

Будущее настолько ярко, что мне нужны темные очки: тестовые таблицы для HDR

Подготовлено для презентации на ежегодной технической конференции и выставке SMPTE 2016

Р. Норман Херст, SRI International

Общие положения

Технология расширенного динамического диапазона HDR (High Dynamic Range) и широкой цветовой гаммы WCG (Wide Color Gamut) вызывает сложности при разработке тестовой таблицы для визуальной оценки систем. В парадигме предыдущего стандарта Rec. 709 существовала шкала 0...100%, а вся система и любой подходящий дисплей должны были отображать полный диапазон значений по этой шкале. Однако шкала, определяемая SMPTE-2084, простирается до значений вплоть до 10 тыс. кд/м², так что даже профессиональные мониторы не смогут отображать данные ниже определенного уровня яркости, что определяется конструкцией каждого конкретного монитора. Более того, «контейнер» цветовой гаммы по BT-2020 шире, чем цветовой диапазон любого профессионального монитора, поэтому оттенки, выходящие за пределы возможностей каждого конкретного монитора, будут этим монитором преобразованы. Этот дефицит предсказуемого поведения мониторов на крайних значениях цвета и яркости создает дополнительные трудности при разработке визуальных тестовых таблиц.

Введение

Еще в 2011 году в журнале SMPTE я описывал тестовую таблицу, позволяющую выявить ошибки системы путем простого просмотра таблицы на дисплее. Никакого другого оборудования не требовалось, только глаза (и уши для опреде-

ления синхронизации изображения и звука). Таблица, названная Visualizer, была создана в основном для систем, отвечающих Rec. 709, то есть тех, которые мы сейчас называем SDR – стандартный динамический диапазон (Standard Dynamic Range). Несколько лет назад мы начали задумываться, как сделать HDR-версию таблицы Visualizer.

Как сделать версию Visualizer для HDR/ITU Rec.2020?

На некотором уровне HDR/2020 просто задает еще одно цветовое пространство. Рекомендация ITU BT.2020 определяет хроматические координаты x, y для RGB и значения x, y для белого, тогда как ST-2084 определяет передаточную функцию gamma, которую часто называют PQ – качество с учетом восприятия (Perceptual Quality). Может ли создание HDR-версии для Visualizer быть столь простым, как преобразование из цветового пространства ITU Rec.709 в комбинированное цветовое пространство SMPTE 2084/Rec.2020? Надо заметить, что SMPTE RP-177 определяет процедуру преобразования из одного цветового пространства путем трансформаций XYZ.

Чего НЕ НАДО делать

Если мы просто переделаем Rec.709 Visualizer под SMPTE-2084/BT.2020, то есть значению 940 (100 IRE) поставим в соответствие значение 940 (10000 кд/м² по ST-2084), это приведет к тому, что таблица станет чрезмерно яркой и не очень применимой (рис. 1).

Средняя яркость преобразованного изображения теперь превысила 4000 кд/м²! Могут потребоваться темные очки при использовании монитора, который отображал бы изображения с такими уровнями яркости. Но большинство HDR-мониторов имеют пиковый лимит яркости для малых зон в 1000 кд/м², поэтому такая новая конвертированная тестовая таблица на подобном мониторе будет практически не видна. То есть этот подход к созданию тестовой таблицы HDR нельзя считать подходящим.

Максимальная яркость рассеивания и яркость отражения

После обсуждения со многими отраслевыми экспертами мы определили, что, поскольку естественные изображения по большей части состоят из диффузионных (рассеивающих) рефлекторов, а очень ярких – отражающих – рефлекторов содержат крайне мало, львиная часть новой тестовой таблицы Visualizer должна иметь «нормальную» яркость рассеивания с небольшим количеством участков, достигающих пиковой яркости отражения. Соответственно, мы решили, что большинство участков должны соответствовать значению maxDiffuseNits (максимальная яркость рассеивания), а лишь несколько – значению maxSpecularNits

