

RECOMENDACIÓN UIT-R BT.1361*

Colorimetría unificada a nivel mundial y características correspondientes de los futuros sistemas de televisión y de formación de imágenes

(Cuestión UIT-R 1-3/11)

(1998)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los parámetros de colorimetría varían entre los actuales sistemas de televisión;
- b) que los gráficos por computador se aplican a la producción de programas de televisión, mientras que las pantallas de televisión se utilizan con los computadores;
- c) que es preciso contar con la capacidad de interfuncionamiento entre los distintos sistemas de televisión y otros sistemas de formación de imágenes tales como las películas cinematográficas y los gráficos por computador;
- d) que conviene disponer de una colorimetría unificada para el interfuncionamiento con el fin de minimizar la conversión entre los distintos sistemas de televisión y los sistemas de creación de imágenes;
- e) que aunque las actuales pantallas de televisión pueden reproducir una gran proporción de los colores que hay en las escenas naturales, se requiere una gama de color más amplia para reproducir todos los colores naturales de las superficies;
- f) que se están introduciendo nuevos dispositivos de pantalla capaces de producir una gama más amplia de colores;
- g) que la gama de colores reproducibles puede variar entre pantallas por motivos de aplicación, coste y calidad;
- h) que al seleccionar los parámetros de colorimetría de un sistema de televisión, es fundamental que el sistema dé una información completa del color y que no se limite a la gama reproducible en una pantalla particular;
- j) que la gama de colores de un sistema puede ampliarse permitiendo valores de la señal *RGB* negativos y superiores al 100%, manteniendo la compatibilidad con los sistemas convencionales;
- k) que mientras que los parámetros de colorimetría y las características correspondientes se han especificado para la gama convencional de colores en la Recomendación UIT-R BT.709, es preciso disponer de una sola Recomendación que especifique un conjunto único de parámetros de colorimetría y de características correspondientes para todos los sistemas futuros de televisión;
- l) que la adopción de un conjunto único a nivel mundial de parámetros de colorimetría y de características correspondientes ayudará a mejorar la eficacia del intercambio internacional y el desarrollo de sistemas unificados de transmisión eficaces;
- m) que la adopción de un conjunto único a nivel mundial de parámetros de colorimetría y de características correspondientes se traducirá en última instancia en ventajas económicas para las entidades de radiodifusión y para la industria de receptores, lo que a su vez ayudará a las organizaciones que actúan en países con economías en desarrollo,

* La Comisión de Estudio 6 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2002 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

recomienda

1 que se utilicen los parámetros de colorimetría y las características correspondientes que se describen en los Cuadros 1, 2 y 3 de la presente Recomendación para todos los sistemas futuros de televisión y de creación de imágenes.

CUADRO 1

Parámetros de colorimetría y características correspondientes

Parámetro	Valores		
1 Colores primarios	Coordenadas de cromaticidad (CIE, 1931)		
		x	y
	Rojo	0,640	0,330
	Verde	0,300	0,600
	Azul	0,150	0,060
2 Blanco de referencia (igual a la señal primaria)	Coordenadas de cromaticidad (CIE, 1931)		
	D_{65}	x	y
		0,3127	0,3290
3 Características de transferencia optoelectrónica ⁽¹⁾	$E' = 1,099 L^{0,45} - 0,099$ para $0,018 \leq L < 1,33$ $E' = 4,50 L$ para $-0,0045 \leq L < 0,018$ $E' = -\{1,099(-4L)^{0,45} - 0,099\} / 4$ para $-0,25 \leq L < -0,0045$ siendo L una tensión normalizada por el nivel de blanco de referencia que es proporcional a la intensidad luminosa implícita que se detectaría con un canal de color de cámara de referencia; E' es la señal primaria no lineal resultante.		

⁽¹⁾ La precorrección no lineal de la región de la señal por debajo de $L = 0$ y por encima de $L = 1$ se aplica únicamente a los sistemas que utilizan una gama ampliada de colores. Los sistemas que utilizan una gama de colores convencional aplican la corrección en la región comprendida entre $L = 0$ y $L = 1$. En el Anexo 1 figura una explicación detallada del sistema de gama de color ampliada.

CUADRO 2

Ecuaciones de codificación analógica

Parámetro	Ecuaciones
	Sistemas de gama de color convencional y ampliada
4 Ecuaciones de la luminancia y de la diferencia de color	$E'_Y = 0,2126 E'_R + 0,7152 E'_G + 0,0722 E'_B$ $E'_{CB} = \frac{E'_B - E'_Y}{1,8556}$ $= \frac{-0,2126 E'_R - 0,7152 E'_G + 0,9278 E'_B}{1,8556}$ $E'_{CR} = \frac{E'_R - E'_Y}{1,5748}$ $= \frac{0,7874 E'_R - 0,7152 E'_G - 0,0722 E'_B}{1,5748}$

