

文章编号:1007-2780(2019)01-0014-10

一种基于 LCD-LED 双调制显示器的 HDR 图像显示方法

王 晓, 苏寒松, 李昌禄*

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:提出一种针对 HDR 图像的显示方法,该方法应用于 LCD-LED 双调制高动态显示器,旨在使显示器更好地显示 HDR 图像要求的亮度细节,提高视觉质量。首先,建立 HDR 图像亮度与 LED 亮度范围对应关系,使用光扩散函数作为背光 LED 亮度取值范围的权重。然后,统计 LED 的亮度辐射区域内不同 LED 发光强度等级的权重,取权重最大者对应的亮度作为该背光 LED 亮度。最后,利用依据 LED 亮度生成 LED 背光扩散图像与 HDR 图像计算出 LCD 显示图像。仿真结果表明,该算法可以使显示器亮度失真率系数低至 0.006 以下。在 LCD-LED 双调制高动态显示器上实验验证结果表明,该算法可以有效提高图像的层次感,有效抑制 LCD-LED 双调制高动态显示器的“光晕”以及亮度截断现象,提高显示质量。

关 键 词:高动态范围;区域背光;双调制结构;HDR 图像

中图分类号:TN27; TN873 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193401.0014

HDR image display algorithm based on LCD-LED dual modulation HDR display

WANG Xiao, SU Han-song, LI Chang-lu*

(School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University,
Tianjin 300072, China)

Abstract: A display algorithm for HDR images on LCD-LED dual modulation high dynamic display was proposed, which aimed to better display the brightness details required by HDR images and improve the visual quality. Firstly, the relationship between the HDR image brightness and the LED brightness range was established. The light diffusion function was used as the weight of the backlight LED brightness value range. Then, the weight of the different LED illumination intensity levels in the luminance radiation area of the LED was counted. The brightness corresponding to the largest weight was taken as the brightness of the backlight LED. Finally, the LCD display image was calculated by generating the LED backlight diffusion image and the HDR image according to the LED. The simulation results show that the algorithm can display the brightness distortion index as low as 0.006 or less. The algorithm is experimentally verified on the LCD-LED dual modulation high dynamic display,

收稿日期:2018-08-30; **修订日期:**2018-10-24.

基金项目:天津市科技支撑重点项目(No. 16YFZCGX00760)

Supported by Key Technologies R & D Program of Tianjin(No. 16YFZCGX00760)

* 通信联系人, E-mail: changlu@tju.edu.cn

which effectively improves the layered feel of the image. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively suppress the “halo” and “clipping” effects of LCD-LED dual modulation high dynamic display, and improve display quality.

Key words: high dynamic range; local dimming; dual modulation structure; HDR image

1 引 言

高动态范围(High Dynamic Range, HDR)图像对比标准态范围(Standard Dynamic Range, SDR)图像,可以提供更多的动态范围和图像细节。HDR图像的存储格式不同于SDR图像,OpenExr格式^[1]是HDR图像主流存储格式,像素点的RGB通道各自为16位浮点数,数值与真实世界的亮度是线性对应,HDR格式图像无法直接在8 bit显示器上显示。目前有两种HDR图像的显示方式。一是采用色调映射算法^[2]将HDR图像的动态范围进行适当的压缩,使之能够在低动态范围的液晶显示设备上显示,但是色调映射压缩后的HDR图像会丢失大量的细节信息,无法真实地再现HDR图像信息。二是直接用支持HDR图像显示的HDR显示设备^[3]进行显示。

目前显示设备一般采用液晶(Liquid Crystal, LC)或有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)面板。由于量子点技术的出现,LCD显示器相比OLED,在大尺寸高动态显示器研发中更有优势^[4-5]。HDR显示设备通常实现的结构是LCD-LED双调制结构该结构的HDR显示设备的动态范围为液晶面板和背光模块的乘积^[6],但其LED背光模块的分辨率比LCD分辨率的小,若图像的亮度变化频率超出了LED背光模块地分辨率,LCD透射率调节像素的亮度能力会受到LED背光亮度的限制,即在图像高亮区域附近会出现“光晕”现象;在图像暗区附近会出现因背光亮度过低出现图像亮度“截断”现象。

使用LCD-LED双调制结构的显示器显示HDR图像需要使用区域动态调光算法,近年来,研究人员已经提出了多种区域动态调光方法^[6-12],例如平均值法、最大值法、反映射函数法、查表法和IMF法等,然而这些算法处理的图像是可以直接在LCD屏幕上显示的SDR图像,目的

是降低功耗和提升图像显示对比度,并没有考虑HDR图像的显示问题。8 bit的LCD面板上显示无法直接显示HDR图像,如何配合LED背光模组将其转化为LCD可显示的SDR图像,这些算法^[6-12]没有进行讨论。若将上述算法应用于HDR图像处理,需要对算法进行改进。