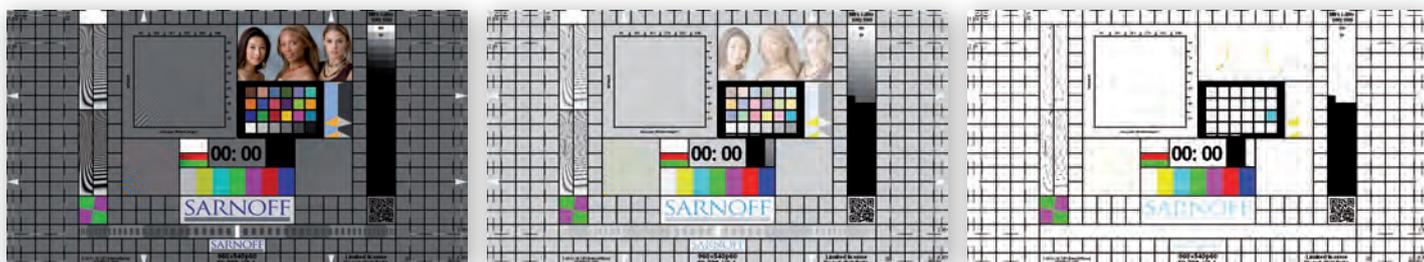


Рис. 1. Как НЕ НАДО делать тестовую таблицу HDR: слева – Rec. 709 Visualizer; в центре – левое изображение конвертировано в ST.2084/BT.2020; справа – преобразованное изображение обрезано на уровне 1000 кд/м²

Связь стала ещё мобильнее

EAETEC

Новая серия **UltraLITE**

до 7 абонентов без базовой станции

6 часов непрерывной работы

до 400 метров радиус действия

www.proland.ru

реклама

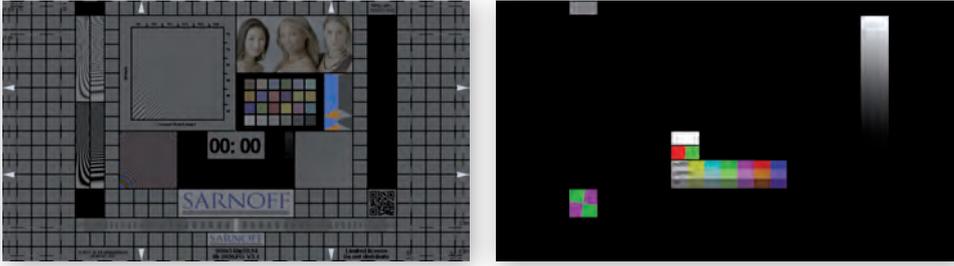


Рис. 2. Основная часть таблицы визуализирована при 100 кд/м² по «рассеивающей» шкале: слева – затемнены отражающие участки; справа – затемнены рассеивающие участки

(максимальная яркость отражения). SMPTE-2084 (PQ) уже определяет максимальную яркость для верхнего значения (10 тыс. кд/м²), но, в отличие от, например, S-Log3 и ACESproху, не показывает, где на передаточной функции лежит «нормальное» 100-процентное отражение рассеивания. Для формирования тестовой HDR-таблицы Visualizer нам надо было выбрать значение «нормального» 100% отражения рассеивания.

Максимальное рассеяние – выбор в пользу 100 кд/м²

Мы решили взять 100 кд/м² за 100% отражения рассеивания, опираясь на опыт работы в цветокоррекции и длительное использование ЭЛТ-мониторов. На рис. 2 показано, какие участки таблицы визуализированы как рассеивающие, а какие – как отражающие.

Теперь это линейный световой мир

Когда мы изначально разрабатывали Visualizer, это был «мир Rec.709», так что некоторые участки таблицы разрабатывались на базе допущения, что целевая система соответствует Rec.709 или близко к этому.

Для серого фона, к примеру, исходно было выбрано фиксированное значение в 96/255 из диапазона от черного к белому (38 IRE), вне зависимости от целевой системы. Яркость фона поэтому зависела от гаммы целевого цветового пространства. В соответствии с Rec. 709 значение 38 IRE – это 15% отражения. В цветовом пространстве Adobe RGB (1998) это же значение соответствует 12% отражения. Разница не слишком большая, чтобы о ней волноваться.

Но применительно к системам отображения HDR возникает проблема, поскольку в них используется гораздо более «жесткая» кривая гаммы. 38 IRE в PQ соот-

ветствует 26% отражения (100%=100 кд/м²), а в системе HLG (с гибридной логарифмической гаммой) это же значение соответствует 58% эталонного белого. В результате мы переопределили значение серого фона для Visualizer так, чтобы оно стало принимать линейное значение света – 18% средне-серого. Побочным эффектом этого является то, что калиброванный температурный шум на сером фоне действует как линейный световой шум, что, вероятно, в реальности ближе к шуму камеры – основного источника температурного шума в цифровых видеосистемах.