CUADRO 3

Ecuaciones de codificación digital

Parámetro	Ecuaciones	
	Sistema de gama de color convencional	Sistema de gama de color ampliada ⁽¹⁾
5 Cuantificación de las señales RGB, de luminancia y de diferencia de color ^{(2),(3)}	$D'_R = \text{INT}\left[(219 E'_R + 16) \cdot 2^{n-8}\right]$ $D'_G = \text{INT}\left[(219 E'_G + 16) \cdot 2^{n-8}\right]$ $D'_B = \text{INT}\left[(219 E'_B + 16) \cdot 2^{n-8}\right]$	$D''_R = \text{INT}\left[(160 E'_R + 48) \cdot 2^{n-8}\right]$ $D''_G = \text{INT}\left[(160 E'_G + 48) \cdot 2^{n-8}\right]$ $D''_B = \text{INT}\left[(160 E'_B + 48) \cdot 2^{n-8}\right]$
	$D'_Y = \text{INT}\left[(219 E'_Y + 16) \cdot 2^{n-8}\right]$ $D'_{CB} = \text{INT}\left[(224 E'_{CB} + 128) \cdot 2^{n-8}\right]$ $D'_{CR} = \text{INT}\left[(224 E'_{CR} + 128) \cdot 2^{n-8}\right]$	
6 Obtención de las señales de luminancia y de diferencia de color mediante señales RGB cuantificadas ⁽⁴⁾	$D'_Y = \text{INT}\left[0,2126 D'_R + 0,7152 D'_G + 0,0722 D'_B\right]$ $D'_{CB} = \text{INT}\left[\left(-\frac{0,2126}{1,8556} D'_R - \frac{0,7152}{1,8556} D'_G + \frac{0,9278}{1,8556} D'_B\right) \cdot \frac{224}{219} + 2^{n-1}\right]$ $D'_{CR} = \text{INT}\left[\left(\frac{0,7874}{1,5748} D'_R - \frac{0,7152}{1,5748} D'_G - \frac{0,0722}{1,5748} D'_B\right) \cdot \frac{224}{219} + 2^{n-1}\right]$	$D''_Y = \text{INT}\left[\left\{\left(0,2126 D''_R + 0,7152 D''_G + 0,0722 D''_B\right) - 48 \cdot 2^{n-8}\right\} \frac{219}{160} + 16 \cdot 2^{n-8}\right]$ $D''_{CB} = \text{INT}\left[\left(-\frac{0,2126}{1,8556} D''_R - \frac{0,7152}{1,8556} D''_G + \frac{0,9278}{1,8556} D''_B\right) \cdot \frac{224}{160} + 2^{n-1}\right]$ $D''_{CR} = \text{INT}\left[\left(\frac{0,7874}{1,5748} D''_R - \frac{0,7152}{1,5748} D''_G - \frac{0,0722}{1,5748} D''_B\right) \cdot \frac{224}{160} + 2^{n-1}\right]$

(1) En el Anexo 1 figura una explicación detallada.

(2) «n» denota la longitud binaria de la señal cuantificada.

(3) El operador INT da el valor 0 para partes fraccionales comprendidas entre 0 y 0,4999... y el valor +1 para las comprendidas entre 0,5 y 0,9999..., es decir, redondea las fracciones por encima de 0,5.

(4) El Anexo 2 especifica un procedimiento de obtención de coeficientes enteros para la realización digital.

ANEXO 1

Sistema de gama de color ampliada que utiliza señales *RGB* negativas

La gama reproducible de colores de una pantalla de televisión está limitada a la superficie interior de un triángulo del diagrama de cromaticidad determinado por los tres colores primarios de la pantalla. Ello es debido al hecho de que las emisiones luminosas negativas de los colores primarios no pueden realizarse con un sistema de pantalla real. No obstante, los colores situados fuera del triángulo pueden transmitirse cuando se permite la transmisión de valores negativos y superiores al 100% como señales *RGB* primarias ampliadas. Las cámaras actuales desarrollan normalmente señales *RGB* de gama ampliada en el proceso de formación matricial lineal para optimizar el análisis de colorimetría, pero los valores ampliados se suelen recortar en el proceso posterior para ajustarse al formato de la señal del sistema.

El método de ampliación de la gama de colores que utiliza señales *RGB* negativas permite la compatibilidad con los sistemas convencionales, lo que se traduce en una transición sin discontinuidades hacia el nuevo sistema de gama ampliada.

Gama de la señal

La gama requerida de la señal en un sistema de televisión se determina por las primarias de referencia, las características de transferencia optoelectrónica (curva gamma) y la gama de colores que debe tratar el sistema. Se requiere una gama de señales excepcional para reproducir todo el abanico de colores espectrales puros, incluso con una gama amplia de primarias. Un enfoque realista consiste en limitar la reproducción a la gama de los colores de la superficie real que determina Pointer.

La Fig. 1 (a)-(c) muestra los niveles de señales *RGB* analógicas con precorrección gamma para los colores de Pointer. Dichos colores representan los colores de una superficie real con saturación máxima para 36 tonos (cada 10°) y 16 niveles de luminosidad. En la Figura, se trazan 16 curvas para los distintos niveles de luminosidad y puede verse que estas señales *RGB* presentan valores negativos y superiores al 100%. Cuando se convierten estas señales *RGB* analógicas en señales analógicas de luminancia y de diferencia de color utilizando las ecuaciones 4 del Cuadro 2, los niveles resultantes son los representados en la Fig. 2 (a)-(c). Puede verse que los valores se encuentran ahora dentro de la gama dinámica normal de 0-100% para la luminancia y de $\pm 50\%$ para la diferencia de color. Así pues, en el caso de las señales analógicas, hay una compatibilidad directa entre los sistemas de gama convencional y los colores equivalente en un sistema de gama ampliada.

