

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R ВТ.2124-0
(01/2019)

**Объективная метрика
для оценки потенциальной видимости
цветовых различий в телевидении**

Серия ВТ
Радиовещательная служба
(телевизионная)



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2020 г.

© ITU 2020

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R ВТ.2124-0*

**Объективная метрика для оценки потенциальной видимости
цветовых различий в телевидении**

(2019)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации определяется объективная метрика оценки цветовых различий, пригодная для использования при оценке потенциальной видимости небольших цветовых различий в телевизионных изображениях и сигналах. При этом предполагается такое состояние зрительной адаптации, которое соответствует наибольшей чувствительности к рассматриваемому цвету. В число применений этой метрики, в частности, входят калибровка дисплеев, определение характеристик камер и дисплеев, а также объективная оценка различий, вносимых методами обработки сигналов.

Ключевые слова

Калибровка, метрика, измерение, цвет, HDR, HDR-TV, IC_{TCR}

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что верность цветопередачи – это один из важных параметров телевизионных систем и оборудования;
- b) что субъективная оценка верности цветопередачи является сложной и трудоемкой задачей;
- c) что наличие объективной меры – или метрики – небольших цветовых различий, соответствующих субъективному восприятию, облегчило бы оценку телевизионных систем и оборудования;
- d) что существующие метрики цветовых различий предполагают некоторое состояние зрительной адаптации (например, белая точка, уровень освещенности, условия просмотра и т. д.);
- e) что в случае телевидения состояние зрительной адаптации имеет переменный характер и зачастую неизвестно;
- f) что желательно иметь метрику, которая бы отражала потенциальную восприимчивость к цветовым различиям,

рекомендует

выполнять расчет метрики цветовых различий ΔE_{ITP} для оценки потенциальной видимости цветовых различий в телевизионных изображениях и сигналах согласно описанию, приведенному в Приложении 1.

* В феврале 2020 года 6-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла поправки редакционного характера в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

Приложение 1 (нормативное)

Объективная метрика цветовых различий ΔE_{ITP}

1 Введение

Метрика ΔE_{ITP} , определяемая в настоящей Рекомендации, обеспечивает объективную оценку того, могут ли различия между двумя цветами быть видимыми. В целях удобства ΔE_{ITP} нормирована таким образом, что значение 1 соответствует потенциально едва заметному различию. Чтобы исключить получение заниженных прогнозов цветовых различий при использовании этой метрики, предполагается состояние зрительной адаптации, характеризующееся наибольшей чувствительностью. Однако это означает, что, исключив вероятность заниженных прогнозов, ΔE_{ITP} может давать завышенные прогнозы цветовых различий.

Метрика цветовых различий ΔE_{ITP} определяется из дисплейного (display-referred) представления сигнала в формате IC_{TSP} . Нормативное определение формата IC_{TSP} дается в таблице 7 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 и воспроизводится в настоящей Рекомендации для удобства. О преобразовании в формат RGB других представлений сигнала, в том числе XYZ , см. в информационном Приложении 2. Альтернативная метрика для исходных (scene-referred) относительных представлений сигнала приведена в информационном Приложении 3. Пример применения метрики для калибровки и определения характеристик дисплея приведен в информационном Приложении 4.

2 Расчет метрики ΔE_{ITP}

Шаг 1: Преобразовать сигнал из дисплейного линейного представления R, G, B (согласно таблице 10 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100) в линейное представление L, M, S (согласно таблице 7 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100):

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

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

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

Шаг 2: Преобразовать линейное представление L, M, S в нелинейное представление L', M', S' , применив нелинейное преобразование системы PQ согласно таблице 4 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100:

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

где:

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

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

$$Y = F/10\,000;$$

$$m_1 = 2610/16\,384 = 0,1593017578125;$$

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

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

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

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

Шаг 3. Преобразовать нелинейное представление L', M', S' в представление I, C_T, C_P согласно таблице 7 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100:

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

$$C_T = (6610L' - 13\,613M' + 7003S')/4096;$$

$$C_P = (17\,933L' - 17\,390M' - 543S')/4096.$$

Шаг 4. Нормировать (масштабировать) $IC_T C_P$ для получения представления ITP :

$$I = I;$$

$$T = 0,5 \times C_T;$$

$$P = C_P.$$

Шаг 5. Вычислить значение ΔE_{ITP} по следующей формуле:

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

где I , T и P – нормированные значения цветовых компонент телевизионного сигнала в системе PQ, определенных в таблице 7 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100, нижними индексами 1 и 2 обозначены два сравниваемых сигнала, а значение 1 соответствует едва заметному различию при просмотре в наиболее чувствительном состоянии зрительной адаптации.

Приложение 2 (информационное)

Преобразование в дисплейное линейное представление RGB в соответствии со спецификациями, приведенными в Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100

В настоящем информационном Приложении описано преобразование из нескольких распространенных представлений цвета в дисплейное линейное представление RGB , используемое для расчета метрики цветовых различий ΔE_{ITP} .

