЯ

При $w = 0$ значения $p = q = 1 / \sqrt{3}$ (строки 19-20 листинга 1). Для получения из выражения (7) выходных 8-разрядных значений W , P , требуется привести их к диапазону от 0 до 255 (строки 23-25 листинга 1):

$$\begin{aligned}
 W &= \lfloor w / \sqrt{3} \rfloor, \\
 Q &= \lfloor q \times 255 \rfloor, \\
 P &= \lfloor p \times 255 \rfloor.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Обратное преобразование выполняется похожим способом (листинг 2). Из отсчетов W , P , Q получают нормализованные (от 0 до 1) промежуточные вещественные отсчеты (строки 16-18 листинга 2):

$$w = W \times \sqrt{3} / 255,$$

$$q = Q / 255,$$

$$p = P / 255.$$
(9)

```

1: void ccl_backward_444_float(unsigned char *CCL8, // Входной поток W,U,V,
2: отчетов
3:     unsigned char *RGB24, // Выходной поток R,G,B-
4: отчетов
5:     unsigned short width, // Ширина кадра
6:     unsigned short height) { // Высота кадра
7:
8: #define Clip3(MinVal, MaxVal, a) ((a)<(MinVal)) ? (MinVal) : \
9:     ((a)>(MaxVal)) ? (MaxVal) :(a)
10:
11:     unsigned char *line1, *w, *p, *q;
12:     w = CCL8;
13:     p = CCL8 + width * height;
14:     q = p + width * height;
15:     line1 = RGB24;
16:     for ( int c = 0; c < height * width; ++c ) { // Проход по всем пикселям изображе-
17: ния
18:         float r, g, b, W, P, Q;
19:         // Вычисление значения w, q, p
20:         W = (float)w[c] * sqrt( 3.0 ) / 255.0;
21:         P = p[c] / 255.0;
22:         Q = q[c] / 255.0;
23:         b = P * W;
24:         r = Q * W;
25:         g = W * W - ( r*r + b*b );
26:         g = ( g >= 0 )? sqrt(g) : 0;
27:
28:         line1[0] = (unsigned char) Clip3(0,255,( r * 255.0 ));
29:         line1[1] = (unsigned char) Clip3(0,255,( g * 255.0 ));
30:         line1[2] = (unsigned char) Clip3(0,255,( b * 255.0 ));
31:
32:         line1 += 3;
33:     }
34: }

```

Листинг 2. Процедура обратного преобразования согласно ПЦЯ

Значения, полученные в выражении (9), применяются для вычисления вещественных чисел восстановленных значений (строки 20-22 листинга 2):

$$r_r = q \times w,$$

$$b_r = p \times w,$$

$$g' = w^2 - (r_r^2 + b_r^2),$$
(10)

где r_r , b_r — восстановленные нормализованные вещественные значения выходных отсчетов гамма-корректированных цветов.

Восстановленное нормализованное значение выходного отсчета зеленого цвета вычисляется следующим образом (строка 23 листинга 2):

$$g_r = \begin{cases} 0, & \text{при } g' < 0; \\ \sqrt{g'}, & \text{при } g' \geq 0. \end{cases} \quad (11)$$

Восстановленные компоненты можно получить, используя значения, рассчитанные в (10) и (11), выполнив следующие вычисления (строки 25-27 листинга 2):

$$\begin{aligned} R_r &= \lfloor r_r \times 255 \rfloor \\ G_r &= \lfloor g_r \times 255 \rfloor, \\ B_r &= \lfloor b_r \times 255 \rfloor \end{aligned} \quad (12)$$

где R_r , G_r , B_r — восстановленные 8-разрядные беззнаковые целочисленные значения цветовых компонентов гамма-корректированных цветов.

Вещественная реализация служит для демонстрации работы принципа ПЦЯ, однако является наиболее сложной с точки зрения вычислительных операций.

6.3. Целочисленные реализации принципа постоянной цветовой яркости. К целочисленным системам можно отнести современные процессоры некоторых архитектур (без использования арифметико-логического устройства (АЛУ), выполняющего вещественные операции) и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

В данной работе авторами предлагается *табличная реализация* принципа ПЦЯ — наиболее быстродействующая целочисленная реализация при наличии достаточного объема быстродействующей оперативной памяти. Рассмотрим эту реализацию более подробно.

