

標題: 如何將 HDR 技術運用至顯示器，使得高畫質影像傳輸不失真

撰稿者: 宜特科技訊號測試事業處 余天華 協理 (www.istgroup.com)

前言

對於影像顯示技術而言，追求貼近人眼所能見到的真實世界是必然趨勢。在 4K 電視技術的普及、廣色域的使用、以及影片播放流暢度提高到 60fps，都已逐步朝人眼所見前進。而下一關卡，「亮度動態範圍」，是目前影像顯示畫質欲突破的關卡。此時，「HDR」(高動態範圍，High Dynamic Range)就應運而生，成為近年在 CES 展，影像顯示技術最熱門的討論議題，各家影音製造廠商更以提高影像的動態範圍為目標，相繼投入高動態範圍 (High Dynamic Range: HDR) 技術，並訂定出相關標準，已能對此高規格之品質把關。

本文第一部分，將簡介 HDR 技術；第二部分，將深入目前業界最知名的 PQ-HDR (杜比視界，Dolby vision)，以及 HLG-HDR(BBC/NHK)，剖析如何將 HDR 技術運用至顯示器、使得傳輸不失真；第三部分，則將從筆者所服務的宜特訊號測試實驗室所遇到的實際案例，介紹目前顯示器主要接口 HDMI，如何納入 HDR，以及其對應認證標準。

一、HDR 技術簡介

(一)電視/電影和手機/相機講的「HDR」到底有什麼不一樣？

HDR，多數人熟知是應用在相機的拍攝上，然而相機上所使用的 HDR 技術，與電視影片的 HDR，是完全不一樣的事情。

- 手機/相機的 HDR：多數人應該都有逆光拍照的經驗，大部分逆光拍照的結果，不是陰影部分黑漆漆一片，就是明亮部分全數過飽和。因此，手機/相機的 HDR，就是利用加減曝光指數所拍攝的多張影像，再藉由晶片將這幾張影像演算成為一張完整的相片；或是，由單張相片做區域性的加減光，演算達到高動態的成像，使各區域都呈現相對清楚的影像。
- 電視/電影的 HDR：指的更像是一種標準/格式，由於影片屬於持續的動態影像，如果要求顯示器每一格都像照相機一樣由 3 到 5 張組合，傳輸的頻寬勢必會增加 3 到 5 倍，這在現實的環境是達不到的。影片所討論的 HDR 便定義在，如何把先進高動態廣色域的攝影影像重新分布，並傳輸給顯示器，讓顯示器能正確的還原先進高動態的影像，上述也是筆者在宜特實驗室協助 TFT/IPS 電視及投影機等多項產品廠商，進行 HDR 調校時多數廠商關切的議題，以下本文重點將從此切入。

二、杜比視界(Dolby vision) · 與 BBC/NHK 如何將 HDR 技術運用至顯示器 · 使得傳輸不失真

(一) 杜比視界 PQ- HDR EOTF(感知轉換 HDR 電光轉換功能)

2014 就可以看到杜比實驗室公告的杜比視界(Dolby Vision)白皮書 · 其內容是杜比實驗室投入 HDR 的成果 · 此後在 SMPTE(The Society of Motion Picture and Television Engineers) 收納為 SMPTE 2084 規範 · HDR 不僅成為動態影片錄製及播放的討論重點 · SMPTE 2084 所定義的版本也成為業界沿用 HDR 產品的第一代規範。

杜比 HDR 的核心技術叫做「感知轉換」(Perceptual Quantizer · 簡稱 PQ)的電-光轉換功能 (簡稱 EOTF · 將電信訊號轉為可見光) · 這項技術將亮度標準定義在 **10,000 Nits** (普通的電視亮度僅 100-200nits 左右) 。但是 · 目前還沒有實用顯示設備能達到這一亮度 · 因此目前 Dolby Vision 的亮度目標是 **4,000nits** 。

以目前在亮度處理的技術包括 CMOS 及 CCD Sensor · 已可感應高動態範圍亮度的影像 · 然而如何將 HDR 影像正確處理 · 儲存 · 並傳輸至顯示器 · Dolby 藉由「重新安排亮度分布曲線」 · 「增加傳輸及處理深度(bit width)達 12bit」 · 「製作環境參數(meta data)後送」方式解決此事。此方式將可避免重新分布後亮度不連續的問題 · 更能在影像傳輸至顯示器時 · 精準還原 HDR 影像。(此技術收納在 SMPTE 2084 規範中。)



