

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R BT.2124-0
(01/2019)

Medida objetiva para la evaluación de la posible visión de diferencias de color en televisión

Serie BT
Servicio de radiodifusión
(televisión)



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2020

© UIT 2020

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R BT.2124-0^{1*}**Medida objetiva para la evaluación de la posible visión de diferencias de color en televisión**

(2019)

Cometido

En esta Recomendación se define una medida objetiva de la diferencia de color que puede utilizarse para la evaluación de la posible visión de pequeñas diferencias de color en las imágenes y señales de televisión. Para hacerlo, supone un estado de la adaptación del espectador que es el más sensible al color que se está evaluando. Las aplicaciones incluyen, entre otras, la calibración de pantallas, la caracterización de cámaras y pantallas, y la medición objetiva de las diferencias debidas al procesamiento de las imágenes.

Palabras clave

Calibración, color, HDR, HDR-TV, IC_{TCp}, medición, medida

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la fidelidad del color es un parámetro importante de los sistemas y equipos de televisión;
- b) que las mediciones subjetivas de la fidelidad del color son complejas y requieren tiempo;
- c) que una medida objetiva de las pequeñas diferencias de color que corresponden con percepciones subjetivas facilitará la evaluación de los sistemas y equipos de televisión;
- d) que las medidas existentes de diferencias de color suponen un estado de adaptación del espectador (por ejemplo, punto blanco, nivel de iluminación, entorno de visionado, etc.);
- e) que en el caso de la televisión, el estado del espectador es variable y a menudo desconocido;
- f) que es deseable disponer de una medida que indique la posible percepción de diferencias de color,

recomienda

que se calcule una medida de la diferencia de color, ΔE_{ITP} , para la evaluación de la posible visión de pequeñas diferencias de color en las imágenes y señales de televisión, como se describe en el Anexo 1.

¹ Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE).

* La Comisión de Estudio 6 de Radiocomunicaciones introdujo modificaciones redaccionales en esta Recomendación en febrero de 2020, de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

Anexo 1 (normativo)

Medida objetiva de la diferencia de color ΔE_{ITP}

1 Introducción

La medida ΔE_{ITP} definida en la presente Recomendación proporciona una evaluación objetiva de si la diferencia entre dos colores puede ser visible. Por conveniencia, ΔE_{ITP} se ha ajustado a una escala para que el valor 1 indique la posibilidad de una diferencia de color apenas perceptible. Para asegurar que esta medida no va a subestimar las diferencias de color, ΔE_{ITP} supone el estado de adaptación más sensible. Aunque esto significa que la medida ΔE_{ITP} no va a subestimar la visión de diferencias de color, puede sobreestimarla.

La medida de diferencia de color ΔE_{ITP} está derivada de IC_{TC_P} referenciado a la pantalla. La definición de IC_{TC_P} está como norma en el Cuadro 7 de la Recomendación UIT-R BT.2100, y se reproduce en esta Recomendación por comodidad. Para otras representaciones de señal, incluida XYZ, véase el Anexo informativo 2 sobre la conversión a RGB. En el Anexo informativo 3, se describe una medida alternativa para señales relativas a una escena. En el Anexo informativo 4, se ofrece un ejemplo de utilización en la calibración y caracterización de una pantalla.

2 Cálculo de ΔE_{ITP}

Paso 1: Convertir R, G, B lineal con respecto a la pantalla (de acuerdo con el Cuadro 10 de la Recomendación UIT-R BT.2100) a L, M, S lineal (de acuerdo con el Cuadro 7 de la Recomendación UIT-R BT.2100):

$$L = (1688R + 2146G + 262B)/4096$$

$$M = (683R + 2951G + 462B)/4096$$

$$S = (99R + 309G + 3688B)/4096$$

Paso 2: Convertir L, M, S lineal a L', M', S' no lineal aplicando la no linealidad de PQ definida en el Cuadro 4 de la Recomendación UIT-R BT.2100:

$$\{L', M', S'\} = EOTF^{-1}(F)$$

donde:

$$F = \{L, M, S\}$$

$$EOTF^{-1}(F) = \left(\frac{c_1 + c_2 Y^{m_1}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$$

$$Y = F/10000$$

$$m_1 = 2610/16384 = 0,1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78,84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0,8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18,8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18,6875.$$