Para la representación digital es necesario, al cuantificar las señales *RGB* de gama ampliada, utilizar una polarización en continua y factores de escala diferentes de los utilizados para la gama convencional, tal como se representa en las ecuaciones 5 del Cuadro 3, es decir, 160 y 48 en lugar de 219 y 16. Ello es debido a que los niveles de las señales *RGB* de gama ampliada con precorrección gamma rebasan la gama dinámica especificada en las Recomendaciones UIT-R BT.601 y UIT-R BT.1120 que corresponde a las líneas de trazo de la Fig. 1 (a)-(c). No obstante, al igual que con las señales analógicas, las señales cuantificadas de luminancia y de diferencia de color para la gama convencional y la gama ampliada entran dentro de la gama dinámica especificada en las Recomendaciones UIT-R BT.601 y UIT-R BT.1120 como indican las líneas de trazo discontinuo de la Fig. 2 (a)-(c). Se deduce que para la compatibilidad, la conversión entre señales *RGB* cuantificadas y señales cuantificadas de luminancia y de diferencia de color se requieren factores de escala distintos, como los de las ecuaciones 6 del Cuadro 3.

FIGURA 1
Niveles de señal RGB para los colores de Pointer

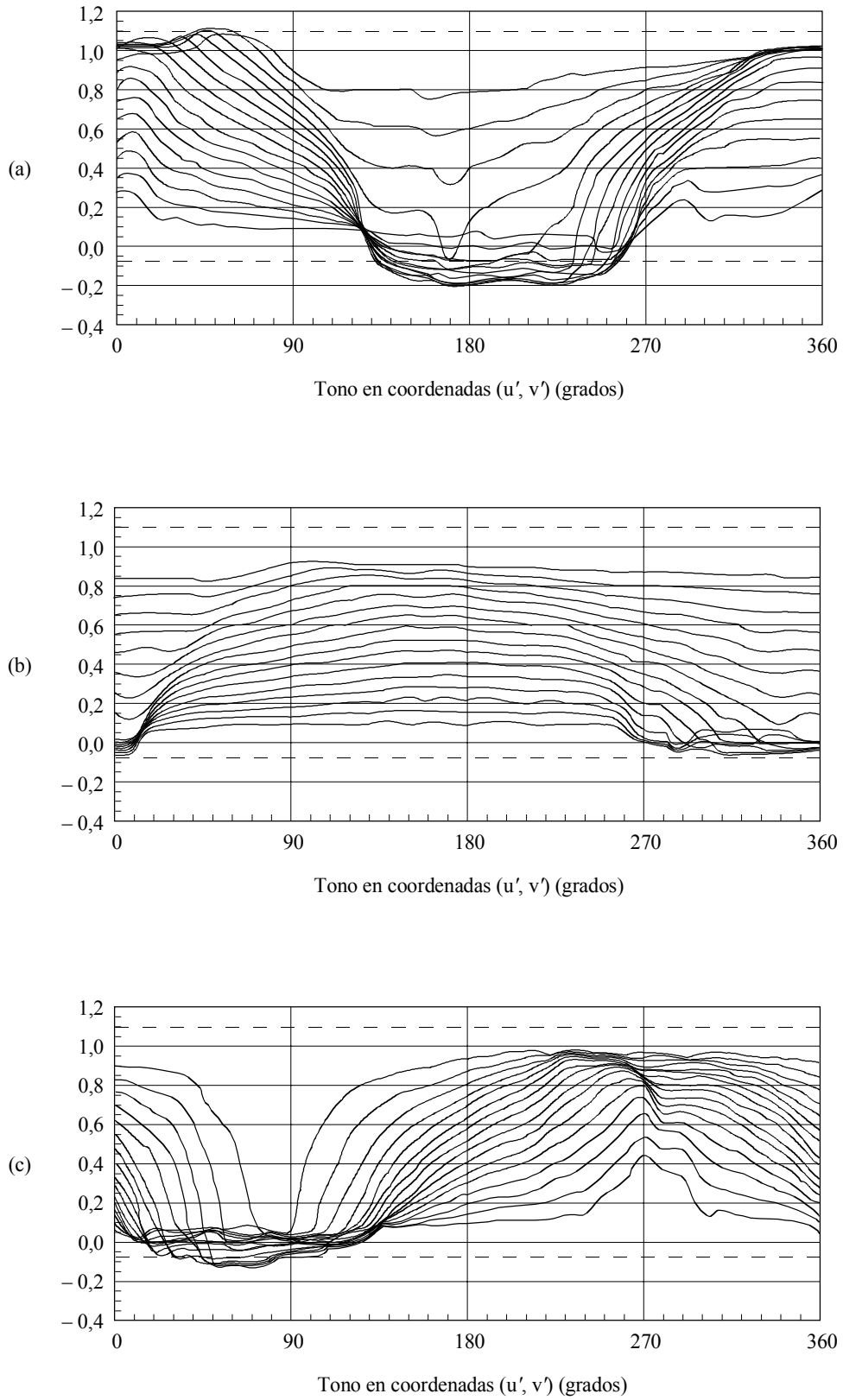