Хранение отсчетов W , P , Q потребует $C=256^3=16777216$ байт (16 МБайт) для каждого из массивов. Однако большинство вычислительных модулей оперируют типами данных, кратными 2^3 — 8, 16, 32 или 64 разрядам, исходя из этого, обращаясь к памяти, наиболее эффективно получать сразу три байта, а не извлекать каждый из отсчетов по отдельности. Поэтому для уменьшения числа операций доступа к па-

мости наиболее целесообразно использовать четырехбайтный тип данных (unsigned integer). Тогда для хранения отсчетов преобразования требуется суммарно 64 МБайта памяти.

Тогда кодирование можно осуществить как получение одного четырехбайтного числа (WQP) из таблицы (wpq) по координатам (R, G, B):

$$WQP = wpq[R][G][B]. \quad (13)$$

Восстановить принятые значения R, G, B можно аналогичным способом, применив таблицу заранее рассчитанных значений (rgb). Извлечение значений R, G, B в зависимости от полученных значений W, V, U проводится следующим образом:

$$RGB = rgb[W][X][Y]. \quad (14)$$

Описанный согласно формулам (13-14) целочисленный метод кодирования и декодирования обеспечивает наибольшее быстродействие для современных процессоров при условии быстрой работы оперативной памяти устройства и ее достаточном объеме.

Требуется предварительная подготовка таблиц кодирования и декодирования при использовании табличной реализации, которая проводится на процессоре с возможностью выполнения вещественных операций. Фрагмент программного кода для формирования значения WQF с целью заполнения таблицы wpq приведен в листинге 3. Значения W, P, Q в листинге 3 вычисляются аналогично тому, как это реализовано в листинге 1. Заполнение таблицы rgb производится похожим образом.

```

1: // R, G, B – целочисленные значения в диапазоне [0;255]
2: unsigned int wpq[256][256][256]; // [R][G][B]
3: int WQP = (unsigned char) Clip3( 0, 255, W / sqrt( 3.0 ) );
4: WQP <<= 8;
5: WQP |= (unsigned char) Clip3( 0, 255, P );
6: WQP <<= 8;
7: WQP |= (unsigned char) Clip3( 0, 255, Q );
8: wpq[R][G][B] = WQP;

```

Листинг 3. Подготовка массива WQP

Разработаем *оптимизированную табличную реализацию принципа ПЦЯ*. Для этого требуется создать таблицу, в которой содержатся значения W и обратные им 24-разрядные значения $invW = 2^{24} / W$ (для сохранения точности вычислений требуется умножение на число 2^{24}). Разместим W и $invW$ в одном четырехбайтном числе:

$$W' = ((W \times 2^{24}) \vee \text{Inv}W), \quad (15)$$

где \vee — операция побитового «или». Умножение на 2^{24} можно заменить логическим сдвигом числа влево на 24 разряда.

Кодирование с применением сокращенной таблицы отсчетов осуществляется следующим образом. Требуется получить число, хранящееся в таблице по координатам $(R^2 + G^2 + B^2)$, и затем получить значения W и $\text{inv}W$:

$$\begin{aligned} W &= (WW[R^2 + G^2 + B^2]) / 2^{24}, \\ \text{inv}W &= (WW[R^2 + G^2 + B^2] \times 2^8) / 2^8, \end{aligned} \quad (16)$$

где WW — массив заранее вычисленных значений W' для всех R, G и B , операции умножения и деления на 2^n реализуются как логические сдвиги вправо и влево на n . Значение W , полученное согласно (16), записывается в поток выходных видеоданных. Для расчета значений P, Q используется полученное в (16) значение $\text{inv}W$:

$$\begin{aligned} Q &= (R \times \text{inv}W) / 2^{24}, \\ P &= (B \times \text{inv}W) / 2^{24}. \end{aligned} \quad (17)$$

Аналогичные действия выполняют при декодировании значений R, G и B .

Для хранения массива WW в таком случае потребуется $256^2 \times 3 \times 4 = 768432$ байта (768 Кбайт), однако для расчетов требуются операции умножения и логического сдвига. Следовательно, описанный метод предпочтителен для систем обработки видеoinформации с ограниченным объемом оперативной памяти и вычислительными ресурсами, достаточными для проведения умножений и логических сдвигов.

