

文章编号:1007-2780(2015)02-0359-06

转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制

付瀚毅^{1,2}, 刘伟奇^{1*}, 魏忠伦¹, 康玉思¹, 陶淑苹¹, 冯 睿¹, 张大亮¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了消除散斑现象,对随机漫射体抑制散斑的可行性进行了探讨。分析了“随机微透镜阵列”作为随机漫射体在光束控制和光能利用率方面的优越性,并提出了在光学系统中加入转动“随机微透镜阵列”的方式抑制散斑。对加入这种结构后屏幕上的散斑进行了测量,验证了此种方法可以将散斑对比度降低到 1.15%,使人眼分辨不出激光散斑,提升了激光电视的观看效果,并与传统的转动匀光棒法进行对比,体现了此种方法出色的抑制散斑的能力。

关键词:散斑抑制;随机微透镜阵列;激光显示;散斑测量

中图分类号: TN141 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20153002.0359

Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display

FU Han-yi^{1,2}, LIU Wei-qi¹, WEI Zhong-lun¹, KANG Yu-si¹,TAO Shu-ping¹, FENG Rui¹, ZHANG Da-liang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: In order to eliminate disturbing speckle phenomenon, this paper discussed the feasibility of speckle reduction, analyzed the superiority in beam control and energy efficiency using the "random micro-lens array" as the random diffuser, and proposed to set the rotating "random micro-lens array" in the optical system to reduce the speckle. The speckle on the screen was measured after setting this component, this method was verified to reduce speckle contrast to 1.15% so that the eyes couldn't distinguish the laser speckle. This method can greatly improve the viewing quality of laser TV. Compared with traditional method of rotating uniform light stick, this method presented the excellent ability in speckle reduction.

Key words: speckle reduction; random micro-lens array; laser display; speckle measurement

收稿日期:2014-05-06;修订日期:2014-07-17.

基金项目:国家 863 计划(No. 2009AA032701)

* 通信联系人, E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

1 概 述

近年来人们对视频显示的畫面要求不断提高,不仅追求畫面的细腻,更为追求畫面的艳丽,这就要求显示设备能呈现色彩更为丰富的图像。为了能让显示设备展现更多更饱和的色彩,广色域显示成为了未来一个重要的发展方向。激光显示技术作为新一代的显示技术,具有其他显示方式无法比拟的显著优点:色域宽广、颜色饱和度高、寿命长、无有害电磁射线辐射等。因此,激光显示技术受到了越来越多的关注。激光显示采用激光作为光源,激光的单色性好、饱和度高,红、绿、蓝三基色激光位于色域图的边缘,这样就使得它所能覆盖的色域更大。但是正是由于激光单色性好的特性,使得在用激光进行投影的过程中会产生“散斑”现象,这种现象会极大地影响到激光电视画面的质量^[1-3]。

国内外学者们为了抑制散斑做出了很多努力,提出了很多抑制散斑的方法,如旋转光纤法、转动匀光棒法、震动屏幕法、多波长法和相位元件法等。但是都有各自的不足之处,如结构复杂、成本高、抑制散斑效果一般等^[4-5]。

本文通过对随机漫射体抑制散斑的原理进行分析,提出了转动“随机透镜阵列”抑制散斑的结构,这种结构具有实现方法简单、成本低、占用空间小、光能利用率高和抑制散斑效果好的特点。经过实验验证。可以将散斑对比度降低到 1.15%,在日常使用的条件下达到了人眼分辨不出散斑的水平。为激光显示提供了一种简单高效的抑制散斑的方式。

2 随机漫射体抑制散斑的原理

激光照射在一个用波长来度量是粗糙的表面(如投影屏幕)上时,激光会在空间上发生干涉,形成散斑。如果一个激光器发出的激光对物(如 LCD 芯片)照明,并且在它与激光器之间有一个运动的漫射体紧靠着它,漫射体的表面相对于光波来说是粗糙的。图 1 表示投影系统光路,图中(a)是一个普通投影系统,其中不包含漫射体,(b)是在投影系统当中加入了运动的漫射体。假设这