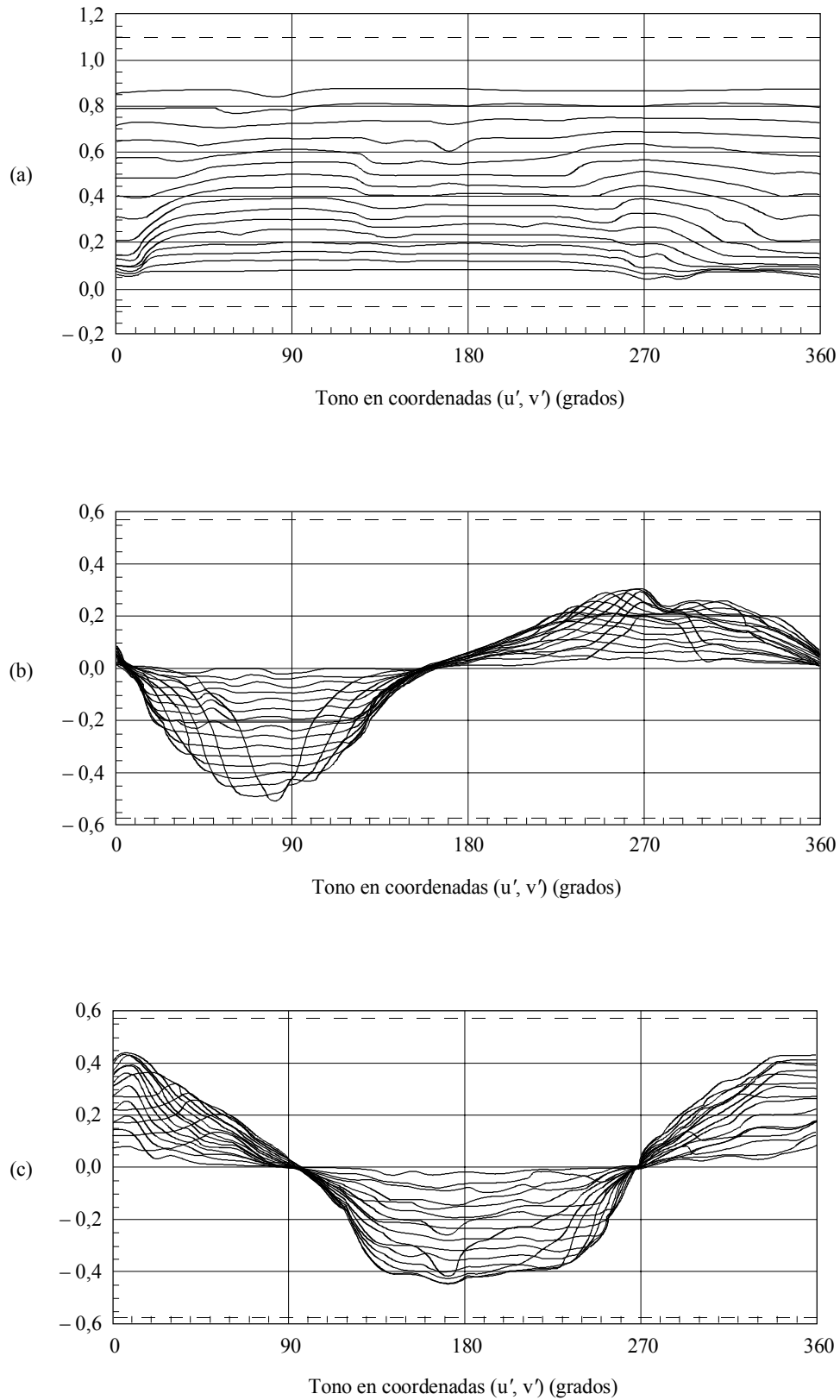


FIGURA 2

Niveles de señales de luminancia y de diferencia de color para los colores de Pointer



ANEXO 2

Obtención de los coeficientes enteros de las ecuaciones de la luminancia y la diferencia de color

Los sistemas digitales pueden introducir errores de cálculo en las señales de luminancia y de diferencia de color debido al número finito de bits de los coeficientes de la ecuación. Además, las señales de luminancia y de diferencia de color pueden adoptar valores ligeramente distintos, dependiendo de la secuencia de procesamiento de la señal, es decir, de la discrepancia entre las señales cuantificadas después del proceso matricial analógico y las señales con proceso matricial digital después de la cuantificación de las señales *RGB*. Para minimizar dichos errores y las discrepancias existentes, deben optimizarse los coeficientes enteros de las ecuaciones digitales. A continuación se indica el procedimiento de optimización y los coeficientes enteros resultantes para diversas longitudes binarias.

1 Sistema de gama de color convencional

En lo que sigue, m y n indican las longitudes binarias de los coeficientes enteros y de las señales digitales, respectivamente.

