

国 际 电 信 联 盟

ITU-R
国际电联无线电通信部门

ITU-R BT.2124-0 建议书
(01/2019)

评估电视色差潜在可见性的客观指标

BT 系列
广播业务
(电视)



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保所有无线电通信业务（包括卫星业务）合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，在不受频率范围限制的情况下开展研究，并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由研究组支持的世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会来执行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的知识产权政策在ITU-R第1号决议所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC通用专利政策》中进行描述。专利持有者用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>处获取，在此还可获取《ITUT/ITUR/ISO/IEC通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R系列建议书

（也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REC/en>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	录制制作、存档和播出；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文学
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关话题

说明：该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版物
2020年，日内瓦

© 国际电联 2020

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R BT.2124-0 建议书*

评估电视色差潜在可见性的客观指标

(2019年)

范围

本建议书定义了一个客观的色差指标，适用于评估电视图像和信号中小色差的潜在可见性。为此，它假定观察者适应的状态对所评估的颜色最敏感。应用包括但不限于显示校准、相机和显示器特征，以及对由信号处理技术引入的差异的客观评估。

关键词

校准、度量、测量、颜色、HDR、HDR-TV、IC_{TCP}

国际电联无线电通信全会

考虑到

- a) 色彩保真度是电视系统和设备的重要参数；
- b) 对色彩保真度的主观评价既复杂又耗时；
- c) 对与主观感知相对应的小色差的客观测量或度量将有助于评估电视系统和设备；
- d) 现有的色差指标假设观察者的适应状态（例如白点、流明度级、观看环境等）；
- e) 对于电视而言，观众适应的状态是可变的并且通常是未知的；
- f) 希望有一个指标来表示色差的潜在可感知性，

建议

为了评估电视图像和信号中色差的潜在可见性，应如附件1所述来计算色差指标 ΔE_{ITP} 。

* 无线电通信第6研究组于2020年2月根据ITU-R第1号决议对此建议书进行了编辑性修正。

附件1 (规范性)

色差客观指标 ΔE_{ITP}

1 引言

本建议书中定义的 ΔE_{ITP} ΔE_{ITP} 指标提供了一个客观评估，以确定两种颜色之间的差异是否可见。为方便起见，对 ΔE_{ITP} ΔE_{ITP} 进行缩放，使值为1表示刚好可见的色差的可能性。为确保该指标不会低估色差， ΔE_{ITP} ΔE_{ITP} 假定最敏感的适应状态。虽然这意味着 ΔE_{ITP} ΔE_{ITP} 指标不会低估感知到的色差，但可能会过估它们。

ΔE_{ITP} 色差指标来自显示器参考 $IC_T C_P$ 。 $IC_T C_P$ 的定义在ITU-R BT.2100建议书的表7中作了规范性的规定，为方便起见，在本建议书中予以转载。对其他信号表示，包括XYZ，请参阅资料性附件2，以转换为RGB。在资料性附件3中给出了场景参考相关信号的备用指标。在资料性的4中给出了用于显示器校准和表征的示例。

2 计算 ΔE_{ITP}

步骤1：将显示器参考线性R、G、B（根据ITU R BT.2100建议书表10）转换为线性L、M、S（根据ITU-R BT.2100建议书表7）：

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

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

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

步骤2：通过应用ITU-R BT.2100建议书表4中定义的PQ非线性，将线性L、M、S转换为非线性L'、M'、S'：

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

其中：

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

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

$$Y = F / 10000$$

$$m_1 = 2610/16384 = 0.1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78.84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0.8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18.8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18.6875.$$

步骤3：将非线性L'、M'、S'转换为ITU-R BT.2100建议书表7中定义的I、C_T、C_P：

$$I = 0.5L' + 0.5M'$$

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

$$C_P = (17933L' - 17390M' - 5435S')/4096$$

步骤4: 缩放 $IC_T C_P$ 以创建ITP:

$$I = I$$

$$T = 0.5 \times C_T$$

$$P = C_P$$

步骤5: 计算 ΔE_{ITP} :

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

其中, I 、 T 和 P 是电视信号颜色分量的缩放版, 以ITU-R BT.2100建议书表7中定义的PQ系统来表示; 下标1和下标2表示要比较的两个信号; 当处于最关键的适应状态时, 值1相当于一个刚好可见的差异。

