

Материал предназначен, как дополнительная справочная информация к программе Calibrilla

### Принципы построения шкал контроля при визуальной калибровке:

Статья полностью поясняет принципы построения визуальных тестов контроля при калибровке LUT видео адаптера. В ней кратко изложено, что такое видимый цвет для наблюдателя, как устроено наше зрение и какие из его особенностей легли в основу нашей программы визуальной калибровки многомониторных видео систем.

#### Вступление:

**Цвет** - это визуальное ощущение, возникающее у наблюдателя – человека. Он проявляется при наличии трёх факторов имеющих разную природу (физическую, химико-физическую, биологическую):

**опорного белого света** - фонового света (имеющего волновую природу и физические характеристики источника излучения), проходящего через оптическую среду или отражённого от предметов среды;

**цветового стимула** - самой среды, через которую проходит опорный белый свет или от которой он отражается (будучи частично поглощённым или усиленным физико-химическими свойствами среды, опорный свет меняет свои спектральные характеристики);

**наблюдателя**, который воспринимает спектральный цвет среды, образованный различными по своей природе цветовыми стимулами и опорным белым светом источника излучения, в нашем случае наблюдателем—человеком (в качестве наблюдателя может выступать и техническое средство — светочувствительная матрица сканера или фотоаппарата).

Субъективно воспринимаемый зрением цвет излучения зависит не только от его спектра, но и даже от психофизиологического состояния человека, на которое влияют фоновый свет и цвет, его цветовая температура, зрительная адаптация, а также от специфических свойств индивидуального глаза. К специфике зрения можно отнести наличие искажений, вызванных дальтонизмом и пр. случаями отличия зрительного ощущения от среднестатистической нормы, вызванные изменениями физиологии глаза, которые приводят к искажению восприятия.

Способность человеческого зрения адаптироваться к разным условиям освещённости и разной спектральной составляющей видимого фонового света (см. цветовая адаптация и цветовое постоянство, *ниже по тексту*), позволяет при восприятии цвета объекта классифицировать цвета и видеть их идентично при разной освещённости (см. метамеризм). Это, в свою очередь, влияет на способность человека с высокой точностью различать цвета и оттенки, воспринимать ахроматические (лишённые цветовой составляющей) и хроматические цвета при разном источнике освещения. В зарубежной литературе это свойство зрения встречается под термином **цветовое постоянство** (*color constancy*) визуального восприятия или **хроматическая адаптация** – особенность зрения человека считать цвет объекта постоянным, несмотря на смену условий просмотра. Если все цвета сюжета изменятся в одинаковой мере, глаз склонен приписывать это смене источника света и игнорировать изменение цветов. Именно это делает возможным использовать зрение человека для визуальной калибровки устройств цветоотображения.

На уникальной способности человеческого зрения сравнивать цветовые стимулы между собой и уравнивать их с высокой точностью построены и наши визуальные тесты, где человеческий глаз сравнивает участок с равномерным цветом с участком, образованным текстурой, состоящей из нескольких цветов. При этом два цвета, образующие равномерную текстуру одного из полей теста, являются либо взаимно дополнительными (комплементарными или вызывающими ощущение цветового контраста) хроматическими цветами или ахроматическими контрастными по отношению друг к другу тонами серой шкалы (тоновой контраст). Они (их цветовые координаты и взаимная площадь покрытия) выбраны в текстуре в определённой пропорции по отношению друг к другу, и являются равными по тону и цвету другому полю визуального теста, образованному одним

ахроматическим цветом (но могут быть тесты, где использованы и хроматические локальные цвета). При этом математически оба участка теста рассчитываются согласно гамма-функции, которая, в свою очередь, уравнивает энергетическую яркость при отображении цвета на мониторе с восприятием яркости человеком.