个运动的漫射体运动速度为 v ,并且沿某一方向转动。

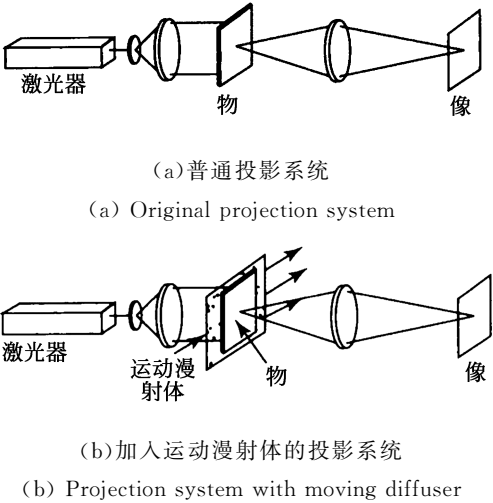


图 1 投影光学系统示意图
Fig. 1 Sketch of projection system

随着漫射体的不断地运动,照射在物上的每个点的光的位相也在不断的变化,于是对像上给定的任一点,物上对此像点有贡献的区域产生的振幅随机移动也在不断变化,此时对这个像点的各个贡献相位以复杂的方式随时间变化。随着时间推移,使像中任一点上的散斑强度随时间变化。在积分时间 T 内测量得到的强度是在多个独立的散斑的积分。如果在积分时间 T 内产生了 M 幅不同的散斑图样,那么根据 Goodman 的理论,散斑的对比度可以降低为 $1/\sqrt{M}$ ^[6-8]。

3 随机微透镜阵列抑制散斑结构

一般的漫射体由磨砂玻璃\彩色玻璃或者全息元件制造,在整个通光孔径里面由一个可重复均匀的平面构成,对发光区域内的亮度和形状只能进行有限的控制,因此导致入射光的利用率很低。在激光显示中,要同时考虑亮度的均匀性和光能的利用率,所以我们考虑用一种出射光亮度均匀的,并且有固定出射角度的漫射体。一种“随机微透镜阵列”可以实现如上要求。

这种“随机微透镜阵列”与磨砂玻璃、乳色玻璃和全息元件等随机漫射体有着很多的区别,“随机微透镜阵列”由许多不同的,单独的可控微透镜单元组成,可以对整个发光分布区域和光束质量进行控制。与此同时,微透镜分布还移除了零级

亮斑和出射光的衍射。图 2 展示了“随机微透镜阵列”在电子扫描显微镜下的图像。

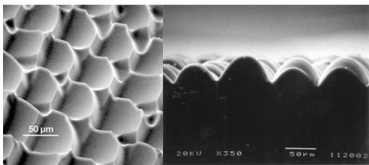


图 2 显微镜下“随机微透镜阵列”的结构
Fig. 2 Structure of the “random micro-lens array” under microscope

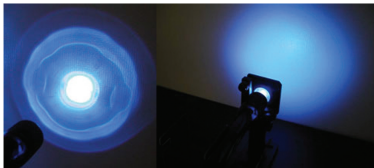


图 3 LED 手电直接照射和经过“随机微透镜阵列”后的效果对比
Fig. 3 Comparison between the light illuminated by the LED glim directly and through the “random micro-lens array”

图 3 为 LED 手电直接照射和经过“随机微透镜阵列”后的效果对比。经“随机微透镜阵列”后发出的光是具有一定发散角的,并在屏幕上形成均匀的光斑。

“随机微透镜阵列”的另外一个特点是可以提供特定的发散角,如图 4 所示。图 5 为 LED 手电经“随机微透镜阵列”后的亮度分布,其中右侧的红线为未经“随机微透镜阵列”的亮度分布,黑色的为经过“随机微透镜阵列”后的亮度分布,可见经过“随机微透镜阵列”后其能量分布均匀的分布在一定的发散角内。

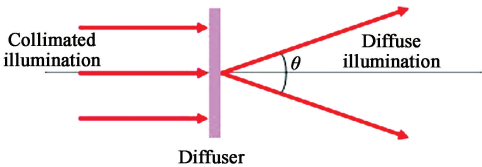


图 4 “随机微透镜阵列”的发散特性
Fig. 4 Diverge characteristic of the diffuser

与其他漫射体相比,“随机微透镜阵列”还有着更高的透射率,其透过率为 92%,我们对“随机微透镜阵列”的后表面镀可见光波段的增透膜,可以进一步将其透过率提高到 95%。所以这种随