7. Сравнительный анализ реализаций принципов постоянной яркости и постоянной цветовой яркости. Сравнение реализаций принципов будем проводить, оценивая число требуемых для вычислений машинных тактов. Основные функциональные блоки вычислительных модулей системы обработки, участвующие при вычислении: операции сложения/вычитания, умножения, сдвиги и обращения к памяти. Для большинства процессоров можно найти задержки, вызываемые выполнением той или иной команды обработки данных. Используем следующие задержки при вычислениях:

ADD — для операции сложения,

SHIFT — для операции логического сдвига,

MULTIPLY — для операции умножения;
и при обращении к памяти:
MEM — при обращении к ОЗУ;
CACHE — при обращении к быстрой памяти (кэш-памяти), расположенной в чипе процессора.

7.1. Сравнение целочисленных реализаций принципа постоянной цветовой яркости. При кодировании согласно табличной реализации для получения отсчетов W , P , Q нужно однократно обратиться к памяти по координатам (R, G, B) , что потребует трех сложений и двух логических сдвигов, то есть $TBL = 2 \times SHIFT + 3 \times ADD + MEM$ операций, что объясняется способом хранения данных в оперативной памяти вычислителя — трехмерный массив раскладывается по строкам, следующим друг за другом.

Проведем оценку числа тактов для оптимизированной реализации, требуемых при вычислении отсчетов W , P , Q . Для получения значения W требует вычислить индекс $i = R^2 + G^2 + B^2$, который используется при обращении к памяти ($w = WW[i]$), и затем сдвинуть полученное значение вправо на 24 разряда ($W = w \gg 24$). Суммарная задержка для выполнения этих операций составит $(3 \times MULTIPLY + 2 \times ADD + MEM + SHIFT)$ тактов.

Для вычисления компонентов P и Q требует выполнить два логических сдвига, чтобы нормализовать значение WW , и затем требуется выполнить одно умножение и один логический сдвиг для каждого из компонентов, что составляет $2 \times SHIFT + 2 \times (MULTIPLY + SHIFT)$ тактов.

Итого, вычисление компонентов W , P , Q потребует $OPT_{MEM} = (5 \times MULTIPLY + 2 \times ADD) + MEM + 5 \times SHIFT$ тактов, что превышает число тактов при реализации табличного метода кодирования. При размещении всей таблицы WW в кэш-памяти процессора потребуется $OPT_{CACHE} = (5 \times MULTIPLY + 2 \times ADD) + CACHE + 5 \times SHIFT$ тактов, что уменьшит задержку при вычислениях.

Как правило, в вычислительных системах величина задержки обращения к внешней памяти в 10 (и более) раз превышает величину задержки обращения к быстрой памяти.

Оптимизированную реализацию целесообразно использовать при наличии требуемого объема быстрой памяти процессора и при выполнении соотношения $TBL \leq OPT_{CACHE}$.

Например, для процессора Intel Atom 330 [16] операция умножения требует 3 такта, сложения — 1 такт, чтения из быстрой памяти —

1 такт, логического сдвига — 1 такт. Значение $OPT_{CACHE}=23$ тактам. Задержка обращения к внешней памяти определяется аппаратной реализацией системы и может составлять от 12 и более тактов ($TBL=11$). При $MEM = 6$ для такой системы предпочтительнее табличная реализация, при $MEM \geq 12$ — оптимизированная реализация.

7.2. Сравнение реализации принципа ПЯ с реализациями принципа ПЦЯ. Оценим число операций, требуемых для кодирования одного пикселя изображения согласно выражению (7). Число тактов для вычисления каждого из значений Y , C_b , C_r равно $L = 3 \times MULTIPLY + 2 \times ADD + SHIFT$. Суммарно потребуется $3 \times L$ тактов для кодирования одного пикселя, что составляет $YCbCr = 9 \times MULTIPLY + 6 \times ADD + 3 \times SHIFT$ тактов.

Сравним производительность, выраженную числом тактов, для следующих моделей процессоров: AMD Kabini, Intel Core i7, Intel Atom 330, Cortex-A57, используя задержки при выполнении операций для процессоров из [16, 17] (таблица 1).