### Цветовое зрение:

*Уникальная способность человеческого зрения адаптироваться к условиям окружающей среды, и при этом различать и сравнивать цвета и оттенки, явилась основой для работы с цветом, его согласования в аппаратно-программной среде.*

В глазу человека содержатся два типа светочувствительных клеток (рецепторов): высокочувствительные палочки, отвечающие за сумеречное (ночное) зрение, и менее чувствительные колбочки, отвечающие за цветное зрение.

В сетчатке глаза человека есть три вида колбочек, максимум чувствительности которых приходится на красный, зелёный и синий участок спектра, то есть соответствует трем «основным» цветам. Они обеспечивают распознавание тысяч цветов и оттенков. Кривые спектральной чувствительности трёх видов колбочек частично перекрываются, что вызывает эффект метамерии. Очень сильный свет возбуждает все 3 типа рецепторов, и потому воспринимается, как излучение слепяще-белого цвета. Разную степень смешения спектральных характеристик, воспринимаемых клетками сетчатки глаза, мы видим как хроматические или ахроматические цвета.

Равномерное раздражение всех трёх элементов, соответствующее средневзвешенному дневному свету, также вызывает ощущение белого цвета. Трёхкомпонентную теорию цветового зрения впервые высказал в 1756 году М. В. Ломоносов, когда писал «о трёх материях дна ока» в своём труде «О происхождении света». Сто лет спустя её развил немецкий учёный Г. Гельмгольц. Параллельно существовала оппонентная теория цвета Эвальда Геринга. Её развили Давид Хьюбл (David H. Hubel) и Торстен Вайзел (Torsten N. Wiesel). Они получили Нобелевскую премию 1981 года за своё открытие.

Они предположили, что в мозг поступает информация вовсе не о красном (R), зелёном (G) и синем (B) цветах (теория цвета Юнга—Гельмгольца). Мозг получает информацию о разнице яркости — о разнице яркости белого (Y<sub>max</sub>) и чёрного (Y<sub>мин</sub>), о разнице зелёного и красного цветов (G – R), о разнице синего и жёлтого цветов (B – yellow), а жёлтый цвет (yellow = R + G) есть сумма красного и зелёного цветов, где R, G и B — яркости цветовых составляющих — красного, R, зелёного, G, и синего, B.

Имеем систему уравнений —  $Kч-б = Y_{max} - Y_{мин}$ ;  $Kgr = G - R$ ;  $Kbrg = B - R - G$ , где Kч-б, Kgr, Kbrg — функции коэффициентов баланса белого для любого освещения.

Практически это выражается в том, что люди воспринимают цвет предметов одинаково при разных источниках освещения - **цветовая адаптация**.

### Метамерия цвета:

*На метамерии основано воспроизведение цвета в полиграфии, фотографии, кино, телевидении, живописи. Благодаря ей из смеси разных по характеристикам спектрального поглощения наборов пигментов (или разных по спектру излучения наборов люминофоров в случае с телевизорами и мониторами) могут быть составлены цвета, воспринимаемые глазом, как одинаковые.*

**Метамерия** — свойство зрения, при котором свет различного спектрального состава может вызывать ощущение одинакового цвета.

- В более узком смысле, метамерией называют явление, когда два окрашенных образца цвета воспринимаются одинаковыми под одним источником освещения (имеют одну окраску), но теряют сходство при других условиях освещения (с другими спектральными характеристиками излучаемого света).

- Синоним этого слова, Метамеризм — редко используемый термин, калька с английского слова.

Физиологически метамерия зрения основана на строении периферического отдела зрительного анализатора. У человека эту функции выполняет сетчатка, в которой за восприятие цвета отвечают особые клетки — колбочки. Каждый вид колбочек интегрирует поступающую лучистую энергию в довольно широком диапазоне длин волн, и диапазоны чувствительности трёх видов колбочек перекрываются, различаясь лишь диаграммой величины чувствительности.