Преобразование 1: Представление X , Y , Z (МКО 1931) – дисплейное линейное представление R , G , B

Значения в линейном представлении XYZ часто используются при измерении параметров цветности физических дисплеев с использованием видеоколориметров. Эти значения можно преобразовать в дисплейное представление RGB по приведенному ниже алгоритму. Результат преобразования можно затем использовать в качестве входных данных на шаге 1, описанном в Приложении 1. Следует отметить, что для эффективного выполнения вычислений эту операцию можно объединить с преобразованием в линейное представление L , M , S на шаге 1 из Приложения 1:

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

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

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

Преобразование 2: Цифровое представление цвета в формате $IC_T C_P$

Представление цвета в формате $IC_T C_P$ можно использовать для расчета ΔE_{ITP} , выполнив обратную перенормировку и перейдя непосредственно на шаг 4 из Приложения 1. Это преобразование зависит от битовой глубины и диапазона цифрового представления цвета (узкий или полный), как описано в таблице 9 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100.

Полный диапазон

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

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

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

Узкий диапазон

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

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

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

где:

n – битовая глубина;

$\{I_D, C_{TD}, C_{PD}\}$ – цифровые представления цвета, соответствующие представлению цвета в формате $IC_T C_P$.

Преобразование 3: Цифровое представление цвета RGB в системе PQ (ВТ.2100) – дисплейное линейное представление R, G, B

Цифровое представление цвета RGB в системе PQ может быть преобразовано в дисплейное линейное представление RGB по приведенному ниже алгоритму. Это преобразование зависит от битовой глубины и диапазона цифрового представления цвета (узкий или полный). Результат преобразования можно затем использовать в качестве входных данных на шаге 1, описанном в Приложении 1. Здесь воспроизводится процедура, описанная в таблице 4 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100:

$$E' = \begin{cases} E'_D / (2^n - 1) & \text{полный диапазон} \\ ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 & \text{узкий диапазон} \end{cases},$$

где n – битовая глубина;

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

где:

$E' = \{R', G', B'\}$ – нормированные нелинейные сигналы;

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

$$m_1 = 2610/16\,384 = 0,1593017578125;$$

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

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

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

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

Преобразование 4: Цифровое представление цвета RGB с гибридной гамма-логарифмической коррекцией (ВТ.2100) – дисплейное линейное представление R, G, B

Цифровое представление цвета RGB с гибридной гамма-логарифмической коррекцией (HLG) может быть преобразовано в дисплейное линейное представление RGB по приведенному ниже алгоритму. Это преобразование зависит от битовой глубины и диапазона цифрового представления цвета (узкий или полный). В данном преобразовании предполагается, что используется дисплей с пиковой яркостью изображения 1000 кд/м^2 и устанавливаемыми пользователем значениями коэффициента усиления 1,0 и повышения уровня черного 0,0. Результат преобразования можно затем использовать в качестве входных данных на шаге 1, описанном в Приложении 1. Здесь воспроизводится процедура, описанная в таблице 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100:

$$E' = \begin{cases} E'_D / (2^n - 1) & \text{полный диапазон} \\ ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 & \text{узкий диапазон} \end{cases},$$

где n – битовая глубина

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

где

$E' = \{R', G', B'\}$ – нормированные нелинейные сигналы;

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

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

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

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

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

$L_W = 1000 \text{ кд/м}^2$;

$\gamma = 1,2$;

$a = 0,17883277$;

$b = 1 - 4a$;

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

Преобразование 5: Цифровое представление цвета *RGB* (ВТ.1886) – дисплейное линейное представление *R, G, B*

Цифровое представление цвета *RGB* согласно Рекомендации МСЭ-R ВТ.709 может быть преобразовано в дисплейное линейное представление *RGB* согласно Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 по приведенному ниже алгоритму. Это преобразование зависит от битовой глубины. Как правило, используется значение $L_W = 100 \text{ кд/м}^2$ (в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R ВТ.2035) при значении уровня черного b , равном 0,0. Результат преобразования можно затем использовать в качестве входных данных на шаге 1, описанном в Приложении 1. Здесь применяется функция EOTF, определенная в Приложении 1 Рекомендации МСЭ-R ВТ.1886:

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

где n – битовая глубина;

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

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

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

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

где

$E' = \{R', G', B'\}$ – нормированные нелинейные сигналы;

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

Приложение 3 (информационное)

Относительная верность цветопередачи при использовании гибридной гамма-логарифмической коррекции (HLG) и метрики ΔITP_R

Метрика ΔE_{ITP} , определенная и описанная в Приложении 1, отражает воспринимаемые различия между двумя сигналами в гипотетическом случае отображения этих сигналов на идеальном дисплее. Эта

метрика неприменима непосредственно к исходным (scene-referred) относительным сигналам, в которых не определена явным образом пиковая яркость для отображения данного сигнала. Применительно к исходным сигналам метрика ΔE_{ITP} может использоваться лишь в предположении некоторой номинальной пиковой яркости дисплея. При других значениях яркости дисплея эта метрика служит лишь порядковой мерой уровня искажений.