附件2 (资料性)

根据ITU-R BT.2100建议书中的规范转换为显示器参考线性RGB

本资料性附件描述了从几种常用颜色表示到用于计算 ΔE_{ITP} 色差的显示器参考线性RGB的转换。

转换1: CIE 1931 X、Y、Z至显示器参考线性R、G、B

使用成像色度计测量物理显示器时, 通常会报告线性XYZ值。可以按照下面的转换步骤将它们转换为显示器参考RGB。然后, 该结果可用作附件1步骤1的输入。注意, 此操作可以与附件1步骤1中的线性L、M、S操作相结合, 以实现高效计算。

$$R = 1.716651187971268X - 0.355670783776392Y - 0.253366281373660Z$$

$$G = -0.666684351832489X + 1.616481236634939Y + 0.015768545813911Z$$

$$B = 0.017639857445311X - 0.042770613257809Y + 0.942103121235474Z$$

转换2: 数字 $IC_T C_P$ 颜色显示

在撤销数字范围缩放后, $IC_T C_P$ 颜色表示可用于计算 ΔE_{ITP} , 然后直接进入附件1步骤4。如ITU-R BT.2100建议书表9所述, 转换取决于位的深度以及窄范围或全范围的数字表示。

全范围

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

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

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

窄范围

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

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

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

其中:

n 位深度

$\{I_D, C_{TD}, C_{PD}\}$ IC_TC_P颜色表示的数字表示。

转换3: 数字BT.2100 PQ RGB颜色表示至显示器参考线性R、G、B

遵循以下转换步骤, 可以将数字PQ RGB颜色表示转换为显示器参考线性RGB。转换取决于位的深度以及窄范围或全范围的数字显示。然后, 该结果可用作附件1步骤1的输入。这遵循ITU-R BT.2100建议书表4中描述的过程。

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

其中, n 是位深度。

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

其中:

$E' = \{R', G', B'\}$ 归一化的非线性信号。

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

$$m_1 = 2610/16384 = 0.1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78.84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0.8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18.8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18.6875$$

转换4: 数字BT.2100 HLG RGB颜色表示至显示器参考线性R、G、B

通过以下转换步骤, 可以将数字HLG RGB颜色表示转换为显示器参考RGB。转换取决于位的深度以及窄范围或全范围的数字表示。该转换假定一个1 000 cd/m²的峰值流明度显示器, 用户增益设置为1.0, 用户黑电平提升设置为0.0。然后, 该结果可用作附件1步骤1的输入。这遵循ITU-R BT.2100建议书表5中描述的过程。

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

其中, n 是位深度。

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

其中:

$E' = \{R', G', B'\}$ 归一化的非线性信号。

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

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

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

$$Y_S = 0.2627R_S + 0.6780G_S + 0.0593B_S$$

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

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

$$\gamma = 1.2$$

$$a = 0.17883277$$

$$b = 1 - 4a$$

$$c = 0.5 - a(\ln(4a))$$

转换 5: 数字BT.1886 RGB颜色表示至显示器参考线性R、G、B

通过以下转换步骤, 可以将数字BT.709 RGB颜色表示转换为显示器参考的ITU-R BT.2100建议书线性RGB。转换取决于位的深度。通常使用 $L_W = 100\text{cd/m}^2$ 的值(根据ITU-R BT.2035建议书), 黑电平值“b”设置为0.0。然后, 该结果可用作附件1步骤1的输入。这采用了ITU-R BT.1886建议书附件1中规定的EOTF。

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

其中, n 是位深度。

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

$$R_{2100} = 0.6274R_{709} + 0.3293G_{709} + 0.0433B_{709}$$

$$G_{2100} = 0.0691R_{709} + 0.9195G_{709} + 0.0114B_{709}$$

$$B_{2100} = 0.0164R_{709} + 0.0880G_{709} + 0.8956B_{709}$$

其中:

$E' = \{R', G', B'\}$ 归一化的非线性信号。

$$EOTF(E') = L_W \times E'^{2.4}$$

附件3 (资料性)