Человеческое зрение является трёхстимульным анализатором, то есть спектральные характеристики цвета выражаются всего в трех значениях. Если сравниваемые потоки излучения с разным спектральным составом производят на колбочки одинаковое действие, цвета воспринимаются как одинаковые.

Благодаря исследованиям и наблюдениям, предполагают, что в животном мире могут существовать четырёх- и даже пятистимульные цветовые анализаторы, и что цвета, воспринимаемые человеком одинаковыми, животным могут казаться разными. Все технические средства считывания и воспроизведения цвета созданы относительно человеческого визуального зрения и для человека. Похожая ситуация складывается и с системами регистрации изображений, как цифровыми, так и аналоговыми. Хотя в большинстве своём они являются трёхстимульными (три слоя эмульсии фотоплёнки, три типа ячеек матрицы цифрового фотоаппарата или сканера), их метамерия отлична от метамерии человеческого зрения. Поэтому цвета, воспринимаемые глазом как одинаковые, на фотографии могут получаться разными. Поэтому существует согласование, закреплённое и описанное в соответствующих стандартах при настройке систем контроля цветовоспроизведения и отображения.

#### От природы явления к практическому применению:

В случае с отраженным или проходящим через прозрачные оригиналы светом, возникновение ощущения одинакового цвета при использовании разных наборов пигментов зависит от освещения. Отраженный или проходящий свет частично поглощается пигментом, но конечный спектр воспринимаемого глазом света зависит не только от характеристики пигмента, но и от характеристики источника освещения. Из-за этого два образца, воспринимающиеся одинаковыми при дневном свете, могут различаться на глаз при искусственном освещении.

Принцип метамерии приводит и к тому, что при монохроматичной подсветке некоторые цвета теряют насыщенность. В полиграфии и промышленности расчет цветовых различий (дельта E) при метамерии, когда два цвета при одних условиях освещения могут казаться одинаковыми, а при других — разными, может быть проведен с помощью специального математического обеспечения. Программы позволяют компенсировать искажения зрительного восприятия от метамерии при расчетах цветовых различий в следующих системах координат: dE\*CIELAB, dE FMCII, dE CMC, dE\*94, dE\*2000.

$dE(CIELAB\ 1976) = \sqrt{(L-L')^2 + (a-a')^2 + (b-b')^2}$

При создании визуального теста был использован принцип метамерности, где два образца цветов, состоящих из разных по набору базовых цветов, выступили в роли метамерной пары и уравнивались визуально при определённых целевых условиях калибровки. При этом между собой сравнивались текстурные плашки, состоящие из нескольких таких базовых цветов, и текстурные плашки с равномерными по цвету плашками. Текстурные плашки выглядят, как поласатая горизонтальная «зебра», где чередуются базовые цвета, её образующие. При этом рисунок муара и пропорция одних цветов по отношению к другим может быть и иной. В нашем случае выбрана пропорция 1:1, т.е.  $\frac{1}{2}$  одного цвета и  $\frac{1}{2}$  другого цвета участка с муаром приравнены по цвету и тону плашке описанной одним цветом при начальных целевых условиях калибровки: заданной цветовой температуре

опорного белого цвета, энергетической яркости для точек белого и чёрного, функции гамма-компенсации.

Присваиваем одному значению, ( $\gamma$ ) иное название, для упрощения математической записи.

Гамма функция ( $\gamma$ =Gamma) уравнивающая восприятие энергетической яркости человеком (Yout), от подаваемого входного напряжения (lin=Xin)

При этом получим следующее равенство:

$Output = (f \text{ input})^{\gamma}$ ,

где  $(f \text{ input})^{\gamma} = \text{Max} * ((Xin/\text{max})^{\gamma})$

при максимальной цене шкалы (Max:=255 и max:=255 для второй части выражения, в случае, если «WP»=0, а «BP»=255) которая, в свою очередь, может изменяться при изменении значений для диапазона и образующих его конечных точек шкалы — «BP» (точка чёрного) и «WP» (точка белого) — параметров, зависящих от инструментальной настройки из экранного меню монитора, или же средствами управления программы для инструментов: «уровня чёрного» (подсветки), «яркости» и «контраста».

