

# 激光与光电子学进展

## 基于区域调光的高动态范围激光显示

吴超<sup>1,2\*</sup>, 邱国平<sup>1\*\*</sup>, 余新<sup>2</sup>, 胡飞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060;

<sup>2</sup>深圳光峰科技股份有限公司, 广东 深圳 518052

**摘要** 高动态范围(HDR)激光显示一方面可以显示接近人眼动态范围的高对比度场景,另一方面可以最大化显示色域,是下一代显示技术的重要发展方向。为了实现高亮度、高效率、低成本的HDR激光显示,提出了一种基于区域调光的HDR激光显示架构,即模块化的激光光源通过光纤阵列的方式拼接出一个阵列照明光场,在图像显示时,每个激光器会根据画面各个区域的亮度来动态控制发光强度,而空间光调制器会根据动态的照明光场和要显示的图像内容进行相应的像素调制。另外,针对激光器波长差异导致的显示色差,提出了一种消除激光色差的区域调光算法,其主要原理是,激光器调制光强输出后,空间光调制器上的每一个像素点均根据该处混合照明光的三基色坐标计算出对应的调制值,进而实现HDR图像的无色差显示。

**关键词** 仪器、测量与计量; 激光显示; 高动态范围; 区域调光; 激光色差

中图分类号 TN27 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2312003

### High Dynamic Range Laser Display Based on Local Dimming

Wu Chao<sup>1,2\*</sup>, Qiu Guoping<sup>1\*\*</sup>, Yu Xin<sup>2</sup>, Hu Fei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

<sup>2</sup>Appotronics Corporation Ltd., Shenzhen 518052, Guangdong, China

**Abstract** On one hand, high dynamic range (HDR) laser display can show high contrast ratio scenery that is close to the dynamic range of the human eye. Moreover, it can also improve the color gamut of the display. Consequently, it is an important development direction for next generation display technologies. This study proposes a novel architecture based on local dimming technology to achieve a high-brightness, high-efficiency, and low-cost HDR laser display. Using an optical fiber array, the laser source modules output an array light field to the spatial light modulator (SLM). When displaying an image, each laser will dynamically control its brightness based on the grayscale value of its corresponding image area, and the SLM will modulate the pixels based on the dynamic light field and the source image. Furthermore, this study presents a local dimming algorithm that can eliminate the chromatic aberration caused by the laser wavelength difference. The main principle is that the modulating value of each pixel on the SLM is calculated based on the color coordinates of a mixed three-primary illuminating light. This algorithm enables the display of HDR images without chromatic aberration.

**Key words** instrumentation, measurement and metrology; laser display; high dynamic range; local dimming; laser chromatic aberration

## 1 引言

显示设备能实现的最亮和最暗的亮度比称之为动态范围,标准动态范围(SDR)的显示设备的动态范围只有 100:1~1000:1,远远达不到人眼可以识别的 100000:1 的动态范围<sup>[1]</sup>。因此,SDR 显示会使大量细

节丢失,这种显示质量的下降无法靠提升分辨率解决,而高动态范围(HDR)显示可以使显示内容的亮部和暗部的细节都得以保留,更真实地还原出光影效果,因此,越来越多的显示技术在追求动态范围的提升。另一方面,随着显示技术的发展,人们也在不断追求显示色域的增大,显示设备的色域越大,能够显示的颜色范

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-28; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0406800)、广东省重点领域研发计划项目(2019B010926001)、广东省省级科技计划项目(2018B030323014)

通信作者: \*cwu@appotronics.cn; \*\*qiu@szu.edu.cn

围越广,越能显示鲜艳的颜色。由于激光非常好的单色性,将其作为显示光源可以最大化显示色域<sup>[2-6]</sup>。从这一角度看,HDR激光显示是最能还原真实场景的显示技术,也是下一代显示技术的重要发展方向<sup>[7-8]</sup>。

实现HDR激光显示的第一类技术是激光扫描<sup>[9-10]</sup>,其原理为:红绿蓝三色激光经过准直透镜和波长合光器件后照射微机电系统(MEMS)二维扫描镜,通过控制MEMS扫描镜的偏转角度和激光器亮度可以实现光束扫描和像素色彩灰度显示。这种技术可以把显示设备的体积做得很小,也不需要成像镜头和聚焦的调整。但是要达到较高的分辨率,一般需要使用单模激光器来控制光束准直性和光束宽度,其输出功率受限,难以实现高亮度显示,同时也有很严重的散斑现象。

实现HDR激光显示的第二类技术是双片式空间光调制器(SLM)技术<sup>[11-12]</sup>,其原理为:在投影系统的SLM后方或前方加入第二片SLM,通过两次调制来实现两者对比度乘积的高对比度。但由于第二片SLM的加入,投影系统的输出亮度会大大降低,其光效只能达到普通投影系统的60%甚至更低。