Таблица 1. Число тактов при выполнении операций

Наименование процессора	<i>ADD</i>	<i>SHIFT</i>	<i>MULTIPLY</i>	<i>MEM</i>	<i>CACHE</i>
AMD Kabini	1	1	3	4	1
Intel Core i7	1	1	5	3	1
Intel Atom 330	1	1	6	1	1
Cortex-A57	1	1	3	4	4

Для удобства сведем сравнение числа тактов в таблицу (таблица 2). Сравнивая значения, приведенные в таблице 2, можно сделать вывод, что табличная реализация — наиболее быстрая, оптимизированная реализация принципа ПЦЯ выигрывает у целочисленной реализации принципа ПЯ по числу требуемых для вычислений тактов как при использовании быстрой памяти процессора (*CACHE*), так и при использовании ОЗУ.

Таблица 2. Сравнение числа тактов, требуемых при реализации ПЯ и ПЦЯ

Наименование процессора	ПЦЯ			ПЯ
	<i>TBL</i>	OPT_{MEM}	OPT_{CACHE}	<i>YCbCr</i>
AMD Kabini	9	26	23	36
Intel Core i7	8	35	33	54
Intel Atom 330	6	38	38	63
Cortex-A57	9	26	26	36

8. Заключение. Принцип ПЯ, используемый в современных системах обработки видеoinформации, не свободен от ряда недостатков, например: уменьшение яркости насыщенных цветов и ухудшение четкости цветных изображений. Поэтому применение этого принципа невозможно в некоторых системах, которые не допускают потери информации о первичных цветах.

К потерям в четкости изображений также приводит прореживание цветоразностных сигналов согласно форматам 4:2:2, 4:2:0, 4:1:1.

Улучшить качество систем передачи видеoinформации можно, применив принцип ПЦЯ, использование которого позволяет повысить разрешение декодированных изображений.

В работе проведен сравнительный анализ преобразованных изображений согласно принципам ПЯ и ПЦЯ, который показал преимущество использования принципа ПЦЯ с точки зрения сохранения информации о цветовом разрешении кодируемых данных.

В работе рассмотрены варианты реализации принципа ПЦЯ для вещественных и целочисленных аппаратных средств обработки видеоданных. Описан наиболее быстродействующий метод табличного кодирования и декодирования согласно принципу ПЦЯ. Произведено сокращение количества хранимых данных для табличного кодирования. Оптимизированный метод табличного кодирования согласно принципу ПЦЯ требует в 85,33 раза меньший объем памяти, однако при этом необходимы операции умножения и логические сдвиги.

Проведен сравнительный анализ табличного и оптимизированного методов для выбора реализации принципа ПЦЯ в зависимости от конфигурации аппаратной платформы.

Целочисленная оптимизированная реализация принципа ПЦЯ выигрывает по числу требуемых тактов при вычислении значений у целочисленной реализации принципа ПЯ. В системах, где критична задача четкости цветовой информации и требуется улучшенная цветопередача, наряду с невысокой вычислительной сложностью, предпочтительна оптимизированная целочисленная реализация принципа ПЦЯ. Применение целочисленных реализаций принципа ПЦЯ целесообразно также в системах комплексирования информации [9], где требуется передача улучшенного видеоизображения при сохранении приемлемой вычислительной сложности.

Практическое применение принципа ПЦЯ осуществлено, в частности, при создании системы управления беспроводной передачей энергии [18] к исполнительным устройствам крупногабаритной трансформируемой антенны космического базирования [19], где используется

двухдиапазонная видеосистема в качестве элемента «технического зрения» для наведения лазерного излучения на фотоприемник. В указанном случае принцип постоянной цветовой яркости рационально сочетается с комплексированием видеосигналов от датчиков видимого и инфракрасного диапазонов [9].

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Министерство образования России, соглашение № 14.577.21.0201 (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI 57715X0201): «Создание высокоэффективной системы беспроводной узконаправленной передачи энергии и информации для управления состоянием объектов космического базирования на основе лазерных и волоконнооптических технологий». Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Центр радиотехнических и оптических измерений».