1.1 Ecuaciones digitales

A continuación se indica la ecuación digital de la luminancia para el sistema de gama de color convencional:

$$D'_Y = \text{INT} [0,2126 D'_R + 0,7152 D'_G + 0,0722 D'_B] \quad (1)$$

$$= \text{INT} \left[\frac{r'_{Y1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{Y2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{Y3}}{2^m} D'_B \right] \quad (2)$$

$$\approx \text{INT} \left[\frac{k'_{Y1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{Y2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{Y3}}{2^m} D'_B \right] \quad (3)$$

siendo r' y k' los valores reales de los coeficientes y de los coeficientes enteros, respectivamente, indicados a continuación:

$$r'_{Y1} = 0,2126 \times 2^m \qquad k'_{Y1} = \text{INT} [r'_{Y1}]$$

$$r'_{Y2} = 0,7152 \times 2^m \qquad k'_{Y2} = \text{INT} [r'_{Y2}]$$

$$r'_{Y3} = 0,0722 \times 2^m \qquad k'_{Y3} = \text{INT} [r'_{Y3}]$$

A continuación se describen las ecuaciones digitales de la diferencia de color para el sistema de gama de color convencional:

$$D'_{CB} = \text{INT} \left[\frac{-0,2126 D'_R - 0,7152 D'_G + 0,9278 D'_B}{1,8556} \times \frac{224}{219} + 2^{n-1} \right] \quad (4)$$

$$= \text{INT} \left[\frac{r'_{CB1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CB2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CB3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right] \quad (5)$$

$$\approx \text{INT} \left[\frac{k'_{CB1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CB2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CB3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right] \quad (6)$$

$$D'_{CR} = \text{INT} \left[\frac{0,7874 D'_R - 0,7152 D'_G - 0,0722 D'_B}{1,5748} \times \frac{224}{219} + 2^{n-1} \right] \quad (7)$$

$$= \text{INT} \left[\frac{r'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right] \quad (8)$$

$$\approx \text{INT} \left[\frac{k'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right] \quad (9)$$

siendo:

$$r'_{CB1} = -\frac{0,2126}{1,8556} \times \frac{224}{219} \times 2^m \quad k'_{CB1} = \text{INT} [r'_{CB1}]$$

$$r'_{CB2} = -\frac{0,7152}{1,8556} \times \frac{224}{219} \times 2^m \quad k'_{CB2} = \text{INT} [r'_{CB2}]$$

$$r'_{CB3} = \frac{0,9278}{1,8556} \times \frac{224}{219} \times 2^m \quad k'_{CB3} = \text{INT} [r'_{CB3}]$$

$$r'_{CR1} = \frac{0,7874}{1,5748} \times \frac{224}{219} \times 2^m \quad k'_{CR1} = \text{INT} [r'_{CR1}]$$

$$r'_{CR2} = -\frac{0,7152}{1,5748} \times \frac{224}{219} \times 2^m \quad k'_{CR2} = \text{INT} [r'_{CR2}]$$

$$r'_{CR3} = -\frac{0,0722}{1,5748} \times \frac{224}{219} \times 2^m \quad k'_{CR3} = \text{INT} [r'_{CR3}]$$

1.2 Procedimiento de optimización

La ecuación (3) muestra la expresión matricial digital de la señal de luminancia que incluye los errores de cálculo debidos a la longitud binaria finita de los coeficientes enteros. Cuando aumenta la longitud binaria de los coeficientes, el argumento (el valor entre []) de la ecuación (3) se aproxima al de la ecuación (2), lo que se traduce en una reducción de los errores o las discrepancias entre ecuaciones. Por tanto, la diferencia entre los argumentos de las ecuaciones (2) y (3) puede considerarse como una medida de la optimización de los coeficientes enteros. Como la diferencia de los argumentos depende de las señales *RGB* de entrada, la optimización de «error mínimo cuadrático» se define como aquella en que los coeficientes enteros se ajustan de forma que la suma de las diferencias cuadráticas de todas las entradas adquiere el valor mínimo, es decir, la que minimiza el valor de la ecuación (10).

$$\varepsilon'_Y = \sum_{\text{para todos los } RGB} \left\{ \left(\frac{k'_{Y1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{Y2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{Y3}}{2^m} D'_B \right) - \left(\frac{r'_{Y1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{Y2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{Y3}}{2^m} D'_B \right) \right\}^2 \quad (10)$$

Además de dar el error cuadrático mínimo, esta optimización de mínimos cuadrados minimiza automáticamente el error máximo que se produce en un color de entrada particular (combinación particular de señales *RGB* de entrada) así como la discrepancia entre las diferentes secuencias de procesamiento de la señal (formación matricial analógica y matricial digital).

El procedimiento de optimización es el siguiente:

Paso 1: Se toma como valor inicial de cada coeficiente entero k'_{Yj} ($j = 1, 2, 3$) el entero más próximo al valor real del coeficiente r'_{Yj} ;

Paso 2: Con los coeficientes enteros iniciales se calculan los errores cuadráticos o suma de diferencias cuadráticas (ecuación (10)) con la gama de señales *RGB* de entrada, por ejemplo, de 16 a 235 para un sistema de 8 bits (en el § 1.3 se describe un método sencillo de cálculo sin utilizar el sumatorio);

Paso 3: Se examinan los errores cuadráticos al aumentar/disminuir en uno cada coeficiente entero. Es preciso evaluar el total de 27 ($=3^3$) combinaciones, porque cada coeficiente puede adoptar tres valores, es decir, el valor aumentado, el disminuido y el idéntico al valor inicial.