Paso 3: Convertir L' , M' , S' no lineal a I , C_T , C_P como se define en el Cuadro 7 de la Recomendación UIT-R BT.2100:

$$I = 0,5L' + 0,5M'$$

$$CT = (6610L' - 13613M' + 7003S')/4096$$

$$CP = (17933L' - 17390M' - 543S')/4096$$

Paso 4: Modificar la escala de $IC_T C_P$ para obtener ITP:

$$I = I$$

$$T = 0,5 \times CT$$

$$P = CP$$

Paso 5: Calcular ΔE_{ITP} :

$$\Delta E_{ITP} = 720 \times \sqrt{(I_1 - I_2)^2 + (T_1 - T_2)^2 + (P_1 - P_2)^2}$$

donde I , T y P son una versión a escala de los componentes de color de una señal de televisión según el sistema PQ definido en el Cuadro 7 de la Recomendación UIT-R BT.2100; los subíndices 1 y 2 indican las dos señales a comparar; un valor de 1 es equivalente a una diferencia apenas perceptible cuando se observa en el estado de adaptación más crítico.

Anexo 2 (informativo)

Conversión a RGB lineal con respecto a la pantalla de acuerdo con la especificación de la Recomendación UIT-R BT.2100

Este Anexo informativo describe la conversión de varias representaciones de color utilizadas habitualmente a RGB lineal con respecto a la pantalla utilizado en el cálculo de la diferencia de color ΔE_{ITP} .

Conversión 1: X, Y, Z de CIE 1931 a R, G, B lineal con respecto a la pantalla

Cuando se miden pantallas físicas utilizando un colorímetro de imagen se obtienen a menudo valores de XYZ lineales. Estos valores pueden convertirse a RGB lineal con respecto a la pantalla siguiendo los pasos de conversión siguientes. El resultado puede utilizarse como entrada para el paso 1 del Anexo 1. Téngase en cuenta que esta operación puede combinarse con la conversión a L, M, S lineal del paso 1 del Anexo 1 para un cálculo más eficiente.

$$R = 1,716651187971268X - 0,355670783776392Y - 0,253366281373660Z$$

$$G = -0,666684351832489X + 1,616481236634939Y + 0,015768545813911Z$$

$$B = 0,017639857445311X - 0,042770613257809Y + 0,942103121235474Z$$

Conversión 2: Representación digital del color $IC_T C_P$

La representación del color $IC_T C_P$ puede utilizarse para calcular ΔE_{ITP} después de deshacer el cambio de escala digital y pasando directamente al paso 4 del Anexo 1. La conversión depende de la profundidad de bit y de la gama, reducida o completa, de la representación digital como se describe en el Cuadro 9 de la Recomendación UIT-R BT.2100.

Gama completa

$$I = I_D / (2^n - 1)$$

$$C_T = (C_{TD} - 2^{n-1}) / (2^n - 1)$$

$$C_P = (C_{PD} - 2^{n-1}) / (2^n - 1)$$

Gama reducida

$$I = ((I_D / 2^{n-8}) - 16) / 219$$

$$C_T = ((C_{TD} / 2^{n-8}) - 128) / 224$$

$$C_P = ((C_{PD} / 2^{n-8}) - 128) / 224$$

donde:

n es la profundidad de bit

$\{I_D, C_{TD}, C_{PD}\}$ son las representaciones digitales de las representaciones de color $I C_T C_P$.

Conversión 3: Representación digital de color RGB PQ de BT.2100 a RGB lineal con respecto a la pantalla

La representación RGB PQ puede convertirse a RGB lineal con respecto a la pantalla siguiendo los pasos de conversión indicados a continuación. La conversión depende de la profundidad de bit y de la gama, reducida o completa, de la representación digital. El resultado puede utilizarse como entrada para el paso 1 del Anexo 1. Este proceso sigue el proceso descrito en el Cuadro 4 de la Recomendación UIT-R BT.2100.

$$E' = \begin{cases} E'_D / (2^n - 1) & \text{Gama completa} \\ ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 & \text{Gama reducida} \end{cases}$$

donde n es la profundidad de bit.

$$\{R, G, B\} = EOTF(E')$$

donde:

$E' = \{R', G', B'\}$ las señales no lineales normalizadas.

$$EOTF(E') = 10\,000 * \left(\frac{\max [E'^{1/m_2} - c_1, 0]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$$

$$m_1 = 2610/16384 = 0,1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78,84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0,8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18,8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18,6875.$$

Conversión 4: Representación digital de color RGB HLG de BT.2100 a RGB lineal con respecto a la pantalla