В некоторых применениях, например при оценке шага квантования при кодировании с гибридной гамма-логарифмической коррекцией (HLG), более простой в вычислении может оказаться альтернативная метрика, основанная на относительных значениях $IC_T C_P$ для случая HLG, как определено в таблице 7 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100. Ввиду отличия в нормировании от $IC_T C_P$ в системе PQ вычисление значений T и P для относительно метрики производится по следующим формулам:

$$I = I;$$

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

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

Данная относительная метрика служит порядковой мерой воспринимаемых различий для исходных сигналов. Евклидово расстояние в пространстве ITP является скалярной характеристикой цветовых различий и обозначается как ΔITP_R .

Метрика ΔITP_R в большей степени аналогична метрике PSNR, которая используется для определения шага квантования в видеокодировании. Преимущество ее двоякое: во-первых, она лучше соотносится с воспринимаемыми различиями, а во-вторых, она одновременно учитывает и цветность, и яркость.

Приложение 4 (информационное)

Применение метрики ΔE_{ITP} для оценки верности цветопередачи

1 Оценка точности цветопередачи дисплея

При определении характеристик дисплея пользуются таким типовым измерительным инструментом, как колориметр, который отображает результаты измерений в цветовых координатах XYZ или xyY. В приводимом примере предполагается, что результаты измерений представлены в координатах XYZ.

Точность цветопередачи дисплея при воспроизведении испытательной таблицы с цветными полосами согласно Рекомендации МСЭ-R ВТ.2111 можно определить, произведя для начала измерение в правом нижнем углу испытательной таблицы (58% синего в системе PQ по ВТ.709). Ожидаемые значения можно вычислить следующим образом.

- 1 Взять 10-битовые полнодиапазонные кодовые значения, соответствующие области синего цвета (их можно найти в Рекомендации МСЭ-R ВТ.2111): [296, 201, 582].
- 2 Нормировать кодовые значения путем деления на 1023: [0,2893, 0,1964, 0,5689].
- 3 Преобразовать результат в линейное представление RGB, используя функцию EOTF в системе PQ: [8,753, 2,291, 181,3].
- 4 Преобразовать результат предыдущего шага в представление ITP, как описано в Приложении 1. Таким образом 58% синего в системе PQ по ВТ.709 соответствует следующее значение ITP: [0,3554, 0,1346, -0,1613].

2 Вычисление метрики цветовых различий

Пусть показания колориметра в трехцветных координатах XYZ равны [36, 15, 190]. Преобразовав эти показания в представление ITP , применив процедуру преобразования представления XYZ в RGB , приведенную в Приложении 2, а затем шаги из Приложения 1, получаем [0,3568, 0,1321, -0,1629].

Отсюда можно вычислить по соответствующей формуле значение ΔE_{ITP} :

$$\Delta E_{ITP} = 720 \times \sqrt{(0,3554 - 0,3568)^2 + (0,1346 - 0,1321)^2 + ((-0,1613) - (-0,1629))^2};$$
$$\Delta E_{ITP} = 2,363.$$

Для калибровки дисплея зачастую хватает двух значащих цифр, поэтому ответ можно округлить до 2,4. Такое числовое значение показывает, что различие между ожидаемым цветом и цветом, отображаемым на дисплее, будет видимо в наиболее чувствительном состоянии зрительной адаптации. На практике верхний предел допуска, меньший 3, может задавать приемлемый уровень точности для эталонного дисплея. Вместе с тем надлежащее значение верхнего предела допуска может существенно варьироваться в зависимости от конкретного применения.

Некоторые дисплеи могут воспроизводить цвета за пределами цветовой гаммы, предусмотренной Рекомендацией МСЭ-R ВТ.2100. В этом случае результат преобразования из представления XYZ в представление RGB может содержать отрицательные числа. Эти цвета могут быть тем не менее выражены в представлении ITP . Поэтому если требуется измерить верность цветопередачи применительно к цветам за пределами цветовой гаммы, отрицательные числа не должны усекаться по всей цепочке вычислений вплоть до преобразования в представление ITP .

3 Оценка влияния обработки сигнала на точность цветопередачи

Предположим, что дисплейный (display-referred) сигнал подвергается обработке, вносящей небольшие цветовые погрешности, и стоит задача количественно определить субъективное воздействие этих цветовых погрешностей. Для этой цели преобразуем входные и выходные значения пикселей в представление ITP с помощью нелинейного преобразования в системе PQ, а затем вычислим значение ΔE_{ITP} , чтобы определить величину субъективной цветовой погрешности. Значение $\Delta E_{ITP} > 1$ указывает на то, что эта цветовая погрешность может быть заметна.

Поскольку представление ITP позволяет выражать цвета за пределами цветовой гаммы, предусмотренной Рекомендацией МСЭ-R ВТ.2100, может оказаться целесообразным ограничить сигнал ITP этой цветовой гаммой. Это обеспечит гарантию того, что полученные значения ΔE_{ITP} будут адекватно отражать результаты отображения данного сигнала на эталонном мониторе, соответствующем Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100. Чтобы ограничить сигнал указанным образом, необходимо сначала преобразовать значения из представления ITP в представление RGB , все отрицательные значения заменить нулевыми, а затем преобразовать результат обратно в представление ITP .