Линейные синусоидальные световые волны

На левой стороне исходной таблицы Visualizer находится пара синусоидальных измерительных блоков (рис. 3), один из которых относится к горизонтальным частотам, а второй – к вертикальным. Они специально вставлены в виде синусоид в условных значениях, а не как линейные синусоидальные световые волны, поскольку их предназначение – показывать результат операций фильтрации и масштабирования, которые традиционно выполняются в системе координат условных значений. Однако когда дисплей декодирует гамма-функцию, синусоидальные волны превращаются в нелинейные, и, как результат, даже без применения какого-либо масштабирования или

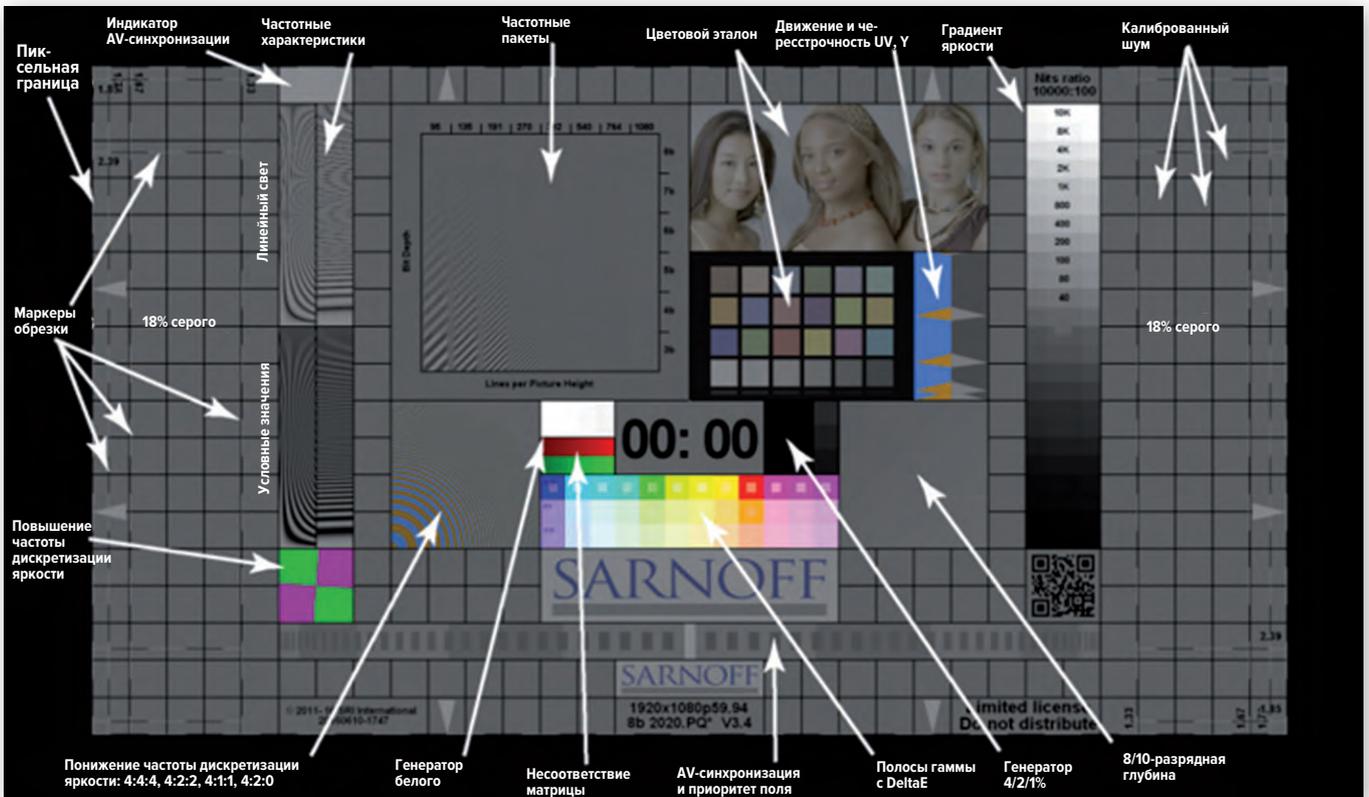


Рис. 3. Участки тестовой таблицы HDR/WCG Visualizer



Рис. 4. Синусоидальные волны в условных значениях приводят к искажению световой волны и появлению ступенчатости



Рис. 5. Предыскажение условных значений с помощью инвертированной ЭОПФ позволяет сохранить синусоидальную форму световой волны. Когда гамма корректна, ступенчатость визуально сводится к нулю

субдискретизации, становится видна ступенчатость. Она, скорее всего, вызвана интермодуляцией гармоник в синусоидальных волнах, создаваемой нелинейной функцией декодирования гаммы (рис. 4, 5).

Обращение с синусоидальными волнами как с линейными световыми синусоидальными волнами позволяет получить бесступенчатое отображение на дисплее, но частотные характеристики не являются синусоидальными волнами в системе условных координат, а спектр наполнен гармониками. Это разрывает соответствие между частотой и пространственным положением для частотной характеристики и делает ее бесполезной для оценки фильтрации в системе условных координат. Чтобы иметь частотные характеристики, которые можно применять в системе как условных, так и линейных световых координат, мы решили просто включить их обе в Visualizer. В результате, верхняя пара синусоидальных волновых характеристик представляет линейные световые значения, а нижняя пара – линейные условные значения.