目前为止,针对HDR图像的区域调光算法并不多^[13],显示HDR图像需要依据HDR图像内容自主生成LCD图像和LED背光亮度。Seetzen等^[3]首次提出LCD-LED双调制结构实现高动态显示器的方案,并首次给出了HDR图像显示算法:首先,HDR图像经HSV变换获得图像的亮度分量,亮度分量开平方并下采样得到背光区域目标亮度;然后,使用高斯-赛德尔迭代方法解方程估计出LED实际亮度值;接下来,用高斯函数模拟LED的光扩散函数(Point Spread Function, PSF)与LED亮度值卷积并放大到LCD的分辨率得到背光亮度图;最后用HDR图像亮度除以背光亮度图,得到LCD面板的显示图像。Narwaria等人^[13]沿用上述算法的思路,对算法进行了优化:选择RGB最大值作为图像的亮度分量;LED背光亮度图由将LED背光亮度图改为由HDR图像亮度的 α 次幂得到,其中 α 的数值为0~1;使用背光LED的调制光亮度与LED光扩散函数(PSF)模拟LED背光亮度,使用迭代的方式逐步调整LED的调制光亮度,降低LED目标亮度于LED背光亮度的差。

然而上述算法在确定LED亮度步骤中,直接对图像下采样得到LED的目标亮度,没有考虑显示器背光模块的参数。显示器背光模组无法准确地显示LED目标亮度图,容易造成由于LED亮度与LCD透射率不匹配而形成的“光晕”和亮度“截断”效应。针对此问题,本文提出了一种基于HDR图像在LCD-LED双调制HDR显示器上的显示方法,旨在使显示器达到HDR图像要求的亮度。处理图像之前,先根据显示器的背光参数,确定HDR亮度与LED取值范围的关系,然后计算LED亮度。此方法得到的LED亮度值和

LCD 图像,可以有效降低“光晕”和亮度截断效应,更真实地还原 HDR 图像。

2 本文算法

本文提出的算法整体流程如图 1 所示。首先建立 HDR 图像亮度与 LED 亮度范围对应关系,使用光扩散函数作为背光 LED 亮度取值范围的权重。然后,累加 LED 的亮度辐射区域内不同 LED 发光强度等级的权重,取权重最大者作为该背光 LED 亮度。最后,利用依据 LED 亮度生成

的 LED 背光扩散图像与 HDR 图像计算出 LCD 显示图像。

2.1 确定 LED 亮度范围

使用 LCD-LED 双调制结构显示 HDR 图像,需要对 HDR 图像进行预处理:从 RGB 空间转换至 HSV 空间,分离 HDR 图像的亮度和色度信息,避免图像亮度分解对色度信息的影响。接下来,将图像的亮度 V 线性量化到 $0 \sim 65535$ 的范围内,匹配 HDR 图像亮度最大值与显示器显示亮度的最大值,最大化利用显示器动态范围,同时避免原图数据出现上溢和下溢失真现象。

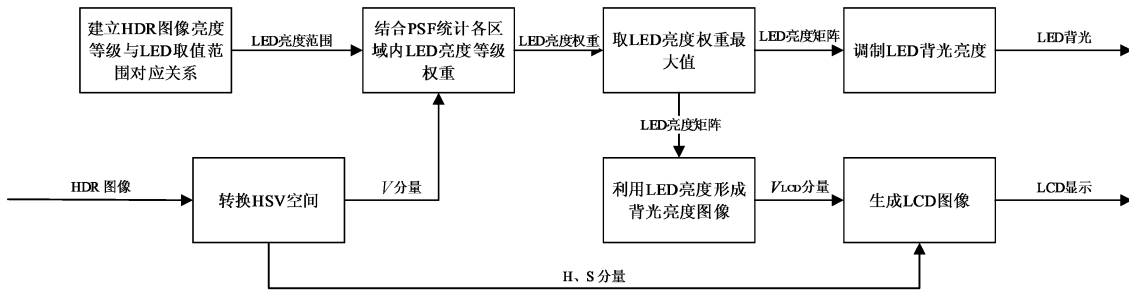


图 1 本文提出的算法流程图

Fig.1 Flow chart of proposed algorithm

LCD-LED 双调制结构的显示器的显示亮度等于 LED 背光亮度与 LCD 透射率的乘积,同一亮度值可以有多种 LED 亮度与 LCD 透射率的组合方式,如图 2 所示。

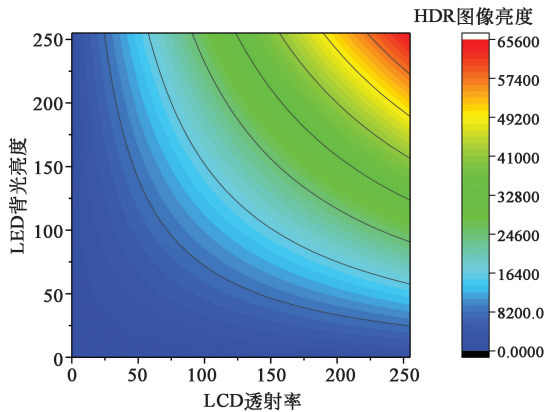


图 2 亮度的分解方式梯度图

Fig.2 Gradient map of luminance resolution

其中横坐标和纵坐标分别表示 LCD 透射率和 LED 的亮度,图中的曲线对应 HDR 图像的亮度值。从图中可以看出,随着 HDR 图像亮度的增大,LED 亮度与 LCD 透射率的调整范围逐渐