Литература

1. *Кривошеев М.И., Кустарев А.К.* Световые измерения в телевидении // М.: «Связь». 1973. 224 с.
2. *Мешков В.В., Матвеев А.Б.* Основы светотехники. Часть 2. Физическая оптика и колориметрия // М.: Энергоатомиздат. 1989. 432 с.
3. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений: издание 3-е, исправленное и дополненное, пер. с англ. // М.: Техносфера. 2012. 1104 с.
4. *Кочин Л.Б.* Методы и средства отображения цветовой видеoinформации // Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 2012. 268 с.
5. *Полосин Л.Л.* Представление цветов в метрическом векторном пространстве // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 2. С. 54–61.
6. *Полосин Л.Л.* Принцип постоянной цветовой яркости в телевидении // Телевизионная техника и связь. Спецвыпуск, посвященный 50-летию НИИТ. 1995. С. 28–37.
7. *Ричардсон Я.* Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения // М.: Техносфера. 2005. 368 с.
8. *Уваров Н.Е.* Цифровая обработка изображений в телевизионных системах наблюдения и охраны // ССТV фокус. 2004. № 3. С. 56–61.
9. *Борейшо А.С. и др.* Комплексирование в оптоэлектронных системах // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 736–741.
10. *Стремоухов М.В., Илюшин М.В., Дворяжкин В.В.* Кодирование изображений с малым динамическим диапазоном на основе нелинейной формирующей системы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 117–122.
11. *Сухов Т.М., Беляев Е.А.* Использование принципа постоянной цветовой яркости для передачи видеoinформации // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 1. С. 55–59.
12. *Куценко С.А., Немцова С.Р., Мкртумов А.С., Цветков О.В.* Теоретико-информационная характеристика качества изображений при их цифровом сжатии // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 8(31). С. 190–202.
13. *Зубакин И.А., Ибатуллин С.М., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К.* Измерение качества видеoinформации на выходе цифрового кодера источника и его эффективности // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 4(27). С. 33–39.

14. Image Compression. Benchmark. The New Test Images. URL: http://imagecompression.info/test_images/ (дата обращения: 01.06.2017).
15. RECOMMENDATION ITU-R BT.601-7. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios. URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf (дата обращения: 07.06.2017).
16. Instruction tables. URL: http://www.agner.org/optimize/instruction_tables.pdf (дата обращения: 07.06.2017).
17. Cortex-A57 Software Optimization Guide. URL: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.uan0015b/Cortex_A57_Software_Optimization_Guide_external.pdf (дата обращения: 07.06.2017).
18. *Mamseev С.А. и др.* Организация энергоинформационного обмена между устройствами управления формой трансформируемой антенны с применением волоконно-оптических технологий // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 11. С. 73–78.
19. *Бей Н.А., Зимин В.Н.* Трансформируемые антенны больших размеров для геостационарных космических аппаратов. // Антенны. 2005. Вып. 10(101). С. 24–27.

Сухов Тимофей Михайлович — ассистент кафедры радиоэлектронных систем управления, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова). Область научных интересов: кодирование цветовой информации, сжатие потока видеоданных, комплексирование и интегрирование данных датчиков различных частотных диапазонов. Число научных публикаций — 25. tsuhov@mail.ru; 1-я Красноармейская ул., 1, Санкт-Петербург, 199005; р.т.: +7(812)495-7753.

Страхов Сергей Юрьевич — д-р техн. наук, доцент, декан факультета информационных и управляющих систем, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова). Область научных интересов: радиофизика, лазерные системы, оптико-электронные системы. Число научных публикаций — 79. Strakhov_s@mail.ru; 1-я Красноармейская ул., 1, Санкт-Петербург, 199005; р.т.: +7(812)317-82-49.

Кочин Леонид Борисович — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных систем управления, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова). Область научных интересов: телевизионные системы, обработка и передача изображений, колориметрия. Число научных публикаций — 35. klen68@mail.ru; 1-я Красноармейская ул., 1, Санкт-Петербург, 199005; р.т.: +7(812)-4957753, Факс: +7(812)-3162409.

Беляев Евгений Александрович — к-т техн. наук, постдоктор лаборатории кодирования и передачи визуальной информации, Датский технический университет. Область научных интересов: сжатие и передача видеoinформации. Число научных публикаций — 64. evbel@fotonik.dtu.dk; Ørstedes Plads, building 343, room 106, Kgs. Lyngby, 2800, Denmark; р.т.: +358449179895.