使用HLG和 ΔITP_R 指标的相对色彩保真度

附件1中定义和描述的 ΔE_{ITP} 指标提供了两个信号之间感知差异的指示，如果它们显示在一个完美的显示器上。该指标不能直接应用于未明确定义信号应显示的峰值流明度的场景参考相对信号。对场景参考信号， ΔE_{ITP} 只有在假定了标称峰值显示器流明度后方可应用。在其他峰值显示器流明度下，该指标仅提供对变形的顺次度量。

在一些应用中，例如评估HLG中的编码量化间距，根据ITU-R BT.2100建议书表7中的定义，基于相对HLG $IC_T C_P$ 计算备用指标可能会更简单。由于与PQ $IC_T C_P$ 相比在缩放上存在差异，因此对相对指标，T和P计算如下：

$$I = I$$

$$T = 0.5 \times 1.823698 \times C_T$$

$$P = 1.887755 \times C_P$$

该相对指标提供了对场景参考信号之感知差异的顺次度量。该ITP空间中的欧几里德距离表示色差的大小，并且被指定为 ΔITP_R 。

该 ΔITP_R 指标更类似于用于确定视频编码中量化间距的PSNR指标。然而，它具有双重优点，即它提供了更好的、与感知差异的关联性，同时考虑到了颜色和流明度。

附件4 (资料性)

ΔE_{ITP} 在色彩保真度评估中的应用

1 评估显示器颜色的准确度

在表征一个显示器时，典型的测量仪器是色度计，它以XYZ或xyY色度来报告测量值。该示例假设采用XYZ测量值。

再现ITU-R BT.2111建议书彩条图案时的显示器精确度可以通过测量图案的右下角（58% PQ BT.709蓝色）来获得。预期值可以计算如下：

- 1 取与蓝色补丁相对应的10位全范围代码值（这些可在ITU-R BT.2111建议书中找到）：[296,201,582]；
- 2 通过除以1023:[0.2893,0.1964,0.5689]，来归一化代码值；
- 3 使用PQ EOTF:[8.753,2.291,181.3]转换为线性RGB；
- 4 如附件1所述转换为ITP。因此，58% PQ BT.709蓝色的ITP值为：[0.3554, 0.1346, -0.1613]。

2 色差计算

假设色度计返回XYZ三激励值[36,15,190]，则遵循附件2中给出的XYZ到RGB的转换，可将XYZ值转换为ITP，然后按照附件1中的步骤进行操作，得到值[0.3568, 0.1321, -0.1629]。

可使用 ΔE_{ITP} 公式来计算色差：

$$\Delta E_{ITP} = 720 \times \sqrt{(0.3554 - 0.3568)^2 + (0.1346 - 0.1321)^2 + ((-0.1613) - (-0.1629))^2}$$

$$\Delta E_{ITP} = 2.363$$

对显示器校准，两位有效数字通常已足够精确，因此答案可以四舍五入为2.4。该值为2.4意味着在临界适应条件下，预期值与显示器产生值之间的差异将可见。在实践中，低于3的公差可能是参考显示器的可接受精确度水平。但是，不同应用之间的适当公差可能会有很大差异。

某些显示器可能会产生ITU-R BT.2100建议书色域之外的颜色。在这种情况下，XYZ到RGB的转换可能会产生负数。ITP仍然能够表示这些颜色。因此，如果需要测量这些超出色域之颜色的色彩保真度，则不应在转换为ITP的过程中限制负数。

3 评估信号处理对颜色准确度的影响

假设处理显示器参考信号并引入小的颜色误差，并且希望量化这些颜色误差的主观效果，则将使用PQ非线性把输入和输出像素值转换为ITP域，然后计算 ΔE_{ITP} ，以确定主观颜色误差的大小。 $\Delta E_{ITP} > 1$ 的值表示颜色误差可能是可感知的。

由于ITP可以表示超出ITU-R BT.2100建议书的颜色，因此可能需要将ITP信号限制在ITU-R BT.2100建议书的颜色范围内。这可确保 ΔE_{ITP} 值代表ITU-R BT.2100建议书参考监视器上所显示的信号。为限制信号，ITP值将首先转换为RGB，负值将被强制置为零，然后再将之转换回ITP。