减小。同时,因为 LCD 决定图像的亮度细节和颜色,显示 HDR 图像的亮度时,应尽量增加 LCD 透射率,降低 LED 的亮度。若 LCD 透射率过低,颜色的饱和度也会相应下降,同时 LCD“漏光”现象凸显,降低显示效果。所以当图像亮度较低时,应限制 LED 亮度的最大值。基于上述约束关系,确定 HDR 图像亮度与 LED 亮度取值范围的关系,如图 3 所示。

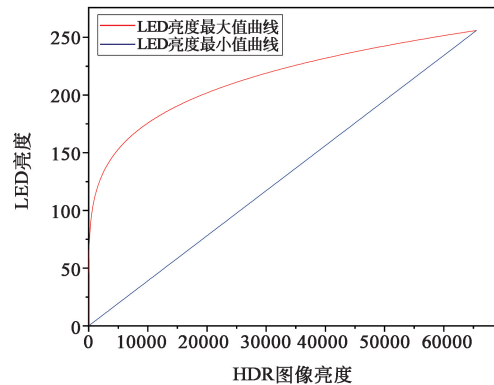


图 3 HDR 图像亮度对应 LED 亮度调制范围

Fig.3 HDR image brightness corresponding to LED brightness modulation range

图 3 中,纵坐标为 LED 的亮度值等级 0~255,横坐标为 HDR 图像像素的亮度等级 0~65 535,每个 HDR 图像像素的亮度等级都对应一组背光 LED 亮度的最大值和最小值。红线是随图像亮度变化的 LED 最大值曲线,蓝线为 LED 最小值曲线。LED 最小值是满足 HDR 图像亮度要求 LED 的最小亮度值,即 LCD 透射率达到最大值(RGB 最大值为 255)时的 LED 亮度等级,由公式(1)确定:

$$L_{\min} = \frac{X}{255}, \quad (1)$$

其中: $L_{\min}$ 为 LED 亮度范围的最小值; X 表示原图的亮度,取值范围为 0~65 535。LED 亮度的最大值由公式(2)确定:

$$L_{\max} = \left(\frac{X}{65536} \right)^{\gamma} \times 255, \quad (2)$$

其中: $L_{\max}$ 为 LED 亮度范围的最大值; X 表示原图的亮度,取值范围为 0~65 535; γ 为 LCD 显示器的特征参数,取值范围为 0~1。特征参数 γ 由 LCD 面板的滤光特性决定。若 LCD 面板的漏光现象明显,则 γ 值越趋近 1,对应 LED 的调整范围越窄。若显示器“漏光”现象凸显可适当调高 γ 值。经多次实验验证, γ 取 0.2 时显示效果最好。

2.2 确定背光 LED 亮度

背光 LED 的亮度由该 LED 辐射区域的图像内容确定。遍历区域内像素,找到可以满足对应 LED 辐射范围内图像的最多像素达到 HDR 图像亮度要求的 LED 亮度,作为该区域背光 LED 的调制亮度。LED 亮度的计算方法步骤如下:遍历 LED 亮度辐射区域 M 的像素点,找到该像素对应 LED 的最大值和最小值,并依据该像素到 LED 的距离算出对 LED 亮度等级影响权重。最后累加区域内像素的 LED 亮度影响权重,找到累加和的最大值,最大值对应的亮度为 LED 的调制亮度。

2.2.1 计算像素的 LED 亮度权重

LED 计算区域 M 要由 LED 亮度辐射区域确定,但背光 LED 的光源辐射区域与 LED 背光的排列分布不能做到完全一致。不能仅依据 LED 空间位置直接切割图像,这样做不同 LED 的计算区域 M 会出现重叠,为此将光扩散函数(PSF)作为 LED 亮度范围的权重抵消因区域重叠导致像素重复计算的影响。

使用一个长度为 256 的数组 A_{pixel} 表示像素的 LED 亮度的影响权重,其下标 0~255 对应 LED 的亮度等级。该数组表示该像素点对于 LED 不同亮度的权重。数组 A_{pixel} 的值由公式(3)确定:

$$A_{\text{pixel}} = \begin{cases} 0, & [0, L_{\min}(L)), \\ \alpha, & [L_{\min}(L), L_{\max}(L)], \\ 0, & (L_{\max}(L), 255] \end{cases}, \quad (3)$$