Paso 4: Se selecciona la combinación de coeficientes que da el error cuadrático mínimo. Esta combinación es la resultante optimizada.

Se aplica el mismo procedimiento a las ecuaciones de diferencia de color, utilizando las fórmulas (11) y (12).

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{CB} = & \sum_{\text{para todos los } RGB} \left\{ \left(\frac{k'_{CB1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CB2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CB3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right. \\ & \left. - \left(\frac{r'_{CB1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CB2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CB3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{CR} = & \sum_{\text{para todos los } RGB} \left\{ \left(\frac{k'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right. \\ & \left. - \left(\frac{r'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

1.3 Método de cálculo simple para la suma de las diferencias cuadráticas

Expresando la diferencia entre los coeficientes enteros y reales como $\delta_{ij} = k'_{ij} - r'_{ij}$, y las señales *RGB* digitales como X_j , la suma de las diferencias cuadráticas de las ecuaciones (10)-(12) puede escribirse de la siguiente manera:

$$\varepsilon'_i = \frac{1}{2^m} \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_2=L}^H \sum_{X_3=L}^H (\delta_{i1}X_1 + \delta_{i2}X_2 + \delta_{i3}X_3)^2 \quad (13)$$

en la que L y H indican los límites inferior y superior de la gama de señales de entrada, respectivamente, para la que hay que optimizar los coeficientes enteros.

Como L y H son constantes en el sistema digital considerado, los sumatorios de X_j son también constantes. La ecuación (13) puede expresarse en función únicamente de δ_{ij} .

$$\varepsilon'_i = \frac{1}{2^m} \left\{ N_1 (\delta_{i1}^2 + \delta_{i2}^2 + \delta_{i3}^2) + 2N_2 (\delta_{i1}\delta_{i2} + \delta_{i2}\delta_{i3} + \delta_{i3}\delta_{i1}) \right\} \quad (14)$$

siendo:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \sum_{X_2=L}^H \sum_{X_3=L}^H \left(\sum_{X_1=L}^H X_1^2 \right) = \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_3=L}^H \left(\sum_{X_2=L}^H X_1^2 \right) = \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_2=L}^H \left(\sum_{X_3=L}^H X_1^2 \right) \\
 &= (H-L+1)^2 \{H(H+1)(2H+1)/6 - (L-1)L(2L-1)/6\} \\
 N_2 &= \sum_{X_3=L}^H \left(\sum_{X_1=L}^H \sum_{X_2=L}^H X_1 X_2 \right) = \sum_{X_1=L}^H \left(\sum_{X_2=L}^H \sum_{X_3=L}^H X_2 X_3 \right) = \sum_{X_2=L}^H \left(\sum_{X_3=L}^H \sum_{X_1=L}^H X_3 X_1 \right) \\
 &= (H-L+1) \{H(H+1)/2 - (L-1)L/2\}^2
 \end{aligned}$$

Así pues, el cálculo de los errores cuadráticos de las ecuaciones (10)-(12) puede efectuarse sencillamente mediante la ecuación (14).

2 Sistema de gama de color ampliada

2.1 Ecuaciones digitales

A continuación se describe la ecuación digital de la luminancia para el sistema de gama de color ampliada:

$$D_Y'' = \text{INT} \left[\left\{ (0,2126 D_R'' + 0,7152 D_G'' + 0,0722 D_B'') - 48 \cdot 2^{n-8} \right\} \frac{219}{160} + 16 \cdot 2^{n-8} \right] \quad (15)$$

$$= \text{INT} \left[\frac{r_{Y1}''}{2^m} D_R'' + \frac{r_{Y2}''}{2^m} D_G'' + \frac{r_{Y3}''}{2^m} D_B'' + \frac{r_{Y4}''}{2^m} \right] \quad (16)$$

$$\approx \text{INT} \left[\frac{k_{Y1}''}{2^m} D_R'' + \frac{k_{Y2}''}{2^m} D_G'' + \frac{k_{Y3}''}{2^m} D_B'' + \frac{k_{Y4}''}{2^m} \right] \quad (17)$$

siendo r'' y k'' los valores reales del coeficiente y los coeficientes enteros, respectivamente, que se indican a continuación.

$$r_{Y1}'' = 0,2126 \times \frac{219}{160} \times 2^m \quad k_{Y1}'' = \text{INT} [r_{Y1}'']$$

$$r_{Y2}'' = 0,7152 \times \frac{219}{160} \times 2^m \quad k_{Y2}'' = \text{INT} [r_{Y2}'']$$

$$r_{Y3}'' = 0,0722 \times \frac{219}{160} \times 2^m \quad k_{Y3}'' = \text{INT} [r_{Y3}'']$$

$$r_{Y4}'' = \left(-48 \cdot \frac{219}{160} + 16 \right) \cdot 2^{n-8} \times 2^m \quad k_{Y4}'' = \text{INT} [r_{Y4}'']$$