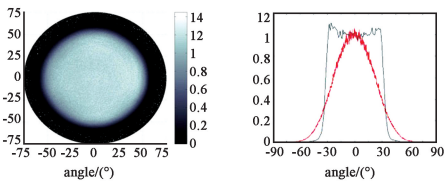


图 5 经“随机微透镜阵列”后 LED 手电亮度分布
Fig. 5 Light distribution of the LED glim after going through the “random micro-lens array”

机漫射体不但可以控制出射光的发散角度,在透过率方面的性能指标也比较出色,这样光能利用率可以有很大的提高,这对于激光显示中抑制散斑的应用可以说是非常完美的。

我们将半径为 35 mm 的圆形“随机微透镜阵列”固定在转动电机上,由电机带动其转动,结构如图 6 所示。



图 6 转动“随机微透镜阵列”结构
Fig. 6 Structure of rotating “random micro-lens array”

根据我们之前的分析,为了实现抑制散斑的效果,我们要求在人眼的曝光时间内,要求有 M 幅完全不同的散斑图样,这样散斑的对比度可以降低为 $1/\sqrt{M}$ 。

我们将由于激光光纤输出的光束经过扩束后到达“随机微透镜阵列”上的光斑为大小为一半径 4 mm 的圆形光斑。而在被照处的光斑中心与“随机微透镜阵列”转轴中心的半径为 30 mm,那么在被照光斑中心处,周长约为 189 mm。如果光斑在“随机微透镜阵列”上运动 1/10 个光斑半径视为产生一种不同的散斑图案,那么当“随机微透镜阵列”转动一周我们可以得到 473 幅完全不同的散斑图像。电机为 7 200 r/min,人眼的积分时间在 1/24 s,这样在人眼的积分时间内,电机转动 5 圈,一共产生 473×5 幅不同的散斑图像,不过事实上散斑图像的数目比这还要多,在这里我们只是做一个粗略的估计。那么根据我们估计的散斑图像的数目,从理论上来计算,散斑的对比度

可以降低到 $1/\sqrt{473\times5}=0.0205$ ，也就是 2.05%，而根据以往的经验，当在正常的距离下观看激光电视，散斑降低到 4% 以下，人眼便不易分辨出散斑，所以从我们的粗略估计，散斑的对比度已经降低到了一个人眼不易察觉的水平，在我们之后的测试中可以看出画面变得非常细腻，人眼完全观察不到散斑现象，而且散斑的对比度要比我们粗略估计的还要低。

4 散斑的测试

由于红、绿、蓝三基色的激光中两个或三个同时输出时，两个波长之间并不产生干涉现象，但是它们在一定区域内的光强会在屏幕上进行叠加，由一种波长产生的散斑的“暗点”有可能被另一种波长产生的散斑的“亮点”补充，从而削弱实际散斑的效果。所以要考察散斑的实际分布，我们只将单色的激光投影到屏幕上，这里我们用绿色激光进行测试^[9]。

测试步骤为：

- (1)将电脑连接激光电视，并输出一幅单一绿色的画面；
- (2)用相机对屏幕上的杂散斑图像进行拍摄；
- (3)然后用 Matlab 描绘杂散斑光强分布图，程序如下：

```
I=imread(* *.jpg);          %%%读取散斑图像
I=rgb2gray(I);              %%%将散斑图像转为灰度图像；
I=double(I);                %%%将 I 转为 double 格式
mesh(I)                      %%%绘制强度直方图
```

(4)计算散斑对比度，程序如下：

```
I=imread(* *.jpg);          %%%读取散斑图像
I=rgb2gray(I);              %%%将散斑图像转为灰度图像
I=double(I);                %%%将 I 转为 double 格式
C=std(I)/mean(I)            %%%计算散斑对比度
```