实现HDR激光显示的第三类技术是光导向(light steering)技术<sup>[13-14]</sup>,其原理为:在投影系统的SLM前面加入相位调制液晶器件,通过控制相位调制液晶器件的相位延迟分布来控制照射到SLM上的照明光场强度分布<sup>[15-16]</sup>,实现光场强度比与SLM对比度乘积的高对比度。由于该技术利用了全息相干的原理<sup>[17-18]</sup>,不会造成类似于双片式SLM的额外调制损失,但是相位调制

液晶器件能承受的亮度有限,同时也只能使用单模激光器,因此其最高输出亮度受限,成本也居高不下。

为了实现高亮度、高效率、低成本的HDR激光显示,本文提出了一种基于区域调光(local dimming)<sup>[19]</sup>的HDR激光显示架构,即模块化的激光光源通过光纤阵列的方式拼接出一个阵列照明光场,在图像显示时,每个激光器会根据画面各个区域的亮度来动态控制发光强度,而SLM会根据动态的照明光场和要显示的图像内容进行相应的像素调制。另外,针对激光器波长差异导致的显示色差,本文也提出了一种消除光源色差的区域调光算法,其主要原理是:激光器调制光强输出后,SLM上的每一个像素点均根据该处混合照明光的三基色色坐标计算出对应的调制值,进而实现HDR图像的无色差显示。

## 2 HDR激光显示系统设计

### 2.1 系统框图

基于区域调光的HDR激光显示系统框图如图1所示,其与传统投影系统的区别在于,会将传统投影系统中SLM上的均匀照明光场,替换为每个分区可独立控制亮度的阵列照明光场。系统框图中将光源分为N个模组,每个光源模组负责M个分区的红绿蓝光场照明,照明光通过M根光纤引出。总计N×M根光纤的出射端通过结构件固定成光束阵列,经过双复眼光学系统将光纤出口的高斯光斑阵列整形成互相略有交叠的矩形光斑阵列后,成像到SLM上,形成阵列照明光场。