Las ecuaciones digitales de la diferencia de color para el sistema de gama de color ampliada se describen de la siguiente manera:

$$D_{CB}'' = \text{INT} \left[\frac{-0,2126 D_R'' - 0,7152 D_G'' + 0,9278 D_B''}{1,8556} \times \frac{224}{160} + 2^{n-1} \right] \quad (18)$$

$$= \text{INT} \left[\frac{r''_{CB1}}{2^m} D_R'' + \frac{r''_{CB2}}{2^m} D_G'' + \frac{r''_{CB3}}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right] \quad (19)$$

$$\approx \text{INT} \left[\frac{k''_{CB1}}{2^m} D_R'' + \frac{k''_{CB2}}{2^m} D_G'' + \frac{k''_{CB3}}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right] \quad (20)$$

$$D_{CR}'' = \text{INT} \left[\frac{0,7874 D_R'' - 0,7152 D_G'' - 0,0722 D_B''}{1,5748} \times \frac{224}{160} + 2^{n-1} \right] \quad (21)$$

$$= \text{INT} \left[\frac{r''_{CR1}}{2^m} D_R'' + \frac{r''_{CR2}}{2^m} D_G'' + \frac{r''_{CR3}}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right] \quad (22)$$

$$\approx \text{INT} \left[\frac{k''_{CR1}}{2^m} D_R'' + \frac{k''_{CR2}}{2^m} D_G'' + \frac{k''_{CR3}}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right] \quad (23)$$

siendo:

$$r''_{CB1} = -\frac{0,2126}{1,8556} \times \frac{224}{160} \times 2^m \quad k''_{CB1} = \text{INT} [r''_{CB1}]$$

$$r''_{CB2} = -\frac{0,7152}{1,8556} \times \frac{224}{160} \times 2^m \quad k''_{CB2} = \text{INT} [r''_{CB2}]$$

$$r''_{CB3} = \frac{0,9278}{1,8556} \times \frac{224}{160} \times 2^m \quad k''_{CB3} = \text{INT} [r''_{CB3}]$$

$$r''_{CR1} = \frac{0,7874}{1,5748} \times \frac{224}{160} \times 2^m \quad k''_{CR1} = \text{INT} [r''_{CR1}]$$

$$r''_{CR2} = -\frac{0,7152}{1,5748} \times \frac{224}{160} \times 2^m \quad k''_{CR2} = \text{INT} [r''_{CR2}]$$

$$r''_{CR3} = -\frac{0,0722}{1,5748} \times \frac{224}{160} \times 2^m \quad k''_{CR3} = \text{INT} [r''_{CR3}]$$

2.2 Procedimiento de optimización

El procedimiento de optimización es el mismo que para el sistema de gama de color convencional, utilizando las ecuaciones (24)-(26). Véase que para la ecuación de la luminancia, el número de combinaciones que han de evaluarse en relación con el error RMS es de 81 (= 3⁴) en lugar de 27, porque hay cuatro coeficientes que se han de optimizar.

$$\varepsilon_Y'' = \sum_{\text{para todos los } RGB} \left\{ \left(\frac{k''_{Y1}}{2^m} D_R'' + \frac{k''_{Y2}}{2^m} D_G'' + \frac{k''_{Y3}}{2^m} D_B'' + \frac{k''_{Y4}}{2^m} \right) - \left(\frac{r''_{Y1}}{2^m} D_R'' + \frac{r''_{Y2}}{2^m} D_G'' + \frac{r''_{Y3}}{2^m} D_B'' + \frac{r''_{Y4}}{2^m} \right) \right\}^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CB}'' &= \sum_{\text{para todos los } RGB} \left\{ \left(\frac{k_{CB1}''}{2^m} D_R'' + \frac{k_{CB2}''}{2^m} D_G'' + \frac{k_{CB3}''}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{r_{CB1}''}{2^m} D_R'' + \frac{r_{CB2}''}{2^m} D_G'' + \frac{r_{CB3}''}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CR}'' &= \sum_{\text{para todos los } RGB} \left\{ \left(\frac{k_{CR1}''}{2^m} D_R'' + \frac{k_{CR2}''}{2^m} D_G'' + \frac{k_{CR3}''}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{r_{CR1}''}{2^m} D_R'' + \frac{r_{CR2}''}{2^m} D_G'' + \frac{r_{CR3}''}{2^m} D_B'' + 2^{n-1} \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

2.3 Método de cálculo sencillo para la suma de las diferencias cuadráticas

Al igual que con el sistema de gama de color convencional, se obtiene la ecuación (27) para la luminancia del sistema de gama de color ampliada.

$$\begin{aligned} \varepsilon_Y'' &= \frac{1}{2^m} \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_2=L}^H \sum_{X_3=L}^H (\delta_{Y1} X_1 + \delta_{Y2} X_2 + \delta_{Y3} X_3 + \delta_{Y4})^2 \\ &= \frac{1}{2^m} \left\{ N_1 (\delta_{Y1}^2 + \delta_{Y2}^2 + \delta_{Y3}^2) + 2N_2 (\delta_{Y1}\delta_{Y2} + \delta_{Y2}\delta_{Y3} + \delta_{Y3}\delta_{Y1}) + 2N_3 (\delta_{Y1} + \delta_{Y2} + \delta_{Y3}) \delta_{Y4} + N_4 \delta_{Y4}^2 \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

en la que N_1 y N_2 vienen dadas en la ecuación (14), y

$$\begin{aligned} N_3 &= \sum_{X_2=L}^H \sum_{X_3=L}^H \left(\sum_{X_1=L}^H X_1 \right) = \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_3=L}^H \left(\sum_{X_2=L}^H X_1 \right) = \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_2=L}^H \left(\sum_{X_3=L}^H X_1 \right) \\ &= (H-L+1)^2 \{H(H+1)/2 - (L-1)L/2\} \\ N_4 &= \sum_{X_1=L}^H \sum_{X_2=L}^H \sum_{X_3=L}^H 1 \\ &= (H-L+1)^3 \end{aligned}$$