为了考察用“随机微透镜阵列”抑制散斑的效果，首先对未加入任何抑制散斑结构的激光电视进行测试，然后对加入转动匀光棒的激光电视进行测试，最后对加入转动“随机微透镜阵列”的激光电视进行散斑评价。

我们对未加入任何抑制散斑结构的散斑图样进行测试，拍摄图像如图 7 所示，可以看到，未加入任何抑制散斑结构的激光电视呈现的画面散斑严重且极为不均匀，令人难以接受。

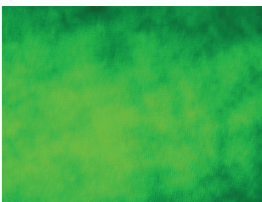


图 7 未经任何抑制散斑结构散斑图像
Fig. 7 Image of the speckle with no speckle reduction

经 Matlab 计算光强分布图如图 8 所示，散斑对比度为 17.46%，可以看出散斑对比度很高，通过人眼可以清楚地看出散斑效果。

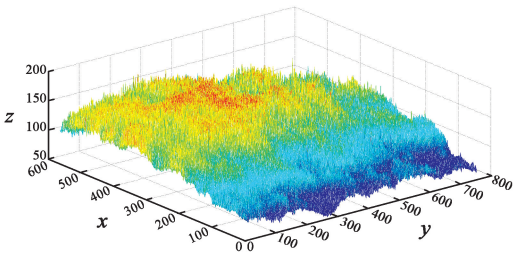


图 8 未经任何抑制散斑结构得到的光强分布
Fig. 8 Light intensity distribution of the speckle with no speckle reduction

下面将光学系统中加入转动匀光棒，考察加入转动匀光棒后抑制散斑的的效果。图 9 为拍摄的散斑图像。



图 9 加入转动匀光棒后的散斑图像
Fig. 9 Image of the speckle with rotating uniform light stick

经 Matlab 计算光强分布图如图 10 所示,经计算散斑对比度为 5.42%:

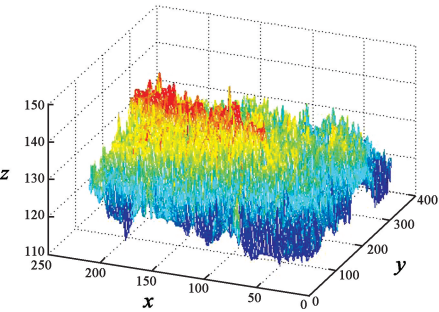


图 10 加入转动匀光棒后的散斑图像
Fig. 10 Light intensity distribution of the speckle with rotating uniform light stick

下面将光学系统中加入转动的“随机微透镜阵列”,并用 1/80 s 的曝光时间对散斑进行拍摄,这个曝光时间要比人眼的响应时间短很多,这样可以看出相对静态的散斑效果,散斑图像如图 11 所示。



图 11 加入转动“随机微透镜阵列”后用 1/80 s 的曝光时间拍摄的散斑图像
Fig. 11 Image of the speckle with rotating “random micro-lensarray” exposed in 1/80 s

经 Matlab 计算光强分布图如图 12 所示,经计算散斑对比度为 2.89%。

可以看出加入“随机微透镜阵列”后光强分布变得“平整”,同时散斑对比度降低到很低的水平。接下来我们用人眼的响应时间 1/30 s 的曝光时间来对散斑进行拍摄,从而考察实际应用当中也就是人眼所观察到的散斑的对比度,散斑图像如图 13 所示,可以看出由于拍摄曝光时间的增加,图像的亮度也有所增加,整体画面也相对均匀。

经 Matlab 计算光强分布图如图 14 所示,经计算散斑对比度为 1.15%:

所以加入转动“随机微透镜阵列”后散斑的对比度有极大的降低,通过对 1/80 s 曝光时间和 1/24 s 的曝光时间下两幅强度分布图的对比可以看

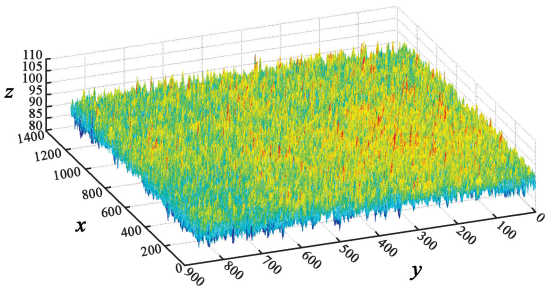


图 12 加入转动“随机微透镜阵列”后用 1/80 s 的曝光时间拍摄的光强分布
Fig. 12 Light intensity distribution of the speckle with rotating diffuser exposed in 1/80 s