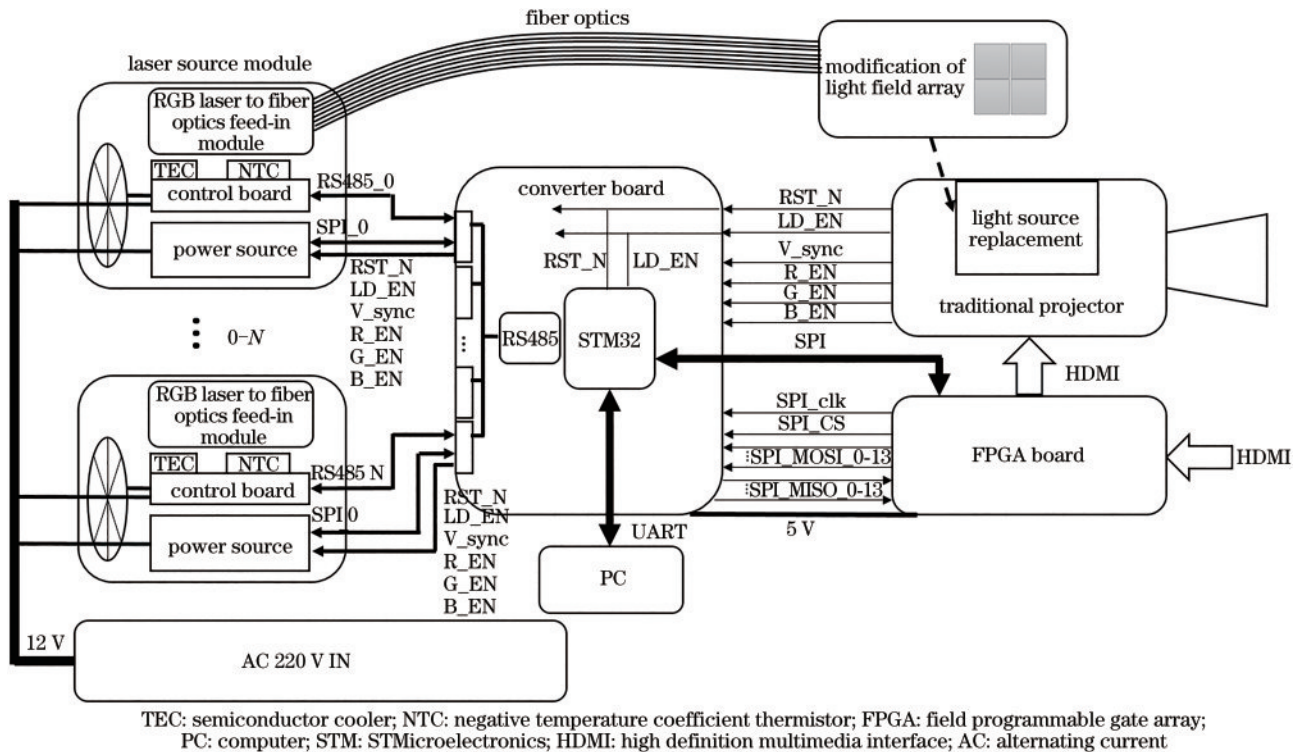


图1 基于区域调光的HDR激光显示系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of HDR laser display based on local dimming

系统框图中的现场可编程门阵列(FPGA)为主控模块,其对输入的每帧视频内容进行分析后,一方面将每个分区激光器的亮度值发送给对应的光源模组,另一方面根据计算出的照明光场,生成新的视频内容作为SLM的调制信号。

值得说明的是,每个光源模组均是一个拥有反馈调节的独立系统,一方面可以进行独立的散热控制,即通过负温度系数热敏电阻(NTC)收集激光器的工况温度,然后通过比例积分微分(PID)算法调节风扇转速和半导体制冷器(TEC)功率,将激光器的工作温度控制在一定范围内。另一方面利用亮度传感器监测激光器上方反射膜片1%的透射光,用以实现每个激光器亮度的实时监测和校准。因此本系统可以通过增减光源模组灵活设计分区数量,同时可以方便地对损坏的光源模组进行替换。

### 2.2 光源模组

光源模组的光学设计方案如图2(a)所示,对于其中一路光纤光路,首先两个单芯片的红激光器通过反s透p膜进行偏振合光,然后通过反绿透红膜、反蓝透黄膜分别和绿激光、蓝激光进行波长合光,合光后的光束通过光纤前的收集透镜耦合进光纤。这里使用两个单芯片红激光器偏振合光的原因在于:1)使用Rec. 2020

色域标准的红绿蓝三基色混合成标准的白场,红、绿、蓝激光的功率比大致为5:3:2,目前单颗芯片的红、绿、蓝激光器的光功率分别大概为1、2、4 W,可以看到光功率需求最高的红激光,其单颗输出功率最低,因此使用两颗红激光芯片可以更高效地利用蓝、绿激光器;2)红绿蓝激光中,散斑最严重的是红激光,通过红激光p光和s光偏振合光,可以在光源处就把红激光的散斑对比度降低到 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ <sup>[20]</sup>;3)通过两颗单芯片激光器合光,而非使用双芯片封装的单颗激光器,可以减小光纤入口处的红光成像光斑尺寸,从而使用小芯径的光纤。

光源模组的结构设计如图2(b)所示,每个激光器都有一个对应的反射膜片,这是为了更高效地将每个激光器的出光耦合进光纤,在光源模组组装时,会利用六轴调节制具调节每个激光器上方的反射膜片,当光纤出口的光强最高时,光纤耦合效率最高,此时通过点胶固定该反射膜片。由于单个膜片的调整不会影响其他激光器的光路,因此该调节是解耦的。经过调节后,光纤入口处红、绿、蓝光的面分布如图3所示,可以看到面分布的最长边已经达到300 μm以上,因此为了保证耦合效率,光纤的芯径需要至少400 μm。如果继续增大芯径,只会对较低的耦合效率有明显的改善效果,

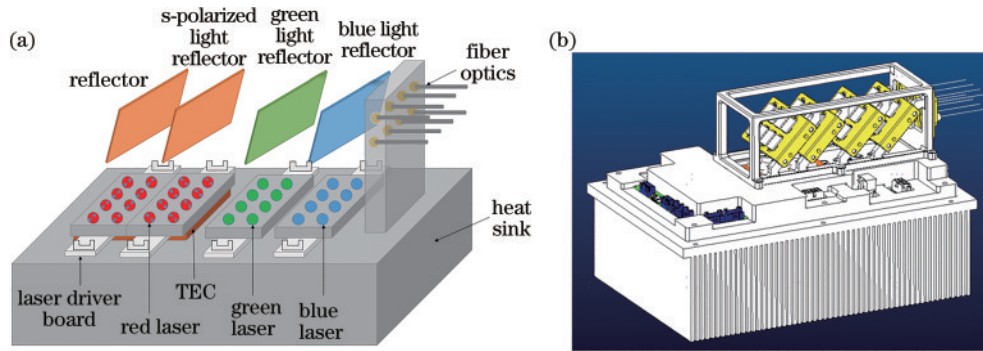


图2 光源模组。(a)光学示意图;(b)结构图

Fig. 2 Diagram of laser source module. (a) Optical schematic diagram; (b) structure diagram

