

三片式 LCOS 激光投影显示中复合散斑的抑制

刘红¹ 那柏林¹ 刘卫东² 王蔚生^{1*}

(¹ 华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200241)
² 海信研发中心模组, 青岛 266071)

摘要 研究了三片式硅基液晶(LCOS)激光投影显示中散斑的成因、类型及其光学统计特性,并分析了激光散斑大小的测量方法。在此基础上,选用旋转散射片来减少三片式 LCOS 激光投影系统中产生的复合散斑,并通过一系列的仿真和实验,使得该激光投影机对比度 C 降到了人眼可接受的范围 4.2%。证明了旋转散射片的方法能有效减少复合散斑,具有光学结构简单、实施性强等优点。

关键词 激光投影显示; 光学引擎; 复合散斑; 硅基液晶; 压电陶瓷

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.042201

Composite Speckle Suppression in 3-LCOS Laser Projection Display

Liu Hong¹ Na Bailin¹ Liu Weidong² Wang Weisheng^{*1}

(¹ School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)
² Module, Hisense Research and Development Center, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract The factor, categorization and optical statistical characteristics of laser speckle shown in three-liquid crystal on silicon (LCOS) laser projection display system are studied, and a measuring method of laser speckle is analyzed. According to this, an optical method of rotating diffuser to reduce the composite speckle is applied. Through a series of simulations and experiments, the contrast of speckle patterns is reduced to 4.2%, which is acceptable to people's eyes. So the method of rotating diffuser effectively suppresses laser speckle, which has simple optical structure and is easy to implement.

Key words laser projection display; optical engine; composite speckle; liquid crystal on silicon; piezoelectric ceramic

OCIS codes 220.0220; 220.3620; 220.3630

1 引言

国家“十一五”规划提出的新型显示技术包括:激光全色显示、3D 显示、场发射显示(FED)、有机发光显示(OLED)和 E-paper 等技术。其中,激光显示具有色域宽、尺寸小和能量损失少等优点,在显示技术发展中被列为首要项目^[1,2]。进入 20 世纪后,显示技术发展飞速,其颜色已由单一的黑白色过渡到彩色,屏幕也正逐步朝更大、更轻、更薄和柔性发展^[3,4],而硅基液晶(LCOS)激光投影显示正是此轨迹发展的必由之路。显示芯片 LCOS 的优点是:像素开口率高,具备高画质的特性,本身是基于反射式结构的偏振模式成像,因此有很高的光利用率。不会像 LCD 光学引擎因光线要穿透面板而大幅降低光利用率,因而 LCOS 可以实现低耗电、高亮度^[5]。而且 LCOS 光学扩展量的孔径角比常规光源小,对具有极小孔径角的激光束有优势^[6]。业界认为利用激光作为光源的显示器将会成为新一代显示行业的主流^[7,8]。

收稿日期: 2010-06-03; 收到修改稿日期: 2010-12-08

基金项目: 国家 863 计划(2007AA030112, 2009AA032708)资助课题。

作者简介: 刘红(1978—),女,博士研究生,讲师,主要从事显示技术和激光显示中散斑噪声的抑制等方面的研究。

E-mail: Haimi.liu@gmail.com

导师简介: 王蔚生(1967—),男,博士,副研究员,主要从事投影显示和光学设计等方面的研究。

E-mail: wangweisheng@hotmail.com

此前本课题设计了一款基于三基色激光为光源的三片式 LCOS 投影机,其各项功能运行良好,但是由于激光的高度相干造成屏幕斑点,使得成像画面模糊、刺眼和长久视觉疲劳。激光散斑的存在严重影响了成像质量,使图像的对比度和分辨率下降,它是制约和阻碍激光显示快速发展以及市场化的主要原因之一。而一些减少散斑的方法如振动投影屏幕或者移动孔径光阑^[9,10]等又很难运用到激光显示量产中。

2 激光散斑类型和抑制

散斑是个随机行走问题,当激光照射到粗糙平面上,表面上各点都要向空间散射光,这些光的振幅和相位都无规则分布,来自粗糙物体表面上各个小面元射来的光波将相互干涉而产生颗粒状的图样,即激光散斑。按光场的传播方式,激光散斑可分为:近场散斑(与非涅耳衍射对应);远场散斑(与夫琅禾费衍射对应)和像面散斑(通过成像系统形成)。按观察条件可分为:客观散斑和主观散斑。观看激光显示的观看者一般相隔 3~4 m,属于远场散斑(夫琅禾费衍射),主、客观散斑都有。