При этом, поле половинной яркости монитора, если использовать конечные значения диапазона тонов (Max:=255), выбрав для нашей «зебры» точку белого и точку чёрного («WP»=0, а «BP»=255), будет иметь вид:

$(1/2) = (Xin./\text{Max})^{\gamma}$

При прологорифмировании обеих частей выражения, мы получим:

$\gamma = (\lg 10(1/2)) / (\lg 10(Xin/\text{Max}))$ ,

или  $\gamma = (\lg 10(0,5)) / (\lg 10(Xin/255))$ ,

Но учитывая, что это выражение верно лишь для выбранной точки правки в единственной позиции тоновой шкалы (и в единственной точке кривой тонопередачи), мы воспользуемся иной формулой, образуемой при сложении двух цветов (X1 и ... Xn) с учётом гамма-функции:

$Xin' = ((fn) * (X1^{\gamma} + \dots + Xn^{\gamma}))^{(1/\gamma)}$ ,

где  $(fn) = 1/n$ , n-зависит от пропорции и количества цветов в поле с муаром,

а  $Xin'$  - это суммарная энергетическая яркость канала цветности.

Во время визуальной калибровки мы должны уравнивать поля образуемые  $Xin'$  и  $Xin$  согласно выбранной целевой  $\gamma = \gamma_{\text{Monitor.icc}}$

Соответственно координаты для точки правки X (Xr, Xg, Xb) это наше искомое, которое соответствует серой плашке теста. А координаты точек X1 и X2 образующих муар «зебру», в случае с ахроматической шкалой, будут иметь вид X1(x1\_r, x1\_g, x1\_b) и X2(x2\_r, x2\_g, x2\_b), что соответствует настраиваемому каналу яркости, рассчитываемому согласно формуле принятой для SDTV (телевидение стандартной чёткости (720p)):

$X(\text{канала «Яркости»}) = L(\text{sdtv})$ , где  $L(\text{sdtv}) = R(601Y) * 0,299 + G(601Y) * 0,587 + B(601Y) * 0,114$

Монохромное представление видеосигнала или светлота, как величина, описывающая участок сцены изображения с учётом её восприятия для наблюдателя человека. При этом формула для светлоты (L) рассчитана и согласована относительно других величин цветовоспроизведения, которые описаны для (SDTV, EDTV, HDTV).

Полный список стандартов: DTV, SDTV, EDTV, HDTV, RPTV, DVI, DLP, LCD, LCOS, plasma, progressive scan, component video, S-video, composite video, etc.

Из них наиболее значимы SDTV, HDTV и UHD TV, учитывая и то, что остался видеоконтент от каждого из предыдущих стандартов, который будет в дальнейшем транслироваться и отображаться в последующих стандартах.

SDTV – телевидение стандартной чёткости (720p);

HDTV – телевидение повышенной чёткости (1080i);

UHDTV – телевидение ультра-высокой чёткости, которое в свою очередь делится на несколько разрешений:

UHDTV-1 – (3840 x 2160) и (4096 x 2160) *DCI 4K / Cinema 4K*;

UHDTV-2 – (7680 x 4320) *8K UHDTV / Super Hi-Vision*.