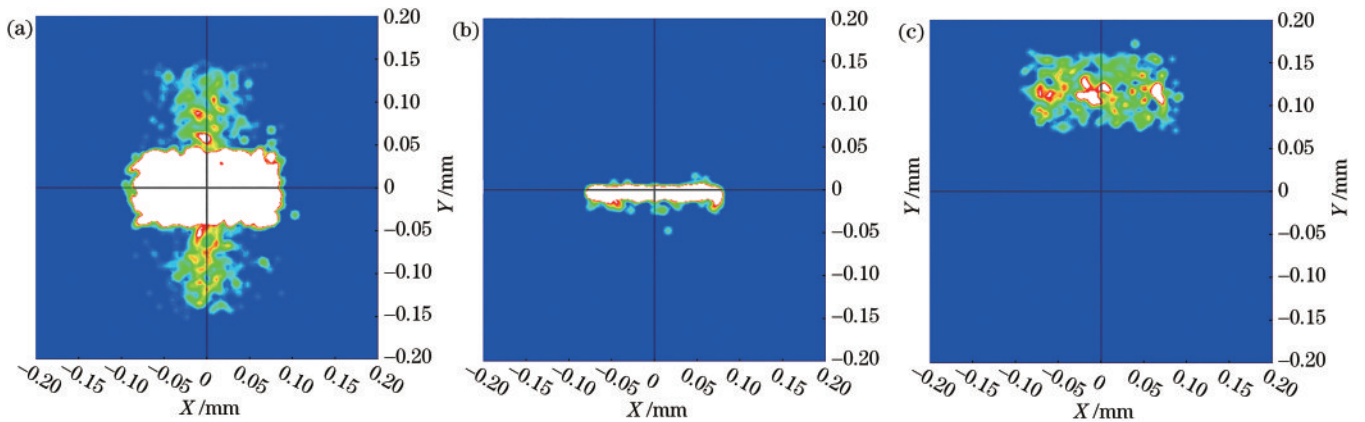


图3 光纤入口处的红、绿、蓝光面分布。(a)红光面分布;(b)绿光面分布;(c)蓝光面分布

Fig. 3 Red, green, blue light surface distributions at inlet of fibers. (a) Red light surface distribution; (b) green light surface distribution; (c) blue light surface distribution

但对耦合效率大于 80% 的情况, 光纤接受光线角度的能力会占主导因素, 增大芯径并没有明显效果, 因此 400  $\mu\text{m}$  芯径是一个较为理想的光纤尺寸。在选用 400  $\mu\text{m}$  芯径的情况下, 通过调整各个反射膜片, 可以将所有激光器的光纤耦合效率提升到 95% 以上。

### 2.3 阵列光场整形光路

光纤阵列结构的实物图和阵列光场的整形光路设计如图 4 所示, 所有光源模块的光纤通过光纤插件整齐排布成矩形阵列, 光纤出口先经过准直透镜阵列, 准直透镜与光纤一一对应, 再通过复眼进行匀光, 最后经

过聚焦透镜阵列, 形成阵列照明光场。

在进行光学效果仿真时, 每个光纤的出口光场按照芯径 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径(NA)为 0.22 的光纤高斯光场分布进行仿真, 其经过准直透镜后的面分布和角分布如图 5 中的第一列所示, 为高斯圆形的面分布和圆形的角分布。在经过复眼整形匀光后, 角分布为矩形。在经过聚焦透镜成像后, 面分布为均匀矩形。

图 6 给出了 14  $\times$  8 分区的光纤整形后的阵列光场的面分布, 可以看出, 经过准直透镜阵列、复眼整形匀光和聚焦透镜阵列, 已经可以在成像面形成阵列光场。

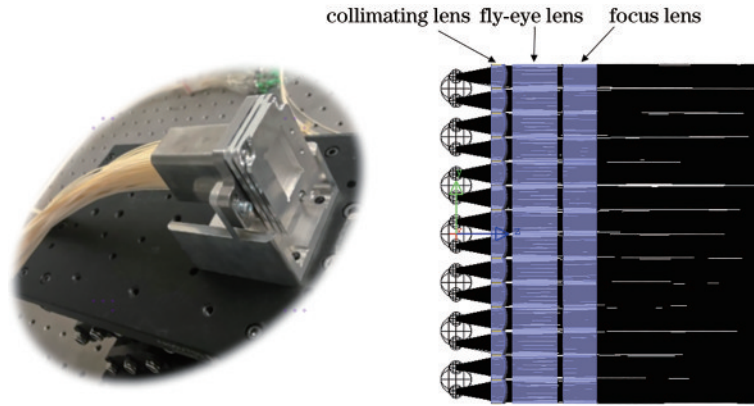


图 4 光纤阵列实物图和阵列光场的整形光路设计

Fig. 4 Picture of optical fiber array and optical design of array light field shaping