Линейные световые синусоидальные волны не вызывают ступенчатости как синусоидальные волны в условных координатах, но это длится до тех пор, пока сохраняется соответствие функции гаммы. Фактически, линейные световые характеристики обеспечивают очень чувствительные средства для проверки и настройки гаммы. По мере того как регулируется гамма дисплея, ступенчатость будет проходить через ноль, показывая соответствие. Правда, это работает, только если, во-первых, дисплей ставит в соответствие все пиксели на входе пикселям на экране в отношении 1:1 и не выполняет масштабирования входного разрешения, либо, во-вторых, масштабирование выполняется в системе линейных световых координат.

Оба набора синусоидальных характеристик (и в линейных, и в условных координатах) визуализированы в диапазоне 0...75 кд/м².

Не все элементы таблицы визуализированы как линейный свет

Некоторые элементы таблицы HDR Visualizer должны быть определены частично как линейный свет, а частично как условные значения. 8-/10-разрядная вращающаяся рампа (Rotating Ramp) – хороший пример. Это малый градиент Y', который визуально вращается. Полосность, вызванная квантизацией, видна в 8-разрядной системе, но в 10-разрядной градиент выглядит плавным (и для доставки HDR от источника к конечному потребителю требуется 10-разрядный канал). Средняя яркость градиента определяется как линейный свет (18%), но наклон рампы определяется как 12 шагов в условных значениях в 8-разрядном пространстве кодирования. Соответственно, этот элемент визуализирован в условной системе координат.

Ступенчатость: Лестница Иакова

Ранняя версия Visualizer содержала классическую 10-уровневую ступенчатую таблицу с равномерным распределением ступеней по всему диапазону значений IRE. Для версий Visualizer SDR и HDR этот элемент был преобразован в логарифмическую лестницу, у которой верхняя ступень определена как вершина черно-белого диапазона (то есть 940), а ступени, располагающиеся ниже, уменьшаются по уровню в виде повторяющейся последовательности 10/8/4/2, то есть в четыре шага на десяток. Когда верхняя ступень представляет 10 тыс. кд/м², значения ступеней составляют 10000, 8000, 4000, 2000, 1000, 800, 400, 200, 100, 80, 40, 20 и т.д., давая в итоге 23 шага или шесть декад. Каждая полная ступень отображает два delta-шага, 1/3 стопа темнее слева и 1/3 ярче справа. Кроме того, 18% тонкая полоска вставлена для того, чтобы разделять две ступени, находящиеся выше и ниже 18%.

У большинства HDR-дисплеев некоторые ступени яркости будут пересвеченными и на вид идентичными. Это позволяет пользователю предположить условное значение яркости, которое различимо на дисплее. Надо отметить, что некоторые дисплеи могут адаптировать условные значения, выходящие за пределы отображаемого диапазона, в значения, которые можно отобразить, так что хотя некоторые ступени яркости могут на вид казаться различимыми, это не значит, что они отображаются с корректной яркостью. Для измерения абсолютной яркости требуется средство калибровки.

С периодичностью в 2 с каждая ступень затемняется на один стоп, что, в свою очередь, ведет к появлению темной полосы, поднимающейся снизу вверх (забор, Лестница Иакова, рис. 6). Наблюдая самую темную ступень, на которой еще видны изменения яркости, можно примерно оценить нижний предел дисплея.

Точность в четыре шага на десяток из диапазона может оказаться недостаточной для кого-то, так что комплект тестовых таблиц цветового пространства и монитора содержит полноэкранный Лестница Иакова, в которой есть 13 шагов на десяток, а сама она охватывает восемь декад.

Окончание следует

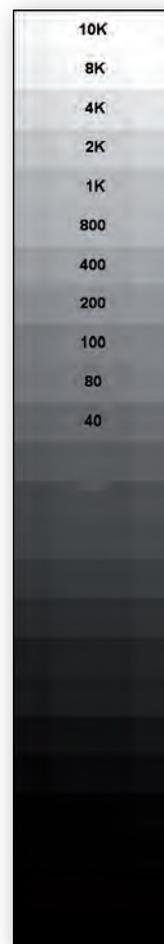


Рис. 6. Лестница Иакова

GURAMEX
Take a Step Forward

Платы OpenGear

- Аудио / Видео усилители-распределители
- Эмбеддер / деэмбеддер
- Up/Down/Cross Конвертер
- Мультивьювер

www.proland.ru