Поддержка исследований. Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Министерство образования России, соглашение № 14.577.21.0201 (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI 57715X0201): «Создание высокоэффективной системы беспроводной узконаправленной передачи энергии и информации для управления состоянием объектов космического базирования на основе лазерных и волоконно-оптических технологий». Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Центр радиотехнических и оптических измерений».

T.M. SUKHOV, S.YU. STRAKHOV, L.B. KOCHIN, E.A. BELYAEV
**APPLICATION AND IMPLEMENTATIONS OF THE
 PRINCIPLE OF CONSTANT COLOR LUMINANCE IN DIGITAL
 VIDEO CODING SYSTEMS**

Sukhov T.M., Strakhov S.Yu., Kochin L.B., Belyaev E.A. Application and Implementations of the Principle of Constant Color Luminance in Digital Video Coding Systems.

Abstract. Modern hardware systems of processing the video data stream for color coding apply the principle of constant brightness proposed in the development of the NTSC color coding system. This principle, like its implementation, is not free from drawbacks: loss of information on the clarity of the encoded color images, degradation of clarity in achromatic details and images as the color saturation increases, etc. In addition, the use of video data decoding formats in digital video data processing systems, such as 4:2:2, 4:2:0, 4:1:1, distorts the decoded video image.

An alternative approach for encoding a color video stream is to apply the principle of constant color luminance. The work describes the coding according to the principle of constant color luminance. A comparative analysis of the transformed images is carried out with the help of the two principles given. The advantage of applying the principle of constant color brightness in digital video coding systems is shown. It is shown that using the principle of constant color brightness it is possible to obtain a gain of more than 6 dB.

The implementation of the principle of constant color luminance for real and integer modern hardware platforms is described. A comparative analysis of the realizations of the principles of constant brightness and constant color luminance was carried out, showing the advantage of applying the principle of constant color luminance for some modern processors.

The application of the principle of constant color luminance in digital video encoding systems can help improve the quality of recoverable color coded images.

Keywords: principle of constant brightness, the principle of constant color luminance, integer color transformations, comparison of color transformations.

Sukhov Timofey Mikhailovich — assistant of radio-electronic control systems department, Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F.Ustinov. Research interests: encoding of color information, compression of video data stream, integration multispectral sensor data. The number of publications — 25. tsuhov@mail.ru; 1, 1-st Krasnoarmeyskaya, St.-Petersburg, 190005, Russia; office phone: +7(812)495-7753.

Strakhov Sergey Yurievich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, dean of information and control systems faculty, Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F.Ustinov. Research interests: radiophysics, laser systems, electro-optical systems. The number of publications — 79. Strakhov_s@mail.ru; 1, 1-st Krasnoarmeyskaya, St.-Petersburg, 190005, Russia; office phone: +7(812)317-82-49.

Kochin Leonid Borisovich — Ph.D., associate professor, associate professor of radio-electronic control systems department, Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F.Ustinov. Research interests: television systems, processing and transfer of images, colorimetric. The number of publications — 35. klen68@mail.ru; 1, 1-st Krasnoarmeyskaya, St.-Petersburg, 190005, Russia; office phone: +7(812)-4957753, Fax: +7(812)-3162409.

Belyaev Evgeny Aleksandrovich — Ph.D., postdoctoral researcher of coding and visual communication laboratory, Technical University of Denmark. Research interests: video coding and

transmission. The number of publications — 64. e_beljaev@mail.ru; building 343, room 106, Ørstedes Plads, Kgs. Lyngby, 2800, Denmark; office phone: +358449179895.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the implementation of the Federal Target Program «Research and Development in Priority Areas for the Development of the Russian Science and Technology Complex for 2014–2020», the Ministry of Education of Russia, agreement No. 14.577.21.0201 (unique identifier of the RFMEFI 57715X0201): «Creating a highly efficient wireless system Focused transmission of energy and information for managing the state of space-based objects based on laser and fiber-optic technologies». The work was performed on the equipment of the Center for Radio-Technical and Optical Measurements.