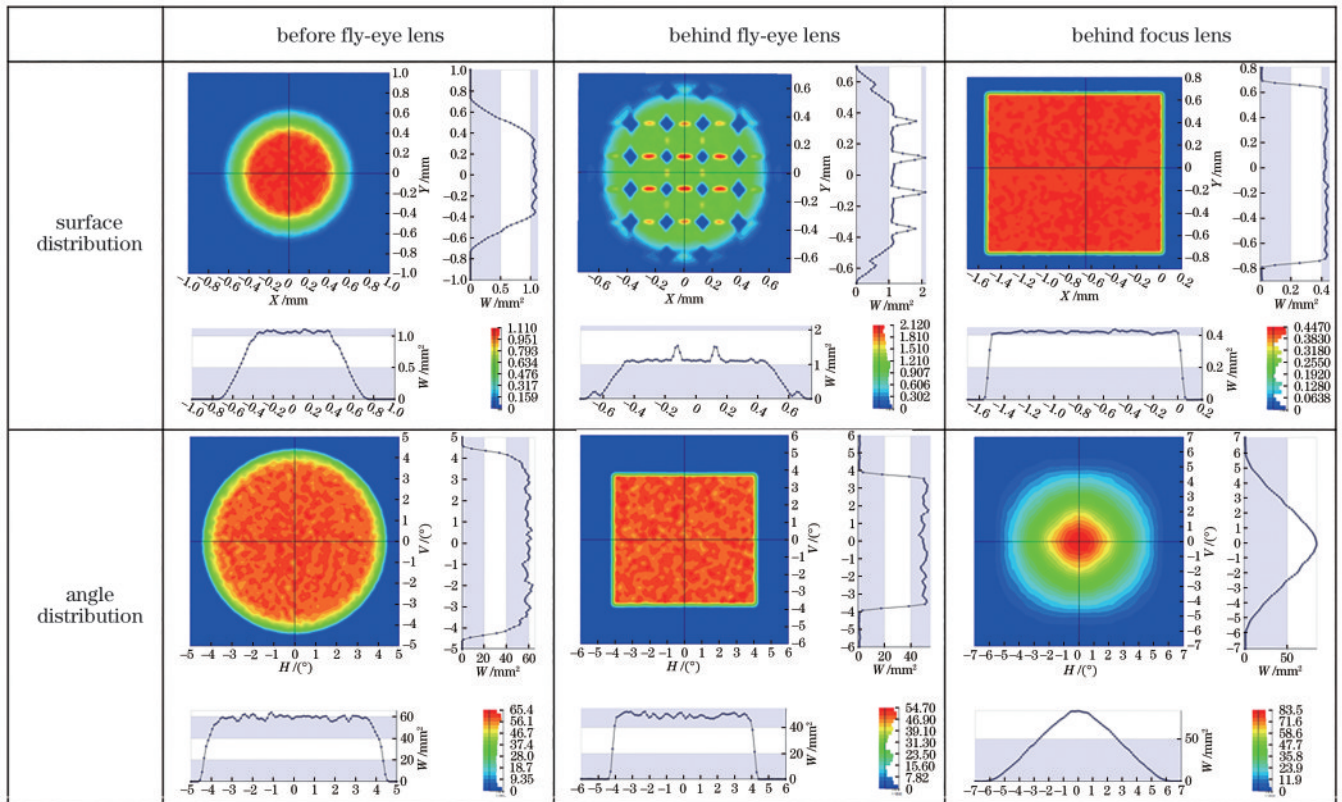


图 5 每个光纤射出的光场在复眼整形匀光前、复眼整形匀光后和聚焦透镜成像后的面分布和角分布

Fig. 5 Surface distribution and angle distribution of light from each optical fiber, at positions before fly-eye lens, behind fly-eye lens, and focus plane behind focus lens