图 13 加入转动“随机微透镜阵列”后用 1/24 s 的曝光时间拍摄的散斑图像
Fig. 13 Image of the speckle with rotating “random micro-lens array” exposed in 1/24 s

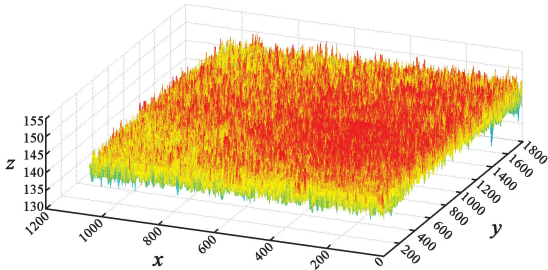


图 14 加入转动“随机微透镜阵列”后用 1/24 s 的曝光时间拍摄的光强分布
Fig. 14 Light intensity distribution of the speckle with rotating “random micro-lens array” exposed in 1/80 s

出:如果在相差这短时间内,在激光电视的屏幕上并没有形成很多幅不同的散斑图像,而是相对静态的散斑图样,随着积分时间的增加,光强强点会更强,光强弱点会更弱,这样散斑对比度会更大。但是实验的事实证明,散斑对比度有了显著地降低,同时通过两个数据我们可以发现,积分时间后者是前者的 3 倍,而散斑对比度也下降到接近原来的 1/3。由此可以推断在 3 倍的时间内,屏幕上产

生了 3 倍不同的散斑图像,从而使散斑对比度降低。这也是对我们之前的理论分析的肯定。

5 结 论

利用转动“随机微透镜阵列”的结构可以将散

斑对比度降低到 1.15%,抑制散斑达到人眼无法分辨的水平,解决了长期以来激光散斑对激光电视成像质量的影响,与此同时由于这种结构小巧,不会占用整个光学系统很大的空间,且光能利用率高、运行稳定、无风险,这也给今后激光电视的小型化带来了福音。

参 考 文 献:

[1] 康玉思,刘伟奇,冯睿,等. 激光电视的消干涉[J]. 中国激光, 2009, 35(4): 615-619.
Kang Y S, Liu W Q, Feng R, *et al.* Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2):153-156. (in Chinese)

[2] 李霞,康玉思. 激光显示中散斑噪声的抑制[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 648-651.
Li X, Kang Y S. Speckle contrast reduction in laser display[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 31(4): 648-651. (in Chinese)

[3] 贾琼瑶,贺锋涛. 激光投影显示中散斑均化问题的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 400-403.
Jia Q Y, He F T. Speckle homogenization in laser projection display [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 400-403. (in Chinese)

[4] 张岳,郝丽,柳华,等. 激光显示的原理与实现[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 402-405.
Zhang Y, Hao L, Liu H, *et al.* Principle and realization of laser display technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 402-405. (in Chinese)

[5] 田志辉,刘伟奇,李霞,等. 激光显示中散斑的减弱[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9): 1366-1370.
Tian Z H, Liu W Q, Li X, *et al.* Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1366-1370. (in Chinese)

[6] Seime L, Hardeberg J Y. Colorimetric characterization of LCD and DLP projection displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2003, 11(2): 349-358.

[7] Goodman J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Roberts and Company Publishers, 2007.

[8] Françon M. *Laser Speckle and Applications in Optics* [M]. Elsevier, 2012.

[9] Baribeau R, Rioux M. Influence of speckle on laser range finders [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(20): 2873-2878.

作者简介:付瀚毅(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光学设计,光学检测等方面的研究。E-mail:fu_hanyi@163.com

刘伟奇(1958—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事 193 光刻中用于光学检测的点衍射干涉仪和菲索干涉仪制造方面的研究。E-mail:liuwq@ciomp.ac.cn