圖說: 未經PQ-HDR影像處理的原始影像



圖說: 經過PQ-HDR影像處理的範例

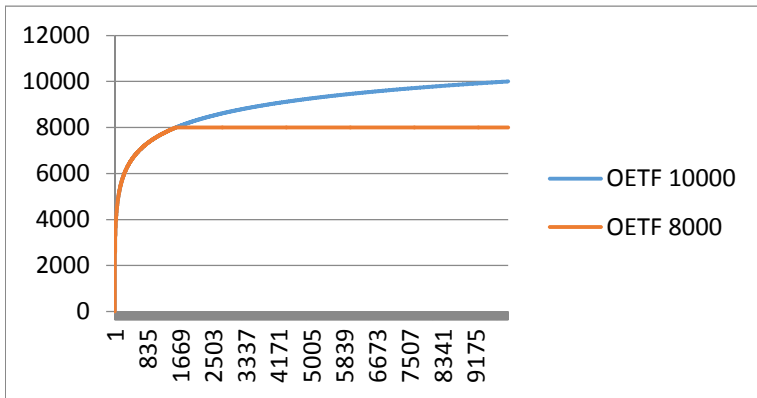
1. 細談「重新安排亮度分布曲線」 · 「增加傳輸及處理深度(bit width)達 12bit」

Dolby 的主要核心技術 EOTF 是建構在兩部分。(1) 依照 Barten Ramp · 重新安排亮度分布曲線 ; (2) 增加傳輸及處理深度 12bit 。

根據 Barten Ramp · 暗部(亮度極低時)人眼視覺靈敏度較低 · 亮度極高時 · 人眼對對比的感覺較飽和 · 而這個曲線是建構在人眼剛剛好可以分辨的亮度改變上(JND- just noticeable difference)。由影像輸出端的 OETF(EOTF 的反向)曲線 · 可以得知當暗部的分辨率低 · 所以跳階比較粗 · 亮部視覺比較靈敏 · 所以跳階比較密。而正確的亮度分配 · 正好可以把暗部多出來的階數貢獻給明亮部分 ·

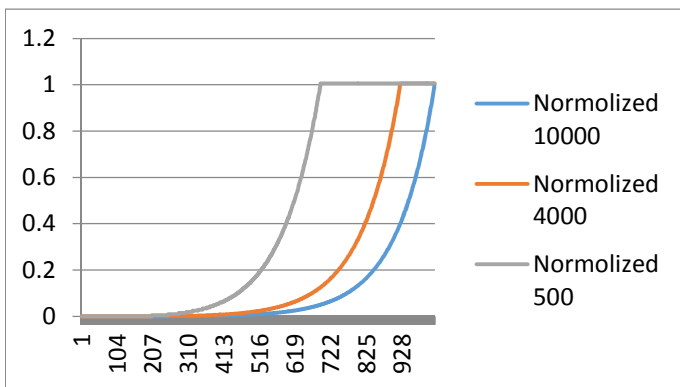
藉以達到亮度重新分布的目的。

增加傳輸及處理深度達 12bit，則可以確保此分布變化視覺將不會觀察到不連續的狀況，而總體亮度也可獲得更多階數的處理單位。



圖說:PQ-HDR 影像輸出端的 OETF(EOTF 的反向)曲線，xy 座標皆為 0~10000 亮度。

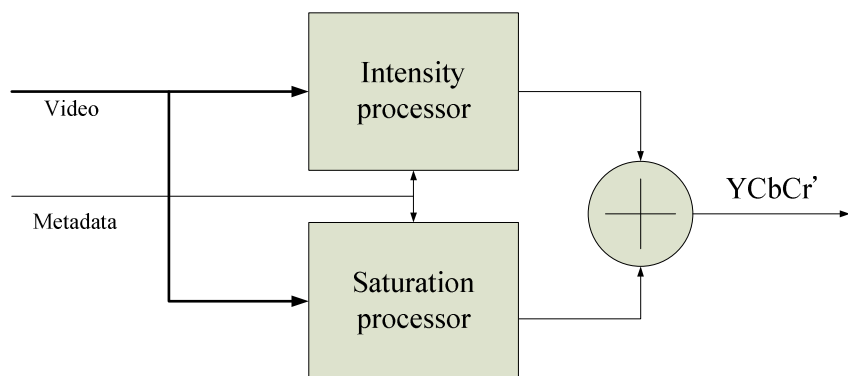
不過，任何影像修正或重新分布的技術，必須同時提供還原的模式，否則在應用上會有一定的困難。影像輸出前的技術稱為 OETF，而影像輸出後製處理過的影片技術，定義為 EOTF，兩者都是一條「非線性的曲線」。然而在處理亮度校正及色域轉換議題時，必須先將信號還原成「線性曲線」，以減少後續處理的複雜度。