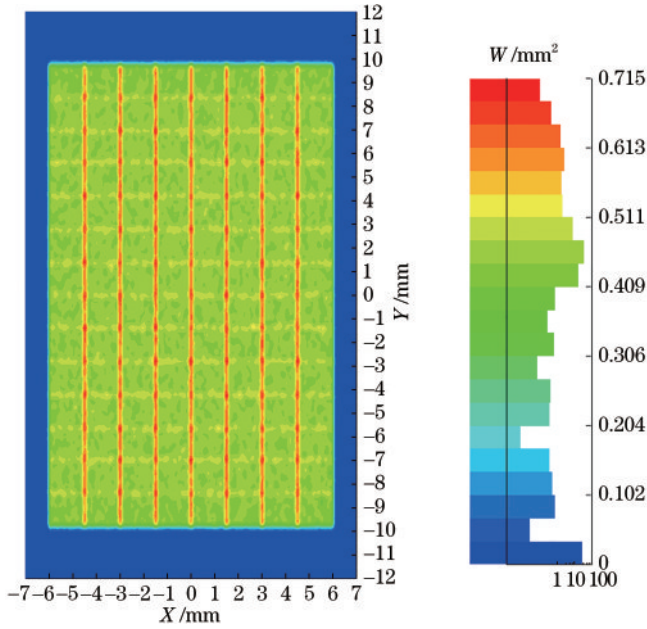


图 6 整形后的阵列光场的面分布

Fig. 6 Surface distribution of array light field after light shaping

将该阵列光场利用成像光路成像到 SLM 上, 就可以实现阵列的照明光场。需要注意的是, 成像光路中, 需要利用成像离焦或增加散射片的方式将阵列光场扩散交叠, 避免产生分区边界伪影。

### 3 HDR 激光显示算法设计

#### 3.1 消除激光色差的方法

本文的 HDR 激光显示系统采用了激光阵列作为照明光源, 由于不同激光器的中心波长存在差异性, 会导致不同分区红绿蓝三基色的色坐标不同, 从而使显示画面出现色差。以纯蓝画面为例, 此时所有的蓝激光均开启到相同的最大亮度, 当两个分区的蓝激光中心波长相差 1 nm 时, 其色差  $\Delta E_{2000} = 0.8$ , 此时人眼无法分辨它们的颜色差异; 当两个分区的蓝激光中心波长相差 2 nm 时, 其色差  $\Delta E_{2000} = 1.6$ , 此时专业人士可以分辨它们的颜色差异; 而当两个分区的蓝激光中心波长相差 3 nm 时, 其色差  $\Delta E_{2000} = 2.4$ , 此时普通观众都可以分辨它们的颜色差异了。通常激光器出厂时的中心波长波动范围会达到 14 nm, 即使通过挑选激光器的方式保证了中心波长的一致性, 但各激光器由于工作条件不同和老化速率不同, 一段时间后还是会出现中心波长的差异。因此, 本文提出了一种在激光器存在差异情况下的消除显示色差的方法。

CIE 1931 XYZ 色彩空间定义了与显示设备无关的颜色数值,  $xyY$  是颜色数值的另一种更直观的表达方式, 对于给定的  $xy$  色坐标, 都能根据 CIE1931 色度图, 找到它指定的唯一颜色, 而  $Y$  表达了亮度信息。  $(X, Y, Z)$  和  $(x, y, Y)$  的转换关系为

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ Y = Y \end{cases} \quad \begin{cases} X = \frac{x}{y} \cdot Y \\ Y = Y \\ Z = \frac{1 - x - y}{y} \cdot Y \end{cases} \quad (1)$$

目前的显示系统均使用的是红绿蓝三基色的显示方法, 即通过红、绿、蓝三种显示基色的亮度组合显示出需要的图像颜色。为了显示颜色  $(X, Y, Z)$ , 三基色需要的调制量  $(r, g, b)$  为

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $(X_r, Y_r, Z_r)$ 、 $(X_g, Y_g, Z_g)$ 、 $(X_b, Y_b, Z_b)$  分别为红、绿、蓝场最高亮度时的颜色数值, 表征的是三基色的特性;  $r, g, b$  的取值范围均为  $0 \sim 1$ , 表征的是三基色的调制量。这里红、绿、蓝场最高亮度指的是调整白平衡后的亮度, 而不是单个基色能达到的最大亮度。