目前为止,散斑的消除方法已经有很多,按不同部位,消散斑的方法^[9~12]可以分为:光源消散斑、光路器件消散斑、显示芯片消散斑、数字图像处理消散斑和屏幕消散斑。光源消散斑的优点是可以完全根除散斑,缺点是技术上实现难度大;光路器件消散斑的优点是容易实现,缺点是只能一定程度地消散斑,会使系统体积增加很多;显示芯片消散斑的优点是可以实现器件一体化,缺点是也只能一定程度地消散斑;数字图像处理消散斑的优点是不需要特定硬件,缺点是会牺牲成像质量;利用屏幕消散斑可以实现较好的消散斑效果,但是生产成本太高,而且目前国内不能加工,实用性受到很大限制。

3 三片式 LCOS 激光投影显示中散斑问题

本文设计的三片式 LCOS 激光投影显示工作原理是:经过光纤耦合的激光束,到达照明光学引擎,再由光学引擎调制,被调制后的激光被投影光学系统投放到屏幕上,形成图像。研究系统产生激光散斑的情况,除了激光干涉产生的散斑,还有各种光学元件表面杂散光干涉所产生的散斑。为了研究方便,首先考虑屏幕到人眼产生的散斑,如图 1 所示。由上节分析可知,人眼观看屏幕是客观散斑与主观散斑的混合。客观散斑是指人眼所处位置形成的散斑,若考虑单个像素,散斑尺寸比较大(比人眼瞳孔直径的 1/10 大或相近),由于该散斑的影响,人眼的移动就会引起像素光线进入人眼后光能量变化。主观散斑是指在屏幕附近一定范围内,在人眼观察屏幕的有效景深内,散斑尺寸大于 0.05 mm(人眼的分辨率)的散斑。

假设观众到投影屏幕的距离为 L (约 3~5 m),单个像素的直径为 d_1 ,对 LCOS 激光投影产生的散斑进行分析。以红色激光为例 $\lambda_r = 631 \text{ nm}$,测得半导体激光器到光纤入射端面光纤的距离为 $l = 2 \text{ mm}$,单个像素的直径 $d_1 = 0.3 \text{ mm}$ 。求得从半导体激光器到光纤入射端面的散斑大小为

$$z \approx \lambda \frac{l}{d_1} \approx 0.0042 \text{ mm}, \quad (1)$$

因为光纤耦合对激光散斑影响不大,可以假设光纤出射端面的散斑与入射光纤面的散斑大小近似相等。计算从光纤出射端面到 LCOS 芯片的主观散斑,大小为

$$z \approx 1.22\lambda F(1+V) \approx 0.011 \text{ mm}, \quad (2)$$

式中 F 为透镜的孔径比, V 为光源系统的放大率。从 LCOS 芯片到屏幕产生的主观散斑大小为

$$z \approx 1.22\lambda F'(1+V') \approx 0.2814 \text{ mm}, \quad (3)$$

式中 F' 为投影镜头的光圈数, V' 为投影镜头的放大率。从(2)式计算结果可知,光纤出射端面到 LCOS 的主观散斑大小为 0.011 mm,比 LCOS 像素尺寸边长 0.0054 mm 要大很多,故该散斑将直接影响成像质量,不可忽略。从(3)式可以看出,激光光源和粗糙屏幕引起的散斑影响最严重,是消除的重点。因此 LCOS 激光投影显示系统形成散斑噪声的主要原因有 3 个:1)光源到屏幕引起的散斑;2)屏幕到人眼视网膜上形成的像

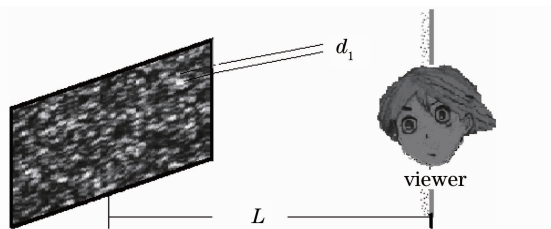


图 1 投影屏幕到人眼产生的散斑示意图
Fig. 1 Speckle pattern from projection screen to human eye

面散斑;3)屏幕粗糙引起的散斑,它们共同形成了此显示系统的复合散斑。

3.1 三片式 LCOS 激光投影显示中复合散斑抑制方案

根据此三片式 LCOS 激光投影显示系统的散斑成因,可以分别给出一种有效的消散斑方案。由光源到屏幕形成的散斑可以通过旋转散射片或光管来消除。屏幕到人眼和由于屏幕粗糙引起的散斑可以通过振动屏幕或使用特殊屏幕来消除散斑。虽然运动或者振动大屏幕方法对于消散斑有效,但是振动屏幕会引起机械装置维护等方面的问题,很难大量运用到实际的生产中。而特殊消散斑屏幕的生产成本较高,目前国内还不能加工生产。