圖說:PQ-HDR 影像輸出端的 EOTF 曲線，x 座標為 0~1 normalized 亮度 y 座標為 0~1024 的 10 bit code。

在影像分佈曲線成功還原後，HDR 將「亮度」及「色域」兩路分開處理，Dolby 的處理方式之一是將 YCbCr 的色域先轉為 IPT 色域，再處理亮度及色彩飽和度。而 Gamut mapping 更提出由更複雜的 3D LUT 來完成。

當然使用這種 HDR 的技術在 EOTF 線性還原之後並不一定要使用以上一模一樣的處理方式，多數的晶片都具備有其他客製化的處理方式，差別在最終畫質好壞而已。



圖說:PQ-HDR IPT 處理方式之一

2. 細談「製作環境參數(Meta data)後送」

要能使顯示器正確的還原影像，錄影及後製的**環境因素**必須傳輸給顯示器，才能得到更精確的影像還原。製作 HDR 環境參數(Meta data) 必須包含以下幾項重要資訊(CEA-8614.3 規範及 HDMI2.0a 規範皆可看到詳細資訊定義)：

- Source 的 RGBW color range
- Display Mastering Max/Min luminance
- Max content light level
- 4Max frame average light level

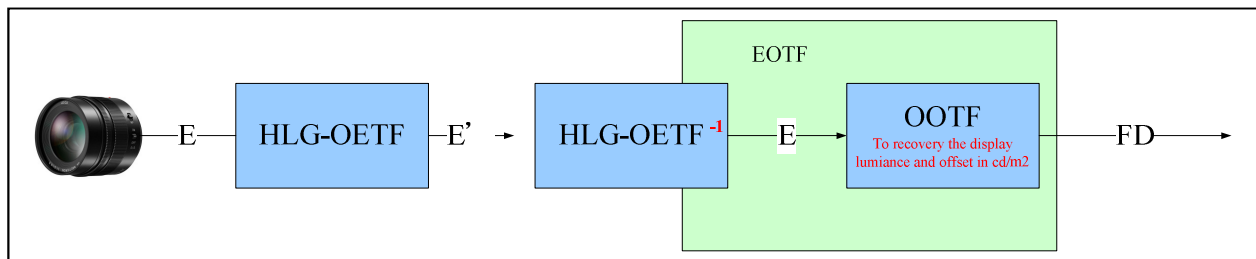
在實際運用案例上，筆者在宜特實驗室收到送來多數送來測試的 HDR 影片，大都以 DCI P3 色域及 Mastering 4000 Cd/m² 占多數，其他部分有些資料並不正確，因此顯示器在處理時可能要有一些機制判斷環境參數(Meta data) 是否為合理值。

在 HDR 訊號處理完畢之後，顯示器處理系統，必須還是要想辦法把亮度曲線校正為比較適合人眼的 Gamma 2.0~2.4，以及顏色還原到顯示器定義的色域範圍，這樣便完成了 HDR 的顯示流程。

所以正確的校正流程，應該是由訊號源產生 HDR 的亮度訊號，並產生對應的環境參數(Meta data)，顯示器收到環境參數(Meta data) 後能計算出適當的還原曲線，並校正為符合顯示器規格的亮度分布。

(二) BBC/NHK 的 HLG-HDR 對應方案

英國 BBC 及日本 NHK 電視台，也提出了對應的 HDR 方案，稱之為 Hybrid Log-Gamma (HLG)，相對於 Dolby 的 PQ-HDR，HLG 在應用上的方便性，是不需要 Meta data 的傳輸，並在大部分既有的顯示晶片上經過運算就可以執行，最後，再經過最終顯示器亮度及色域的校正，便能達到 HLG 所宣稱的效果(技術細節參考 ITU-R BT. 2100.0 規範)。此版本也成為業界沿用 HDR 產品的第二代規範。



圖說:HLG-HDR 處理方塊圖

與PQ-HDR類似的，HLG-HDR也同樣提出對應的OETF曲線，但是在HLG的作法上比較單純也相對精確，訊號源部分將亮度依照HLG OETF分布編碼。而顯示器部分則根據反向的OETF (OETF-1)，先將信號線性化再做客製化的亮度及色彩修正，最後再根據顯示螢幕的最大、最小亮度及環境亮度還原為HLG定義的亮度分布，稱之為OOTF (opto-optical transfer function)。