在本文的 HDR 投影系统中, 每个像素点的照明光场都是由周边多个激光器贡献, 这些激光器的色坐标不同, 亮度也会根据图像内容有强弱分布, 因此其三基色照明光场的颜色数值并不是固定值, 而是随着图像内容的变化而变化。以蓝基色的计算为例, 对于每个像素点, 第  $k$  个颜色数值  $(x_b^{(k)}, y_b^{(k)}, Y_b^{(k)})$  或  $(X_b^{(k)}, Y_b^{(k)}, Z_b^{(k)})$  的蓝激光器, 在该像素点的亮度为  $Y_b^{(k)} D_b^{(k)}$ , 这里  $D_b^{(k)}$  表示第  $k$  个蓝激光器在该像素点的亮度与最大亮度的比值, 即激光器光强调低量 (dimming) 与光场分布函数数值的乘积, 则该激光器对该像素点的照明光贡献为  $(x_b^{(k)}, y_b^{(k)}, Y_b^{(k)} D_b^{(k)})$  或  $(X_b^{(k)} D_b^{(k)}, Y_b^{(k)} D_b^{(k)}, Z_b^{(k)} D_b^{(k)})$ 。若周边有  $N$  个蓝激光器对该像素点的照明光场有贡献, 则该像素点的蓝基色为  $N$  个照明光场叠加后的颜色数值, 即  $(\sum_{k=1}^N X_b^{(k)} D_b^{(k)}, \sum_{k=1}^N Y_b^{(k)} D_b^{(k)}, \sum_{k=1}^N Z_b^{(k)} D_b^{(k)})$ 。同理可以得出绿、红基色的颜色数值, 根据式 (2) 可以得到该像素点的  $(r, g, b)$  调制量为

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \left\{ \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} X_r^{(k)} & X_g^{(k)} & X_b^{(k)} \\ Y_r^{(k)} & Y_g^{(k)} & Y_b^{(k)} \\ Z_r^{(k)} & Z_g^{(k)} & Z_b^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_r^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & D_g^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & D_b^{(k)} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

#### 3.2 激光器阵列区域调光算法

在计算每个激光器的 dimming 数值时, 为了避免照明光强度不够产生的显示色差, 首先取该激光器对应的分区中图像亮度的最大值作为 dimming 初始值。虽然取图像亮度最大值会导致对图像噪声非常敏感的问题, 但后续的时域滤波会解决该问题。

为了避免产生分区边界伪影, 会通过增加扩散膜或成像离焦的方式, 让每个分区的照明光场扩散到相

邻分区。但这样会造成分区内光场不均匀的问题,例如在黑暗背景下有一块白色区域,这块白色区域的边缘亮度会低于中心亮度。为了解决这个问题,需要增加周边激光器的亮度,来补偿该分区扩散出去的光场。具体的方案如式(4)所示,每个激光器的亮度除了由本分区图像的最大亮度 $L_{\max}(n)$ 决定,还取决于周边分区图像的最大亮度 $L_{\max}(m)$ ,这里称之为空间滤波,

$$L_s(n) = \max \left\{ L_{\max}(n), \left[ L_{\max}(m) - T_s \mid m \in \phi(n) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: $L_s(n)$ 为空间滤波后第 $n$ 个激光器的亮度输出; $T_s$ 为空间滤波的参数,这里取20; $\phi(n)$ 为受到第 $n$ 个激光器照明光场扩散影响的其他分区。

另外,还有一个需要解决的问题是屏幕闪烁,当视频图像频繁变化或快速运动时,激光器亮度也会快速变化,由于激光器的照明光场会影响很大范围的像素点,当有部分像素点的亮度在时间上快速变化,而其他像素点的亮度不变,则受光场扩散影响的亮度不变的像素点会有明显的屏幕闪烁。为了解决这个问题,使用了与内容相关的无限脉冲响应(IIR)时域滤波器,一方面解决了屏幕闪烁的问题,另一方面也解决了初始取图像亮度最大值带来的图像噪声敏感问题。IIR滤波器设计如下式所示:

$$L_T^{(k)}(n) = R \cdot L_S^{(k)}(n) + (1 - R) \cdot L_T^{(k-1)}(n), \quad (5)$$

式中: $L_T^{(k)}(n)$ 为时域滤波器的输出; $k$ 和 $k-1$ 表示当前帧和前一帧; $R$  ( $0 < R \leq 1$ )为控制IIR低通滤波器平滑度的参数, $R$ 越小,滤波越平滑,越少屏幕闪烁会被察觉。但太小的 $R$ 会拖慢照明光场的变化,尤其是在场景突然变换时。因此 $R$ 的取值需要根据视频内容决定,即

$$R = \min \left( 1, T_T + \left| P_{\text{mean}}^k - P_{\text{mean}}^{(k-1)} \right| \right), \quad (6)$$

式中: $T_T$ 为IIR滤波器的参数,这里取0.125; $P_{\text{mean}}^k$ 为整幅图像像素灰度的归一化均值。使用了该内容相关的IIR滤波器,在显著的场景变换时,激光器的亮度变化也会很快,而在场景变换较弱时,激光器的亮度变化则较平缓,从而避免了屏幕闪烁的问题和图像噪声敏感问题。

### 3.3 算法流程

将区域调光算法与消除激光色差的方法相结合后的算法流程如下:

1) 对于影院片源,其视频数据采用的是XYZ格式。但通常民用视频采用的是特定色域的红绿蓝(RGB)数据格式。因此,首先将RGB格式的数据转换成对应的XYZ颜色数值;