La representación RGB HLG puede convertirse a RGB lineal con respecto a la pantalla siguiendo los pasos de conversión indicados a continuación. La conversión depende de la profundidad de bit y de la gama, reducida o completa, de la representación digital. La conversión supone una pantalla de luminancia de cresta $1\,000 \text{ cd/m}^2$ con la ganancia de usuario en 1,0 y el nivel de negro de usuario

en 0,0. El resultado puede utilizarse como entrada para el paso 1 del Anexo 1. Este proceso sigue el proceso descrito en el Cuadro 5 de la Recomendación UIT-R BT.2100.

$$E' = \begin{cases} E'_D / (2^n - 1) & \text{Gama completa} \\ ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 & \text{Gama reducida} \end{cases}$$

donde n es la profundidad de bit.

$$\{R, G, B\} = EOTF(E')$$

donde:

$$E' = \{R', G', B'\} \quad \text{son las señales no lineales normalizadas.}$$

$$EOTF(E') = OOTF(OETF^{-1}(E'))$$

$$OETF^{-1}(x) = \begin{cases} x^2 / 3 & 0 \leq x \leq 1/2 \\ \{\exp((x - c)/a) + b\} / 12 & 1/2 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$OOTF(x) = L_W \cdot Y_S^{\gamma-1} x$$

$$Y_S = 0,2627R_S + 0,6780G_S + 0,0593B_S$$

$$\{R_S, G_S, B_S\} = OETF^{-1}(E')$$

$$L_W = 1\,000 \text{ cd/m}^2$$

$$\gamma = 1,2$$

$$a = 0,17883277$$

$$b = 1 - 4a$$

$$c = 0,5 - a(\ln(4a))$$

Conversión 5: Representación digital de color RGB de BT.1886 a RGB lineal con respecto a la pantalla

La representación digital de color RGB de BT.709 puede convertirse a RGB lineal de la Recomendación UIT-R BT.2100 con respecto a la pantalla siguiendo los pasos de conversión indicados a continuación. La conversión depende de la profundidad de bit. Normalmente se utiliza un valor de $L_W = 100 \text{ cd/m}^2$ (según la Recomendación UIT-R BT.2035), con el valor de nivel de negro «b» en 0,0. El resultado puede utilizarse como entrada para el paso 1 del Anexo 1. Se utiliza la función de transferencia electroóptica (EOTF) especificada en el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R BT.1886.

$$E' = ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 \quad \text{Gama reducida}$$

donde n es la profundidad de bit.

$$\{R_{709}, G_{709}, B_{709}\} = EOTF(E')$$

$$R_{2100} = 0,6274R_{709} + 0,3293G_{709} + 0,0433B_{709}$$

$$G_{2100} = 0,0691R_{709} + 0,9195G_{709} + 0,0114B_{709}$$

$$B_{2100} = 0,0164R_{709} + 0,0880G_{709} + 0,8956B_{709}$$

donde:

$$E' = \{R', G', B'\} \quad \text{son las señales no lineales normalizadas}$$

$$EOTF(E') = L_W \times E'^{2,4}$$

Anexo 3 (informativo)

Fidelidad de color relativa utilizando HLG y la medida ΔE_{ITP_R}

La medida ΔE_{ITP} definida y descrita en el Anexo 1 proporciona una indicación de la diferencia de percepción entre dos señales en el caso de que se mostraran en una pantalla perfecta. La medida no puede aplicarse directamente a señales relativas a una escena que no definen explícitamente una luminancia de cresta a la cual debe mostrarse la señal. Para señales relativas a una escena, ΔE_{ITP} solo puede aplicarse cuando se supone una luminancia de cresta nominal de la pantalla. En otros niveles de luminancia de cresta de pantalla la medida solo proporciona una medida ordinal de la distorsión.

En algunas aplicaciones, por ejemplo en la evaluación del espaciado de cuantificación de codificación en HLG, puede ser más sencillo calcular una medida alternativa basada en el IC_{TC_P} HLG relativo, como se define en el Cuadro 7 de la Recomendación UIT-R BT.2100. Debido a diferencia de escala en relación con IC_{TC_P} PQ, para la medida relativa, T y P se calculan como sigue:

$$I = I$$

$$T = 0,5 \times 1,823698 \times C_T$$

$$P = 1,887755 \times C_P$$

Esta medida relativa proporciona una medida ordinal de la diferencia de percepción para las señales relativas a una escena. La distancia euclídea en este espacio ITP representa la magnitud de la diferencia de color, y se nombra ΔE_{ITP_R} .