比较各种消散斑方案,旋转小尺寸散射片的光学结构是最实用和易于实现的消散斑方法。通过快速旋转小尺寸的散射片将不同的散斑重叠起来,在人眼的暂留效应特征时间 50 ms 内,多个散斑相互叠加,使散斑平均而被消除。旋转散射片的散斑减少系统里,要求运动小散射片的散射角度不能太大,应该在最后的透镜模块组中有一个可变的孔径去控制它的光圈值。因为激光散射到系统中小的散射体上被发射透镜放大,如果散射体的散射角比透镜的数值孔径(NA)或光圈值大,很多光就会损失,不能达到很好的光能利用率。通过计算和实验验证,此投影系统可采用爱特蒙特光学公司或 Thorlabs 公司全角散射角为 1° 左右的散射片,放置在激光光纤耦合之后,如图 2 所示。

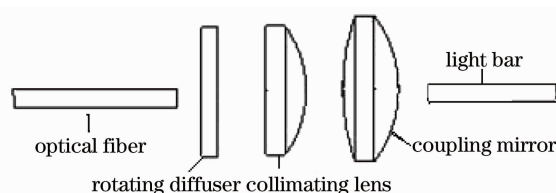


图 2 三片式 LCOS 激光投影消散斑部分光学结构图
Fig. 2 Optic structure chart of reducing speckle in 3-LCOS laser projection system

3.3 消散斑驱动源

消除散斑所用的散射片运动驱动源可以采用体积小,调制速度快的压电陶瓷(PZT),其将电能转化为超声振动,在微米量级内以千赫兹的频率在垂直方向不断移动,从而改变入射光的入射角,垂直方向的移动在微米量级。散射片的振动驱动源也可以通过高频信号发生器驱动振片振动,振片再带动散射片振动。而微型马达、电机或线圈都可以带动器件快速旋转。本文采用成本比较低,功率比较大的微型马达带动散射片高速旋转。

4 实验验证

根据投影系统的工作原理,搭建了显示系统消散斑的实验测试平台,如图 3 所示,激光经过消干器 1,扩束器 2,均匀器 3 后进入光学引擎的光棒中。研究散斑噪声广泛使用的数学参量是散斑对比度^[1],其定义为

$$C = \sigma/\bar{I} = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min}) = \sqrt{\langle I_i^2 \rangle - \langle I_i \rangle^2} / \langle I_i \rangle, \quad (4)$$

式中 \bar{I} 为测量图像的平均强度, $\langle I_i \rangle$ 表示第 i 个元件的光的平均强度, σ 为强度分布的标准差。散斑对比度越小就表明成像画面越均匀,散斑噪声被有效抑制了。散斑对比度一般是通过测量由 CCD 相机拍得的图像中散斑强度的范围来获得。CCD 相机的核心是 CCD 器件,它是一种电扫描的光电二极管面阵列。由 CCD 器件采集的光强信息经过采集卡(插在计算机的插槽内)进行模数变换,将模拟信号变成数字信号后显示在计算机屏幕上,同时将此数字信号存储到计算机上,利用由(4)式编写的 Matlab 程序进行数据处理,从而得到散斑对比度 C 。实验测试中取多个系统样本,研究样本在空间各点散斑场的统计性质。经过计算机处理数据得 $C=4.2\%$,此时散斑对比度 $C \leq 5\%$,已达到了人眼可以接受的范围。

图 4 为投影系统中加入旋转散射片后投影图片。图 4(a)为未旋转散射片时,观察到的叠加散斑噪声的图像,可以看到明显的散斑图样。图 4(b)为加入旋转散射片后观察到的投影画面,此时投影画面清晰,看不到明显的激光散斑,效果与非相干光源成像效果基本相同。实验表明运用快速旋转散射片的方法可以有效