2) 分别用红、绿、蓝激光器阵列中的最小波长和最大波长对应的色彩空间转换矩阵利用式(2)计算出8个rgb图像,每个像素点的 $r$ 、 $g$ 、 $b$ 值取8个中的最大值,得到image\_rgb\_max;

3) 根据image\_rgb\_max,使用区域调光算法计算出红、绿、蓝子帧的每个激光器的dimming值;

4) 对于每个像素点,根据预存的各个激光器的照明光场,以及每个激光器的dimming值,计算出该处混合照明光的三基色坐标,即式(3)中求和矩阵的各个数值。根据式(3)计算出该像素点的 $(r, g, b)$ 调制量。

经过上述步骤仅仅可以计算得出一个像素点的调制量,因此需要借助FPGA进行流水计算,实现实时显示。

## 4 结 论

为了实现一种高亮度、高效率、低成本的HDR激光显示系统,提出了一种基于区域调光的HDR激光显示架构,模块化的激光光源通过光纤阵列的方式拼接出一个阵列照明光场,该照明光场会根据图像内容动态调整,实现暗处更暗。同时通过光学仿真分析了该架构的可行性,光纤芯径选取400  $\mu\text{m}$ 为最优值,将多个光源模组的光纤输出整合成光纤阵列后,利用复眼整形匀光可以形成区域调光需要的阵列照明光场。另外,针对激光器波长差异导致的显示色差,提出了一种消除激光色差的区域调光算法,即SLM上的每一个像素点均根据该处混合照明光的三基色坐标计算出对应的调制值,从而实现图像的无色差显示。

## 参 考 文 献

- [1] Reinhard E, Ward G, Pattanaik S, et al. High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2006.
- [2] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001. Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [3] Jia Y F, Wang Y F, Zhou X Y, et al. Narrow vertical beam divergence angle for display applications of 645 nm lasers[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(10): 101401.
- [4] Hu L, Ren X Y, Liu J P, et al. High-power hybrid GaN-based green laser diodes with ITO cladding layer[J]. Photonics Research, 2020, 8(3): 279-285.
- [5] Zhao C Y, Tang C W, Lai B, et al. Low-efficiency-droop InGaN quantum dot light-emitting diodes operating in the "green gap"[J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 750-754.
- [6] 孙敏远, 朱建英, 毕勇, 等. 激光显示中颜色配比与实时色温控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704001. Sun M Y, Zhu J Y, Bi Y, et al. Color matching and real-time color temperature control in laser display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704001.
- [7] 孙敏远, 朱建英, 毕勇, 等. 激光显示中颜色配比与实时色温控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704001. Sun M Y, Zhu J Y, Bi Y, et al. Color matching and real-time color temperature control in laser display[J]. Chinese

- Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704001.
- [8] 王飞霞, 王俊轶, 李晓华, 等. 激光投影电视中图像细节层次感的恰可察觉差[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0533001.  
Wang F X, Wang J Y, Li X H, et al. Just-noticeable difference of image contour rendering for a laser projection television[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0533001.
- [9] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F79-F98.
- [10] 张智海. 微光机电系统光栅平动式光调制器的激光投影研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 663-667.  
Zhang Z H. Study of laser projection display based on micro-opto-electro-mechanical system grating moving light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 663-667.
- [11] Wanat R, Petit J, Mantiuk R K. Physical and perceptual limitations of a projector-based high dynamic range display [EB/OL]. [2021-04-05]. <http://dx.doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/TPCG/TPCG12/009-016>.
- [12] Yoo O, Nam S, Choi J, et al. P-108: contrast enhancement based on advanced local dimming system for high dynamic range LCDs[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 1667-1669.
- [13] Damberg G, Gregson J, Heidrich W. High brightness HDR projection using dynamic freeform lensing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(3): 24.
- [14] Damberg G, Boitard R, Ballestad A, et al. 8-3: invited paper: light steering projection systems and attributes for HDR displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 87-90.
- [15] Damberg G, Heidrich W. Efficient freeform lens optimization for computational caustic displays[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10224-10232.
- [16] Bawart M, Bernet S, Ritsch-Marte M. Programmable freeform optical elements[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4898-4906.
- [17] Buckley E. Holographic laser projection[J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(3): 135-140.
- [18] Buckley E. Holographic projector using one lens[J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3399-3401.
- [19] 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.
- [20] 徐美芳, 王浩全, 高文宏, 等. 激光投影系统中影响散斑抑制的参数分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602011.  
Xu M F, Wang H Q, Gao W H, et al. Parameters analysis for speckle suppression in laser projection systems [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0602011.