- OOTF 部分 HLG特別加入了環境的亮度，實驗的結果是以Log的方式呈現，關係式如下：

$$r=1+ (1/5) *Log(Y_{peak} / Y_{sround})$$

- 完整的EOTF 則包含OOTF 部分:

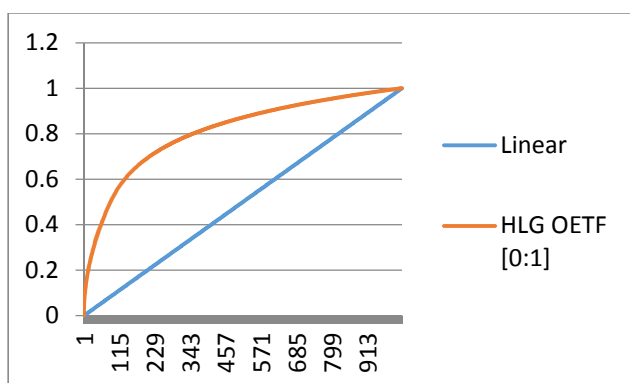
$$Y_d = \alpha Y_s^r + \beta$$

$$\alpha = L_w - L_b \text{ (for } Y \text{ range } 0 \sim 1) \cdot \beta = L_b$$

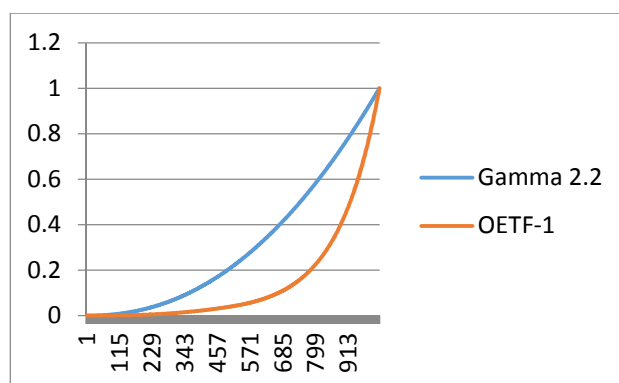
L_w : Normal peak luminance.

L_b : Display luminance for black.

目前，HLG的最大亮度只在1000 Cd/m²下討論，並不像PQ-HDR可以延伸到4000甚至10000 Cd/m²。有趣的是在ITU-R BT.2100附錄中有提到PQ-HLG相互轉換的方式，其實只要能夠還原成線性的曲線，各規範中間互轉其實都做得到的。



左圖:HLG-HDR OETF 曲線，x軸為1~1024 code，y軸為 normalized 的亮度。



右圖:HLG-HDR OETF-1 曲線，x軸為1~1024 code，y軸為 normalized 的亮度。

三、HDMI，如何納入 HDR，以及其對應認證標準

由於 HDMI 是顯示型消費性產品的主要接口，多數顯示產品會傾向先取得 HDMI HDR 的認證 (HDMI2.0a) 作為導入 HDR 產品的第一步。

HDMI 協會在 2015 年公告了 HDR 的標準後，便成為第一個導入 HDR 的有線傳輸介面，不再侷限於影像串流的應用。

HDMI 目前對於 HDR 的認證僅限於 Protocol 的部分，認證項目包括：

- HF1-53: Source Dynamic Range and Mastering InfoFrame – High Dynamic Range
- HF2-54: Sink EDID – HDR Static Metadata Data Block
- HF3-21: Repeater Repeated Output Port HDR
- HF3-22: Repeater Repeated Output Port Source Functionality HDR
- HF3-23: Repeater Repeated Input Port HDR
- HF3-24: Repeater Repeated Input Port Sink Functionality HDR

而從筆者在宜特訊號測試實驗室，協助客戶取得 HDMI2.0a 認證與 HDR 客製化演算法調教及量測的實際經驗中，發現大部分客戶的顯示器機種，除了 EDID (Extended display identification data，延伸顯示能力識別，是指螢幕解析度的資料，包括廠商名稱與序號) 編輯可能有些小問題之外，客戶都可以非常順利取得認證。

參考資料：

- CEA-861.3-2015
- SMPTE 2084 (1)
- st2086-2014
- 杜比白皮書(Dolby-vision-white-paper)
- BBC Research WHP309
- 宜特訊號測試實驗室