La media ΔE_{ITP_R} es más similar a la medida PSNR utilizada para determinar el espaciado de cuantificación en la codificación de vídeo. Sin embargo, tiene la doble ventaja de que proporciona una mejor correlación con las diferencias de percepción y a la vez tiene en cuenta el color y la luminancia.

Anexo 4 (informativo)

Aplicación de ΔE_{ITP} para la evaluación de la fidelidad del color

1 Evaluación de la precisión del color en la pantalla

En el proceso de caracterización de una pantalla, un instrumento de medida típico es el colorímetro que indica medidas de cromaticidad XYZ o xyY. En este ejemplo se consideran medidas XYZ.

La precisión de una pantalla para la reproducción de la carta de ajuste de barras de colores de la Recomendación UIT-R BT.2110 puede obtenerse midiendo, para empezar, la esquina inferior derecha de la carta de ajuste (58% azul PQ de BT.709). El valor esperado puede calcularse como se indica a continuación:

- 1) Tomar los valores de código de gama completa de 10 bit que corresponde con la zona azul (pueden encontrarse en la Recomendación UIT-R BT.2110): [296, 201, 582].
- 2) Normalizar los valores de código dividiendo por 1023: [0,2893, 0,1964, 0,5689].

- 3) Convertir a RGB lineal utilizando la función de transferencia electroóptica (EOTF) PQ: [8,753, 2,291, 181,3].
- 4) Convertir a ITP como se describe en el Anexo 1. En consecuencia, el valor ITP del 58% azul PQ de BT.709 es: [0,3554, 0,1346, -0,1613].

2 Cálculo de la diferencia de color

Suponiendo que el colorímetro indica unos valores triestímulo XYZ de [36, 15, 190], estos valores XYZ pueden convertirse en ITP utilizando la conversión de XYZ a RGB indicada en el Anexo 2 y, posteriormente, siguiendo los pasos descritos en el Anexo 1. Siguiendo este proceso se obtienen valores de [0,3568, 0,1321, -0,1629].

La diferencia de color puede calcularse utilizando la ecuación de ΔE_{ITP} :

$$\Delta E_{ITP} = 720 \times \sqrt{(0,3554 - 0,3568)^2 + (0,1346 - 0,1321)^2 + ((-0,1613) - (-0,1629))^2}$$

$$\Delta E_{ITP} = 2,363$$

Para la calibración de pantallas, dos dígitos significativos ofrecen generalmente una precisión suficiente, y el resultado puede por lo tanto redondearse a 2,4. Este valor de 2,4 representa la diferencia entre el valor esperado y lo que, producido por la pantalla, sería visible en condiciones de adaptación críticas. En la práctica, una tolerancia inferior a 3 puede ser un nivel aceptable de precisión para una pantalla de referencia. Sin embargo, la tolerancia adecuada puede variar de manera significativa entre aplicaciones.

Algunas pantallas pueden producir colores fuera de la gama de colores de la Recomendación UIT-R BT.2100. En este caso, la conversión XYZ a RGB puede producir números negativos. ITP sigue siendo capaz de representar estos colores. Por lo tanto, si se desea medir la fidelidad de estos colores de fuera de la gama, los valores negativos no deberían impedir el proceso de conversión a ITP.

3 Evaluación del efecto del procesamiento de señal en la precisión del color

En el caso de que una señal con respecto a la pantalla se procese introduciendo pequeños errores de color, y se desee cuantificar el efecto subjetivo de estos errores de color, los valores de pixel de entrada y salida se convertirán al dominio ITP utilizando la no linealidad de PQ, y se calculará entonces ΔE_{ITP} para determinar la magnitud del error de color subjetivo. Un valor de $\Delta E_{ITP} > 1$ indica que el error de color puede percibirse.

Como ITP puede representar más colores que la Recomendación UIT-R BT.2100, puede ser necesario restringir la señal ITP a la gama de colores de la Recomendación UIT-R BT.2100. De esa manera se asegura que los valores de ΔE_{ITP} son representativos de la señal mostrada en una pantalla de referencia de la Recomendación UIT-R BT.2100. Para restringir la señal, los valores ITP se convertirán primero a RGB, los valores negativos se limitarán a cero, y se convertirán otra vez a valores ITP.