其中: L 为该像素的亮度值; $L_{\min}$ 和 $L_{\max}$ 表示亮度为 L 时,LED 亮度范围的最小值和最大值,由公式(1)和(2)确定;数组下标位于最大值和最小值之间的数值为 α ,其余数值为 0。 α 是关于该像素到 LED 计算区域 M 中心距离的函数,表示影响 LED 取值范围的权重值,见公式(4):

$$\alpha = \exp[-D^2(i, j)/\sigma^2], \quad (4)$$

其中: $D(i, j)$ 为该像素距 LED 计算区域 M 中心的欧式距离; σ 为模拟光扩散系数。 α 代表该像素对 LED 取值范围的影响权重。因为像素距其对应 LED 的 $D(i, j)$ 的增加必然会有附近 LED 的 $D(i, j)$ 减小,该像素对 LED 亮度的影响权重 α 下降的同时,会提高对附近 LED 亮度的影响权重 α 。总体上看,像素的影响权重 α 与光扩散函数(PSF)和 LED 空间分布有关,该像素的影响权重并没有减弱。在算法实现过程中, α 的大小与图像内容无关,仅依赖 LED 光扩散函数(PSF)。在程序实现时,可以利用查表的方式加速计算速度。若背光 LED 之间光串扰影响不大, α 直接为 1 可简化计算,对处理的结果影响不大。

2.2.2 计算 LED 调制亮度

建立一个数组 A_{Led} 作为投票箱,数组 A_{Led} 初值为 0,长度为 256,其下标与 LED 亮度等级 0~255 对应,用来记录不同亮度等级可以正确显示像素亮度的能力。将 LED 亮度辐射区域 M 中的像素的 LED 亮度权重 A_{pixel} 加到 A_{Led} 中,如公式(5):

$$A_{\text{Led}} = \sum_{(i, j) \in M} A_{\text{pixel}}(L(i, j)), \quad (5)$$

其中: $L(i, j)$ 为区域 M 内像素的亮度; A_{Led} 记录区域 M 内像素对不同 LED 等级的影响权重的累加和, A_{Led} 的最大值代表该 LED 亮度等级的权重最大,表明在此区域 M 内使用该亮度等级显示 HDR 图像的效果最好。如果数组中有多个值同时达到最大,取这些值的平均值为 LED 的目标背

光值。这样可兼顾各像素点的亮度,使得整个区域像素点的 LCD 的亮度调整能力达到最大,见公式(6)。

$$BL = \text{find}(A_{\text{Led}} = \text{Max}(A_{\text{Led}}, 1, 'mean')). \quad (6)$$

2.3 LCD 面板显示图像计算方法

得到 LED 亮度矩阵后驱动 LED 背光模组,在 LCD 面板后背光扩散图像。生成 LCD 液晶面板图像可分为两步:利用 LED 亮度生成背光亮度图像;生成 LCD 液晶面板图像。

2.3.1 生成背光亮度图像

为了生成 LCD 液晶面板图像,需要将 LED 背光亮度图和 LC 面板显示图像的分辨率调整一致。目前的主流方法是依据 LED 背光模组的光学特性建立背光 LED 光扩散函数(Point spread function, PSF),利用光扩散函数将 LED 亮度阵列延展为与 LC 面板分辨率一致的背光亮度图。对于不同的显示器,需要根据显示器的背光光学特性进行建模,得到 LC 面板各个像素对应的背光亮度。能否正确生成 LED 亮度对 LCD 面板各个像素对应的背光亮度,直接影响着图像最终的显示效果。

使用 LED 亮度矩阵与光扩散函数(PSF)卷积是产生与 LCD 分辨率一致的 LED 背光扩散图像的普遍方式,但随着背光 LED 数量增多和 LCD 分辨率提高,算法复杂度明显上升。Liao 等^[15]提出了一种应用于分区背光的模糊-扩散法,旨在降低算法复杂度。该方法的基本原理是使用一个低通滤波器模板对背光数据进行模糊处理,然后对其插值扩大,如此重复对此获取与图像数据大小一致的光强分布矩阵,以此对液晶像素进行调整。本文参考该算法的实现方式,针对自主开发的 LCD-LED 双调制高动态显示器^[16],对算法的参数和步骤进行调整。实验使用的显示器的 LCD 分辨率为 1920×3840 ,背光单元共 36×66 个。平均每个 LED 对应约 60×60 个像素点,用柯尼卡-美能达亮度计 CS-150 测出单个 LED 的亮度对周边 LED 对应区域的亮度。进行归一化调整后,得到实际测量 7×7 的光扩散矩阵 C 。将 36×66 的 LED 亮度矩阵 L 最邻近放大两倍后与光扩散矩阵 C 卷积,重复这个步骤 5 次得到 1152×2112 分辨率亮度图。最后,使用双边线性插值方式将 LED 背光阵列 L 放大到 LCD 面