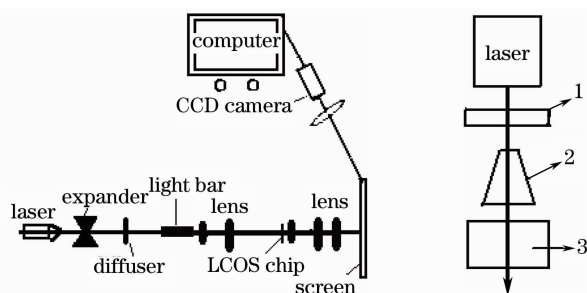


图 3 试验结构简图
Fig. 3 Structure diagram of the experimental system

抑制激光显示系统所产生的复合激光散斑。

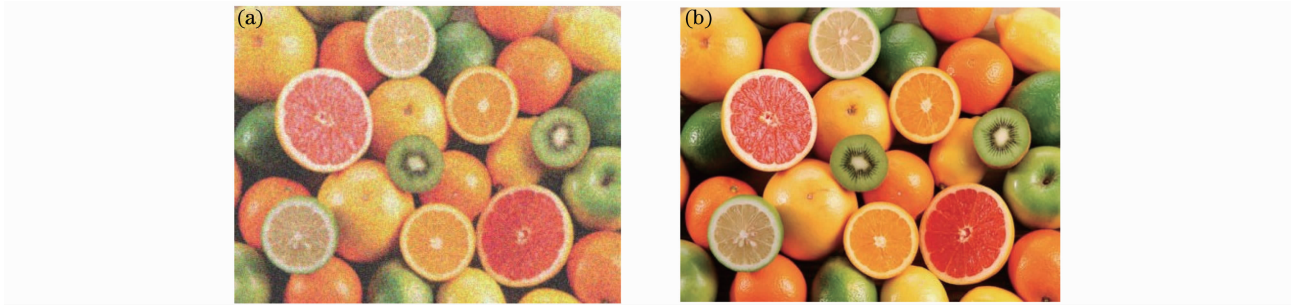


图4 激光投影系统的拍摄照片。(a)未旋转散射片;(b)旋转散射片

Fig. 4 Photographs of the laser projection system without (a) or with (b) rotating diffuser plate

5 结 论

实验验证了在照明系统中引入旋转散射片,激光的路径和相位都会根据散射体的运动而改变,屏幕上的散斑图也会变化,此方法能有效地减少三片式 LCOS 激光投影系统的三复合散斑,使得散斑对比度降到 4.2%,制造出来的投影样机显示画面清晰。本文的消散斑解决方案具有光学结构简单,成本低,易于控制和实施性强等优点。随着激光干涉造成的散斑得到有效抑制,利用激光的 LCOS 显示设备必将成为新一代显示行业的主流。

参 考 文 献

- Joseph. W. Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications and Company Publisher, 2007, Greenwood: Roberts
- Wang Weisheng, Qiu Song, Mao Min *et al.*. Research on optical engine of DLP RPTV based on LED [J]. *Advanced Display*, 2006, **12**(4): 22~25
王蔚生, 邱 崧, 毛 敏 等. 采用 LED 光源 DLP 背投电视光学引擎的研究 [J]. *现代显示*, 2006, **12**(4): 22~25
- Kang Yusi, Liu Weiqi, Feng Rui *et al.*. Off set interference of laser TV [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 615~619
康玉思, 刘伟奇, 冯 睿 等. 激光电视的消干涉 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 615~619
- Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong *et al.*. Discussion of illuminance formula in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1364~1368
屈恩世, 张恒金, 曹剑中 等. 对光学设计中照度计算公式的讨论 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1364~1368
- Y. M. Lee, J. M. Park, S. Y. Park *et al.*. A study of the relationships between human perception and the physical phenomenon of speckle [J]. *SID Int. Symp. Digest Tech. Papers*, 2008, **45**(1): 1347~1350
- Daniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhat, Dave Collins *et al.*. Illumination with solid state lighting technology [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(2): 310~320
- Joseph. W. Goodman. Some fundamental properties of speckle [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11): 1145~1150
- Joseph. W. Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications [M]. Science Press, 2009. 119~158
古德曼. 光学中的散斑现象:理论与应用 [M]. 北京:科学出版社,2009. 119~158
- Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 963~971
罗 毅, 张贤鹏, 王 霖 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 963~971
- Pablo Benitez, Juan C. Minano, Jose Blen *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(7): 1489~1502
- Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540~544
丁 毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 540~544
- Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of the miniprojector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 913~918
赵 星, 方志良, 崔继承 等. 微型投影机光学引擎的研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 913~918