References

1. Krivosheev M.I., Kustarev A.K. *Svetovyye izmerenija v televidenii* [Light measurements in television]. Moscow: «Svjaz». 1973. 224 p. (In Russ.).
2. Meshkov V.V., Matveev A.B. *Osnovy svetotekhniki, ch. 2. Fizicheskaja optika i kolorimetrija* [Fundamentals of lighting, Part 2. Physical optics and colorimetry]. Moscow: Jenergoatomizdat. 1989. 432 p. (In Russ.).
3. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital image processing: 3rd ed.* Prentice Hall. 2007. 954 p. (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii. Izdanie 3-e, ispravlennoe i dopolnennoe.* Moscow: Tekhnosfera Publ. 2012. 1104 p.).
4. Kochin L.B. *Metody i sredstva otobrazhenija cvetovoj videoinformacii* [Methods and means of displaying color video information] Balt. gos. tehn. un-t. SPb. 2012. 268 p. (In Russ.).
5. Polosin L.L. [The representation of colors in a metric vector space]. *Izvestija vuzov Rossii. Radioelektronika — Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics.* 2013. vol. 2. pp. 54–61. (In Russ.).
6. Polosin L.L. [The principle of constant color brightness in television]. *Televizionnaja tehnika i svjaz'. Specvypusk, posvjashhennyj 50-letiju NIIT — Television technology and communication. Special issue dedicated to the 50th anniversary of NIIT.* 1995. pp. 28–37. (In Russ.).
7. Richardson I.E. *H. 264 and MPEG-4 video compression: video coding for next-generation multimedia.* John Wiley & Sons. 2004. 306 p. (Russ. ed.: Richardson Ya. *Videokodirovanie. H.264 i MPEG-4 — standarty novogo pokolenija.* Moscow: Tehnosfera. 2005. 368 p.).
8. Uvarov N.E. [Digital image processing in television surveillance and security systems]. *CCTV focus — CCTV focus.* 2004. vol. 3. pp. 56–61. (In Russ.).
9. Borejsho A.S. et al. [Integration in optoelectronic systems]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2016. vol. 89. no. 3. pp. 736–741. (In Russ.).
10. Stremouhov M.V., Iljushin M.V., Dvorjadkin V.V. [Coding of images with a small dynamic range on the basis of a nonlinear forming system]. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University.* 2016. vol. 58. pp. 117–122. (In Russ.).
11. Sukhov T.M., Beljaev E.A. [The use of the principle of constant color brightness for the transmission of video information]. *Izvestija vuzov. Priborostroenie — Journal of Instrument Engineering.* 2011. vol. 1. pp. 55–59. (In Russ.).
12. Kucenko S.A., Nemcova S.R., Mkrumov A.S., Cvetkov O.V. [Theoretical and information characteristic of image quality in the course of digital compression]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings.* 2013. vol. 8(31). pp. 190–202. (In Russ.).
13. Zubakin I.A., Ibatullin S.M., Fahmi Sh.S., Cyculin A.K. [Measuring the quality of video information at the output of the digital source coder and its efficiency]. *Voprosy*

- radioelektroniki. Serija: Tehnika televidenija — Questions of radio electronics. Series: Television Technique.* 2016. vol. 4(27). pp. 33–39. (In Russ.).
14. Image Compression. Benchmark. The New Test Images. Available at: http://imagecompression.info/test_images/ (accessed: 01.06.2017).
 15. RECOMMENDATION ITU-R BT.601-7. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios. Available at: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf (accessed: 07.06.2017).
 16. Instruction tables. Available at: http://www.agner.org/optimize/instruction_tables.pdf (accessed: 07.06.2017).
 17. Cortex-A57 Software Optimization Guide. Available at: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.uan0015b/Cortex_A57_Software_Optimization_Guide_external.pdf (accessed: 07.06.2017).
 18. Matveev S.A. et al. [Organization of energy-information exchange between control devices of the form of the transformed antenna using fiber-optic technologies]. *Opticheskij zhurnal — Journal of Optical Technology.* 2016. vol. 83. no. 11. pp. 73–78. (In Russ.).
 19. Bei N.A., Zimin V.N. [Transformable large antenna for geostationary spacecraft]. *Antenny — Antennas.* 2005. vol. 10(101). pp. 24–27. (In Russ.).