板分辨率相同的尺寸 4K 分辨率。算法流程如图 4 所示。

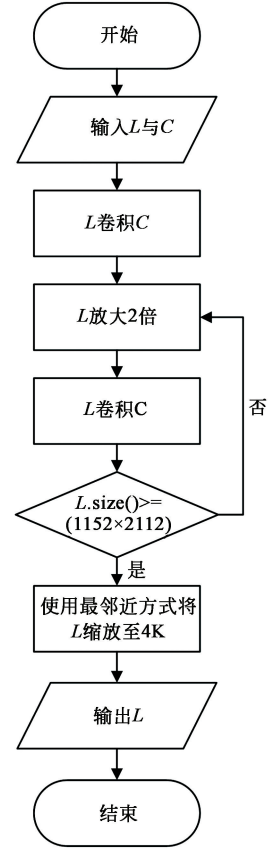


图 4 光扩散函数建模流程图

Fig. 4 LED brightness range corresponding to pixel brightness

2.3.2 生成 LCD 液晶面板图像

由于 LED 亮度图分辨率低,背光的亮度图像无法还原空间上细微的亮度差异。与此同时,颜色信息需要 LCD 进行调制,若 LCD 透射率过低,颜色的差异没有办法表达出来。使用 HDR 图像除以 LED 亮度图得到的 LCD 亮度图在亮暗变化强烈的地方会存在亮度失真现象。本文将 HDR 图像 V 分量的开方作为补偿项,使用 HDR 图像对 LCD 图像进行了补偿矫正,见公式(7):

$$V_{\text{LCD}}(i, j) = k \times \frac{V_{\text{HDR}}(i, j)}{V_{\text{LED}}(i, j)} + (1 - k) \times \sqrt{V_{\text{HDR}}(i, j)}, \quad (7)$$

其中: V_{HDR} 是原 HDR 图像 HSV 空间中的亮度 V 分量, V_{LCD} 为 LCD 显示图像的 HSV 空间中的亮度 V 分量, V_{LED} 为 LED 背光单元模拟扩散的背光亮度分量, k 是比例系数,二者之和为 1,针对本实验

环境, k 为 0.8 时显示效果最好。最后,将 LCD 显示图像的亮度 V_{LCD} 与 HSV 空间的色度信息重新组成彩色图像,还原成 LCD 显示的 RGB 图像。

3 算法评价及分析

为了评估本文算法性能,我们对该算法进行了软件仿真以及硬件测试。为了进一步说明该算法用于双调制 LCD-LED 显示器所达到的效果,本文选择了 6 幅 exr 格式的 HDR 图像作为测试图像。

图 5 和图 6 分别给出了本文提出的算法生成的背光 LED 亮度图像和 LCD 显示图像。测试图像包含室内强弱光对比明显的颜色板图像,图 5(a);前景与远景亮度差异明显的日出图像,图 5(b)(c)(d);暗场景的森林图像,图 5(e);强光下的建筑图像,图 5(f)。

目前为止,处理显示 HDR 图像的显示器并不多,为了评估本文算法的性能,使用 Seetzen 等^[3]的算法(Matlab HDR Toolbox^[13]中的 HDR Monitor Driver 程序实现)、Narwarria 等^[14]的改进算法作为对照算法,与本文提出的算法进行比较。



图 5 6 幅测试图像的 LCD 显示图像。(a)测试图 1;(b)瑞士日落;(c)马蹄湖;(d)白塔 1;(e)花园;(f)克诺斯 4。
Fig.5 LCD display image of 6 test images.(a)Test chart1; (b)Swiss sunset; (c) Horseshoe lake; (d) Stone tower 1; (e)Gardn; (f)Knossos 4.

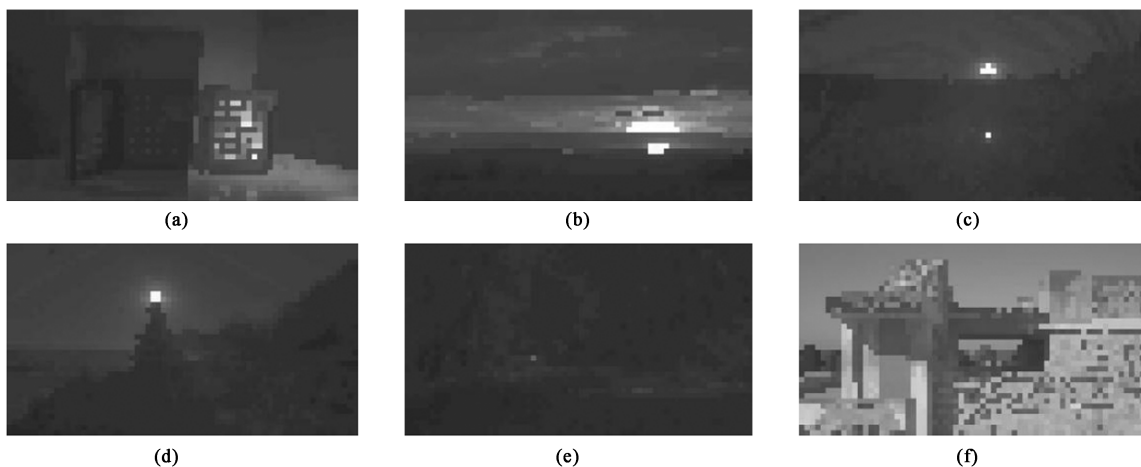


图 6 6 组测试图像的 LED 背光亮度(a)测试图 1;(b)瑞士日落;(c)马蹄湖;(d)白塔 1;(e)花园;(f)克诺斯 4。
Fig.6 LCD display image of 6 test images.(a)Test chart1; (b)Swiss sunset; (c) Horseshoe lake; (d) Stone tower 1; (e)Gardn; (f)Knossos 4.