Para las ecuaciones de la diferencia de color, se aplica la misma fórmula que para el sistema de gama de color convencional (ecuación (14)).

3 Coeficientes enteros optimizados

A continuación se enumeran los coeficientes enteros optimizados resultantes para las longitudes binarias de 8-16.

CUADRO 4

Coefficientes enteros optimizados para el sistema de gama de color convencional

Bits de los coeficientes	Denominador	Luminancia Y			Diferencia de color C_B			Diferencia de color C_R		
		k'_{Y1}	k'_{Y2}	k'_{Y3}	k'_{CB1}	k'_{CB2}	k'_{CB3}	k'_{CR1}	k'_{CR2}	k'_{CR3}
m	2^m	k'_{Y1}	k'_{Y2}	k'_{Y3}	k'_{CB1}	k'_{CB2}	k'_{CB3}	k'_{CR1}	k'_{CR2}	k'_{CR3}
8	256	54	183	<u>19</u>	-30	-101	131	131	-119	-12
9	512	109	366	37	-60	-202	262	262	-238	-24
10	1 024	218	732	74	-120	-404	524	524	-476	-48
11	2 048	435	1 465	148	-240	-807	1 047	1 047	-951	-96
12	4 096	871	2 929	296	-480	-1 615	2 095	2 095	-1 903	-192
13	8 192	1 742	5 859	591	-960	-3 230	4 190	<u>4 189</u>	-3 805	-384
14	16 384	3 483	11 718	1 183	-1 920	-6 459	8 379	8 379	-7 611	-768
15	32 768	6 966	23 436	2 366	-3 840	-12 918	16 758	16 758	-15 221	-1 537
16	65 536	13 933	46 871	4 732	-7 680	-25 836	33 516	33 516	-30 443	-3 073

CUADRO 5

Coefficientes enteros optimizados para el sistema de gama de color ampliada

Bits de los coeficientes	Denominador	Luminancia Y				Diferencia de color C_B			Diferencia de color C_R		
		k''_{Y1}	k''_{Y2}	k''_{Y3}	k''_{Y4} (véase la Nota 1)	k''_{CB1}	k''_{CB2}	k''_{CB3}	k''_{CR1}	k''_{CR2}	k''_{CR3}
m	2^m	k''_{Y1}	k''_{Y2}	k''_{Y3}	k''_{Y4} (véase la Nota 1)	k''_{CB1}	k''_{CB2}	k''_{CB3}	k''_{CR1}	k''_{CR2}	k''_{CR3}
8	256	74	251	25	-12 723	-41	-138	179	179	-163	-16
9	512	149	501	51	-50 893	-82	-276	358	358	<u>-325</u>	-33
10	1 024	298	<u>1 003</u>	101	-203 571	-164	-553	717	717	-651	-66
11	2 048	596	2 005	202	-814 285	-329	-1 105	1 434	1 434	-1 302	<u>-132</u>
12	4 096	1 192	<u>4 009</u>	405	-3 257 139	-657	-2 210	2 867	2 867	-2 604	-263
13	8 192	2 384	8 019	810	-13 028 557	-1 314	-4 420	5 734	5 734	<u>-5 208</u>	-526
14	16 384	4 768	16 039	1 619	-52 114 227	-2 628	-8 841	11 469	11 469	-10 417	-1 052
15	32 768	9 535	32 078	3 238	-208 456 909	-5 256	-17 682	22 938	<u>22 937</u>	-20 834	-2 103
16	65 536	19 071	64 155	<u>6 476</u>	-833 827 635	-10 512	-35 363	45 875	45 875	-41 669	-4 206

NOTA 1 – El valor de k''_{Y4} depende de las longitudes binarias de la señal n , y los valores enumerados son los correspondientes a los casos de $m = n$. Se confirma que los valores optimizados son idénticos con los enteros iniciales más próximos y precisión de $m + n$ bits, cuando m y n están entre 8 y 16.

NOTA 2 – Las *cursivas* subrayadas indican los valores modificados por la optimización del entero más próximo inicial.

NOTA 3 – Para el sistema de gama de color convencional, la región de la señal *RGB* utilizada en la optimización es la gama de señal nominal de la Recomendación UIT-R BT.601 y sus ampliaciones, es decir, la gama $16 \times 2^{n-8} - 235 \times 2^{n-8}$ para un sistema de n bits. En el caso del sistema de gama de color ampliada, se trata de la gama de señal máxima de la Recomendación UIT-R BT.601 y sus ampliaciones, es decir $1 \times 2^{n-8} - 254 \times 2^{n-8}$.