*(\*для HDTV) Аргумент, что чересстрочная развертка 1080i (1080x1920, 30 кадров/сек.) дает изображение лучшего качества, чем прогрессивная развертка 720p (720x1280, 60 кадров/сек.), так как первая имеет в два раза больше элементов изображения (пикселей) на кадр, есть самый последний ошибочный довод. Предлагается он теми, кто годами продвигает систему NHK 1125/60 в качестве мирового стандарта производства. Все приводимые аргументы в процессе сравнительного исследования были отвергнуты, как ложные, а этот данный аргумент - просто последняя попытка навязать устаревшую технологию американской индустрии телевидения. На самом деле, вертикальное разрешение, действительно достигаемое в формате 1080i, ниже, чем в формате 720p. В то же время горизонтальное разрешение значительно меньше 1920 пикселей, что было ясно продемонстрировано в ходе объективных испытаний, проведенных АТТС. Экспертные оценки, выставленные АТЕL, показали, что воспринимаемое качество изображения двух систем сопоставимо.*

Именно по этой причине, в описании канала «Яркости» мы воспользовались формулой, описывающей преобразование цветного хроматического изображения, в чёрно-белое ахроматическое изображение, с сохранением яркостных и контрастных характеристик визуальной сцены, согласно стандарту телевидения SDTV.

Для SDTV, (Рекоменд. 601) стандартно характеризует эти коэффициенты:

$$L(sdtv) = R(601Y) \cdot 0,299 + G(601Y) \cdot 0,587 + B(601Y) \cdot 0,114$$

Для HDTV, (Рекоменд. 709) стандартизирует эти коэффициенты:

$$L(hdtv) = R(709Y) \cdot 0,2126 + G(709Y) \cdot 0,7152 + B(709Y) \cdot 0,0722$$

Для UHDTV, (Рекоменд. 2020) стандартизирует эти коэффициенты:

$$L(uhdtv) = R(2020Y) \cdot 0.2627 + G(2020Y) \cdot 0.6780 + B(2020Y) \cdot 0.0593$$

После всего вышеописанного, разъясняющего принципы, взятые в основу визуальной калибровки, попробуем сформулировать всё намного более кратко.

— Визуальная калибровка устройств отображения цвета основана на *click-balancing* — методе балансировки серого в изображении, путем клика по области, которая, по вашему мнению, должна быть нейтральной. При этом используется возможность глаза подстраиваться под изменение точки белого — **адаптация точки белого** (*white point adaptation*), что имеет отношение к цветовому постоянству зрения стандартного наблюдателя (человека).

— Сами шкалы визуального контроля, основаны на **комплементарных (дополнительных) цветах** (*complementary colors*). Комплементарными или взаимодополняющими, называются два цвета, которые дают серый (или белый) цвет при наложении. Например, красный и голубой — комплементарные цвета. Результатом визуальной калибровки, является достижение сбалансированного по серому (*gray-balanced*) цветового пространства — цв. пространство, в котором каждый нейтральный пиксел имеет равные значения R, G и B, называется сбалансированным по серому. Достигается это балансированием по тону и цвету между хроматическими комплементарными парами цветов и равными им по тону при заданном значении гаммы ахроматическими серыми плашками.

— **Визуальный калибратор** (*visual calibrator*) — программа, в нашем случае это **Calibrilla**, используемая для калибровки монитора, требующая визуального сравнения патчей, отображаемых на дисплее, вместо точного измерения характеристик с помощью приборов. Результат – визуально линеаризованное устройство в режиме Native (исходный цветовой баланс монитора).

Основной материал составлен, Alex Sikorsky © 2010, переработан в 2011г, дополнен в 2019г.

По материалам Wiki-педии и 2го издания «Управление цветом» B.Fraser, C.Murphy, S.Bunting, А также работ Gernot Hoffmann «Measuring Tone Reproduction Curves for CRT Monitors Examples for TFT Monitors», «The Gamma Question», «Hardware Monitor Calibration» и др. его статьями и материалами с которыми можно ознакомиться на (<http://docs-hoffmann.de/>). При составлении использовались спецификации и документы МСЭ (Международный союз по электросвязи при ООН) и другие источники. Собрано и отредактировано для пользователей программы Calibrilla v.3.4/4.2 и v.5.0 : Алексей Кобзарь, 2011-2019г. При нахождении опечаток и возможных ошибок пишите автору материала или на сайт поддержки программы.