3.1 亮度失真评价

首先,将原 HDR 图像转换为 HSV 空间,然后将原图的亮度 V ,LCD 面板的透射率 T_{LCD} 和 LED 的亮度 V_{LED} 归一化,计算出显示器亮度失真系数,即显示亮度与原图亮度的平均离差平方和,如公式(8)所示。

$$D_V = \frac{1}{M \times N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (V(i, j) - T_{\text{LCD}}(i, j) \times V_{\text{LED}}(i, j))^2, \quad (8)$$

其中: M 、 N 分别为图像行数和列数, $V(i, j)$ 表示在 (i, j) 位置上 HDR 图像的亮度, $T_{\text{LCD}}(i, j)$ 为表示在 (i, j) 位置上 LCD 显示图像的透射率, $V_{\text{LED}}(i, j)$ 表示在 (i, j) 位置上背光的亮度。这里 D_V 表示 LC-LED 双调制显示器的显示图像和原 HDR 图像的亮度的接近程度,数值越低说明 LC-LED 双调制显示器对 HDR 图像的还原度越高。

如表 1 所示,在还原 HDR 图像亮度方面,该算法可以显示器亮度失真系数低至 0.006 以下。与文献[3]算法相比有明显提升,文献[3]算法在 RGB 空间进行 HDR 图像处理,HDR 原图除以经高斯滤波的 LED 亮度层后,很容易出现 RGB 取值溢出现象。溢出后的值将转化为亮度一致的白色像素。文献[14]算法与本文提出的算法均在 HSV 空间下处理图像。文献[14]算法沿用文献[3]算法的思路,采用 HDR 亮度分层的方式确定 LED 背光模组的目标亮度图,然后用 LED 亮度与逐步逼近 LED 目标亮度图。本文采用的方式对于每个 LED 亮度独立确定其亮度,局部表现力更强。亮度失真指数除图像(a)以外,略高于文献[14]算法。

表 1 HDR 显示器亮度失真指数

Tab.1 Brightness distortion index of the HDR Display

测试 图像	本文提出 的方法	文献[3] 算法	文献[14] 算法
(a)	0.002 52	0.013 68	0.002 49
(b)	0.001 95	0.023 23	0.007 93
(c)	0.001 03	0.010 72	0.002 08
(d)	0.000 80	0.008 68	0.001 24
(e)	0.000 11	0.002 53	0.000 41
(f)	0.005 75	0.064 53	0.015 51

表 2 HDR 显示器色彩失真指数

Tab.2 Color distortion index of the HDR display

测试 图像	本文提出 的方法	文献[3] 算法	文献[14] 算法
(a)	0.056 72	0.051 69	0.068 75
(b)	0.052 36	0.051 45	0.055 44
(c)	0.042 94	0.042 90	0.044 31
(d)	0.047 42	0.047 30	0.049 01
(e)	0.062 92	0.062 83	0.064 74
(f)	0.066 44	0.059 32	0.059 54

3.2 颜色失真评价

首先将原图和 LC 面板显示图像转换为 HSV 空间,然后计算 LC 面板显示图与原图的色调 H 和饱和度 S 的平均离差平方和,并将二者相加。如公式(9)所示。其中, M 、 N 分别为图像行数和列数, $H(i, j)$ 和 $S(i, j)$ 分别表示在 (i, j) 位置上 HDR 图像的色调和饱和度, $H_{\text{LCD}}(i, j)$ 和 $S_{\text{LCD}}(i, j)$ 表示在 (i, j) 位置上 LCD 显示图像的色调和饱和度。这里 D_C 表示 LCD-LED 双调制显示器的显示图像和原 HDR 图像的色度的接近程度,数值越低说明 LCD-LED 双调制显示器对 HDR 图像的色度还原度越高。

$$D_C = \frac{1}{M \times N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (H(i, j) - H_{\text{LCD}}(i, j))^2 + (S(i, j) - S_{\text{LCD}}(i, j))^2. \quad (9)$$

从表 2 可以看出,在还原 HDR 图像色度方面本文提出的方法与参照方法相比,3 种算法的色彩失真指数都在同一数量级内,文献[14]算法的颜色失真指数最高,本文为提出的算法次之,文献[3]算法最低。分析原因,LCD 显示图像的亮度越高,其颜色的表现力越强。文献[3]算法处理后的 LCD 显示图像亮度最高,文献[14]算法在 HSV 空间下处理 HDR 图像,有效降低了高亮度图像区域的亮度溢出现象,但降低了 LCD 显示图像的整体亮度。本文兼顾了亮度溢出失真和颜色表现效果,这点在色彩失真指数有所体现。

3.3 样机测试

本文算法测试和验证实验都是在自主研发的双调制 LCD-LED 显示器^[15]上进行的。该显示器是在长虹 U501 显示器基础上改造完成的高动

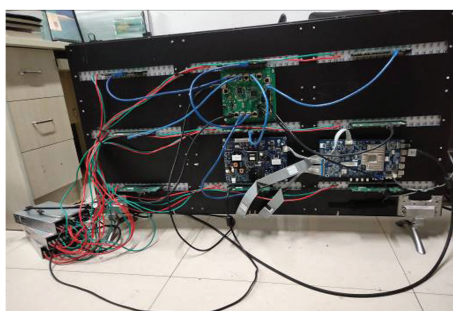


图 7 HDR 显示器背光模组

Fig.7 Backlight module of the HDR display

态显示器,重新设计了背光模组,如图 7 所示。

其背光模组采用的是白光 LED 分区背光,共划分为 36×66 个分区,LED 驱动器的调光分辨率为 8 bit,具体参数如表 3 所示。

图 8 为使用双调制 LCD-LED 高动态显示器显示 6 幅 HDR 图像使用参考算法[14]与本文提出的算法显示效果对比图。

亮度失真指数与色彩失真指数可以反映出图像整体与 HDR 图像的差异,但是具体的现实效果,人眼的主观评价更为准确。对于高动态显示器,拍摄的图像不能直观反映显示器的实际亮度,

表 3 LCD-LED 双调制显示器参数

Tab.3 Parameters of the LCD-LED dual modulation HDR display

参数名称	数据
背光模组	36×66 LEDs
分辨率	$1\,920 \times 3\,840$
液晶材质	MVA
最大亮度	$1\,200 \text{ cd/m}^2$
最小亮度	$< 0.02 \text{ cd/m}^2$

但可以看出同一幅图像不同区域的亮度和颜色差异。从显示效果来看,本文提出的算法图像的层次感更丰富,对于细节的表现力更强。从图 8 可以看出,应用本文提出的算法,对于图像亮度的细节信息保留的更好,图像层次感更丰富。采用文献[3]算法所显示的图像则整体偏亮,由于亮度过高导致图像高亮部分的饱和度下降。采用文献[14]算法将图像转换到 HSV 空间后使用幂律分离 LCD 亮度层和 LED 背光亮度层的方式,提高了颜色饱和度,但降低了 LCD 图像亮度的层次感。

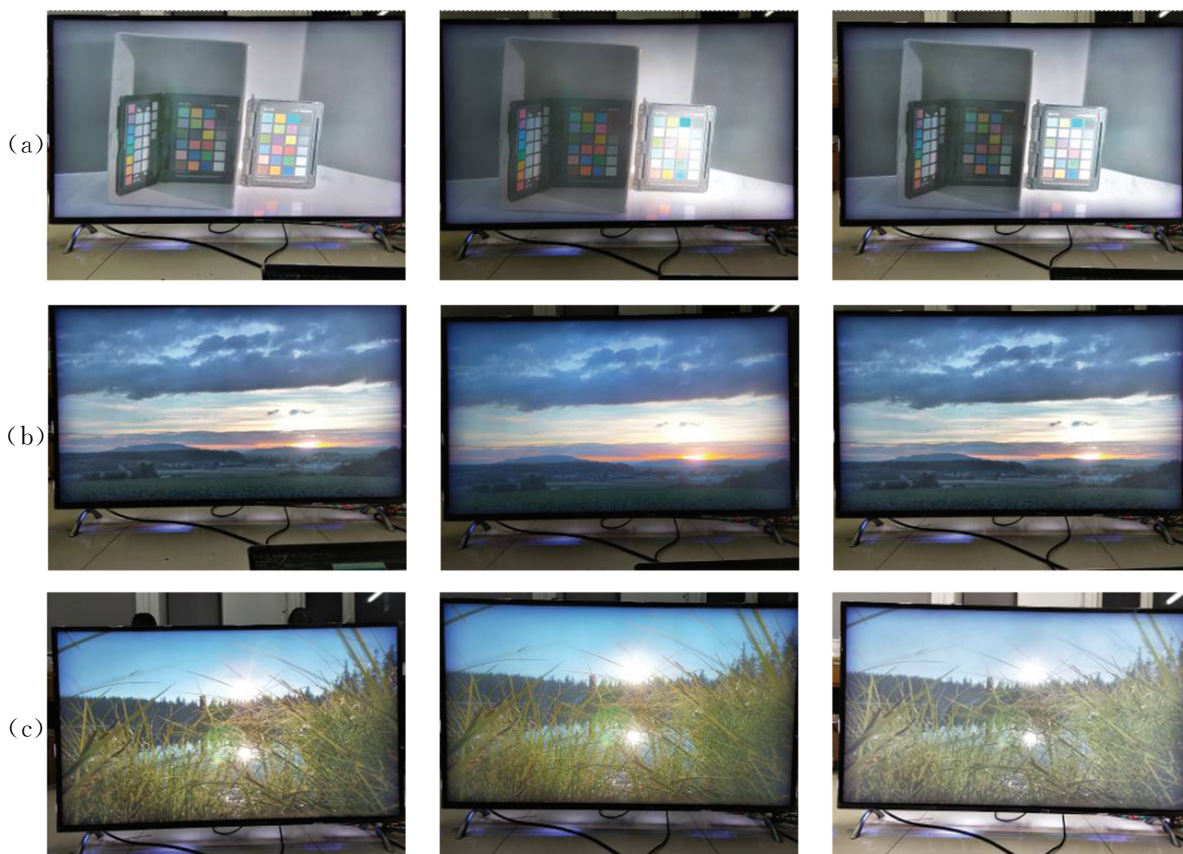




图 8 6 副 HDR 显示器显示的测试图像.本文提出的算法(左),Seetzen 等^[3]的算法(中),Narwaria 等^[14]的算法(右)。
Fig.8 Six test images displayed on the HDR display. The algorithm by this paper (left), the algorithm by Seetzen *et al*^[3] (middle), the algorithm by Narwaria *et al*^[14] (right).

4 结 论

本文针对 LCD-LED 双调制显示器,提出了一种 HDR 图像显示算法。算法首先利用 LED 对应区域各像素点亮度 LED 的取值范围,确定背光 LED 的亮度,然后依据 LED 亮度和背光扩散函数得到 LCD 显示图像,最终在 LCD-LED 双调制显示器上真实地显示 HDR。并对 6 幅 HDR

图像进行仿真实验和样机测试,结果表明,该算法可以使显示器亮度失真指数低至 0.006 以下。该算法能有效地抑制“光晕”现象和亮度“截断”现象,提高图像的显示效果。该算法在 LCD-LED 双调制高动态显示器上实验验证,能有效提高图像的层次感。该算法的 LED 亮度的确定方式简单,可以在同类型 HDR 显示器显示 HDR 可以进行推广。该算法可以采用分布式处理方式,便于硬件实现和算法优化。

参 考 文 献:

- [1] KAINZ F, BOGARD R. Technical introduction to OpenEXR [R]. USA: Industrial Light & Magic, 2009.
- [2] SALIH Y, MD-ESA W B, MALIK A S, *et al*. Tone mapping of HDR images: A review [C]// *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. Malaysia, IEEE, 2012: 368-373.
- [3] SEETZEN H, HEIDRICH W, STUERZLINGER W, *et al*. High dynamic range display systems [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 760-768.
- [4] CHEN H W, HE J, WU S T. Recent advances on quantum-dot-enhanced liquid crystal displays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(5): 1900611.
- [5] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 666-680.

- JI H L, ZHOU Q C, PAN J, *et al.* Advances and prospects in quantum dots based backlights[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5):666-680. (in Chinese)
- [6] ZHANG X B, WANG R, DONG D, *et al.* Dynamic backlight adaptation based on the details of image for liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(2):108-111.
- [7] LIN F C, HUANG Y P, LIAO L Y, *et al.* Dynamic backlight gamma on high dynamic range LCD TVs [J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(2):139-146.
- [8] OH W S, CHO D, CHVK M, *et al.* A novel two-dimensional adaptive dimming technique of X-Y channel drivers for led backlight system in LCD TVs [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(1):20-26.
- [9] NADERNEJAD E, BURINI N, KORHONEN J, *et al.* Adaptive local backlight dimming algorithm based on local histogram and image characteristics [J]. *SPIE*, 2013, 8652(3):221-237.
- [10] 张喜条.液晶电视 LED 背光直下区域调光算法研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.
ZHANG X T. Local dimming algorithm for direct-lit type LED backlight in LCD TVs[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 刘艳中, 郑学仁, 陈建宾. 基于图像 CDF 阈值的 LCD-TV 动态背光主亮度提取算法及其硬件实现[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3):449-454.
LIU Y Z, ZHENG X R, CHEN J B. Dynamic backlight signal extraction algorithm based on threshold of image CDF for LCD-TV and its hardware implementation[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2010, 25(3):449-454. (in Chinese)
- [12] CHO H, KWON O K. A backlight dimming algorithm for low power and high image quality LCD applications [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(2):839-844.
- [13] BANTERLE ARTUSZ A, DEBATTISTA K, *et al.* *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*[M]. USA: A. K. Peters Ltd., 2011.
- [14] NARWARIA M, DA SILVA M P, LE CALLET P. Dual modulation for LED-backlit HDR displays[M]//DUF-AUX F, LE CALLET P, MANTIUK P K, *et al.* *High Dynamic Range Video: From Acquisition to Display and Applications*. Amsterdam: Academic Press, 2016.
- [15] LIAO L Y, HUANG Y P. Blur-mask approach for real-time calculation of light spreading function (LSF) on spatial modulated high dynamic range LCDs [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(4):121-127.
- [16] 苏寒松, 廖泽龙, 雷志春. 宽色域的高动态范围显示系统设计 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2018, 51(6):651-657.
SU H S, LIAO Z L, LEI Z C. Design of high dynamic range display system with wide color gamut [J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2018, 51(6):651-657.

作者简介:



王 骁(1990—),男,天津人,硕士研究生,2013 年于天津工业大学获得学士学位,主要从事高动态图像视频显示方面的研究。E-mail: wangxiao9009@tju.edu.cn



李昌禄(1979—),男,天津人,硕士,工程师,2009 年于天津大学获得硕士学位,主要从事液晶显示、电子工艺等的研究。E-mail: changlu@tju.edu.cn