

文章编号:1004-4213(2011)08-1211-4

利用振动光纤减弱激光散斑的研究

王丽娟, 邱怡申, 陈怀熹, 李高明

(福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室; 福建省光子技术重点实验室, 福州 350007)

摘 要:在激光投影显示技术中,引入振动光纤的方法能够以较小的能量损失减弱激光散斑.本文利用广义范西特-泽尼克定理对激光投影显示中采用振动光纤抑制散斑做了理论分析.结果表明,散斑衬比度的大小取决于光纤的模式数和投影系统的光瞳大小,对于相同大小的像面,收集更多的光纤模式数和增大孔径均可减弱散斑衬比度.用两种不同的多模光纤所做的对比实验定性证实了这一结论.研究结果对光纤的选择和投影系统的设计有一定的指导意义.

关键词:激光投影显示; 散斑; 对比度; 光纤; 模式数

中图分类号: TN27; TN911.73

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1211

0 引言

近年来,随着激光投影显示技术的发展,减弱激光散斑的实用技术成了业界急需解决的问题.国内外科技工作者曾经提出过数十种降低衬比度的实验方法,如采用不同波长光源照明^[1]、振动屏幕^[2]、运动位相片^[3-4]、振动光纤^[5]、液晶调制^[6]等,但从减弱散斑的效果与光能利用的矛盾,以及增加结构的复杂等因素考虑,实用的方法并不多.引入振动光纤的方法有利于激光的传输且引起的能量损失小.通过振动光纤改变激光光束出射角度和各个模式结构,使得各个模式间的位相差随时间随机变化,接收屏幕上获得随时间变化的“沸腾”式的散斑图案.由于人眼的视觉滞留效应,多幅散斑图样的强度叠加会使得散斑衬比度降低.因此振动光纤是一种减弱激光散斑的有效方法.

对于运动位相体和振动光纤的理论和实验研究已有不少报道^[3-5],在以往的理论研究中,多数是将物面的照明看成是非相干的,便于采用范西特-泽尼克定理研究随机场在光学系统的传播,由此得到像面上的相干面积由投影系统点扩展函数决定的结论.然而,实际投影系统均有数十倍的放大率,物面上的相关尺度经放大到成像面往往与点扩展函数面积可比拟,此时将物面视为 δ 相关是错误的,因此将物面看成有一定相关面积的光源才是更普遍的情况.本文采用广义范西特-泽尼克定理对激光投影显

示中采用振动光纤抑制散斑做了理论分析.结果表明,散斑衬比度的大小取决于光纤的模式数和投影系统的光瞳大小,对于相同大小的像面,收集更多的光纤模式数和增大孔径均可减弱散斑衬比度.分别采用两种不同模式的光纤做了对比实验,定性地证实了这一结论.这一结果对光纤的选择和投影系统的设计有一定的指导意义.

1 振动光纤降低散斑衬比度原理

多模光纤支持众多不同相速度的传输模式,根据射线光学不同模式的光线是以与光纤轴成不同角度传播.由于光线的传输角度不同,它们传播的距离也不同,结果它们从光导纤维输入端到输出端会受到不同的相位延迟.光纤输出端面任意一点上的光,都由大量独立的模式相干叠加总和组成.在光纤输出面上的光强分布中就会看到结构明显的散斑干涉现象.

如图 1 所示,激光耦合进通过电机振动的光纤中

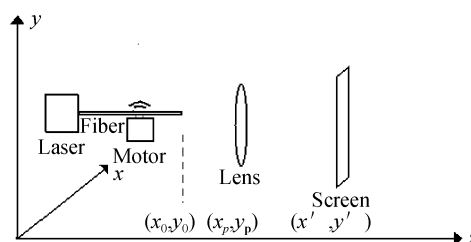


图 1 振动光纤抑制散斑

Fig. 1 Speckle reduction with shaking fiber

基金项目:福建省区域重大项目微型共性技术研发(No. 2009H4003)资助

第一作者:王丽娟(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光微型投影中散斑的减弱. Email:lijuanwangpoet@163.com

导师(通讯作者):邱怡申(1954-),男,教授,主要研究方向为激光微型投影中散斑的减弱. Email:ysqiu@fjnu.edu.cn

收稿日期:2011-01-05;修回日期:2011-04-27

进行扩束,扩束后的激光束照射在透镜(x_p, y_p)上,最后由透镜成像后放大投影到屏幕(x', y')上.以下分析假定:1)从光纤端面出射光场分布是准均匀的,即散斑尺寸远小于光的横向尺度;2)光场在空间是广义平稳的高斯随机分布;3)整个光纤纤芯断面上散斑相关元胞的数目等于光纤中传播的模式数目,这对于阶跃光纤是一个合理的近似^[7-8].

散斑场在光场平面上任意两点(x_1, y_1)、(x_2, y_2)上的强度自相关函数为

$$\Gamma_I(\Delta x, \Delta y) = \langle I(x_1, y_1) I(x_2, y_2) \rangle \quad (1)$$

复相关度定义为

$$\mu_I(\Delta x, \Delta y) = \frac{\Gamma_I(\Delta x, \Delta y)}{\Gamma_I(0, 0)} = |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 \quad (2)$$

式中 $\mu_A(\Delta x, \Delta y)$ 是振幅相关度

$$\mu_A(\Delta x, \Delta y) = \frac{\langle A(\Delta x_1, \Delta y_1) A^*(\Delta x_2, \Delta y_2) \rangle}{I_0(x, y)} \quad (3)$$

式(2)中的第二等式利用了高斯随机分布的假设.散斑相关面积 A_a 由强度相关尺度衡量,即

$$A_a = \iint_{\infty} |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y \quad (4)$$

根据广义范西特-泽尼克定理,投射在光瞳面上的强度是物面复相关度的傅里叶变换

$$I(x_p, y_p) \propto \text{FT}\{\mu_A(\Delta x_0, \Delta y_0)\} \quad (5)$$

屏幕即成像面上的复相干度求法可再次利用广义范西特-泽尼克定理,即复相干度是光瞳出射光强的傅里叶变换

$$\begin{aligned} \mu_A(\Delta x', \Delta y') &= \text{FT}\{I(x_p, y_p) \cdot P(x_p, y_p)\} = \\ &= \text{FT}\{I(x_p, y_p)\}_{(f_{x_p} = \frac{\Delta x'}{\lambda z}, f_{y_p} = \frac{\Delta y'}{\lambda z})} * \\ &= \text{FT}\{P(x_p, y_p)\}_{(f_{x_p} = \frac{\Delta x'}{\lambda z}, f_{y_p} = \frac{\Delta y'}{\lambda z})} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $*$ 是卷积运算, k 为投影镜头放大倍数, Z 为透镜到屏幕的距离, $P(x_p, y_p)$ 为光瞳函数.对直径为 D 的圆光瞳有

$$P(x_p, y_p) = \text{circ}\left(\frac{r}{D/2}\right) \quad (7)$$

$$\text{FT}\{P(x_p, y_p)\} = \frac{J_1\left(\frac{\pi D r}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z}} \quad (8)$$

式中 $r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$.

考虑到倒像系统,将式(8)和(5)代入式(6)得

$$\mu_A(\Delta x', \Delta y') = \mu_A\left(\frac{\Delta x'}{k}, \frac{\Delta y'}{k}\right) * \frac{J_1\left(\frac{\pi D r}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z}} \quad (9)$$

于是入射屏幕上的散斑面积是

$$A'_a = \iint_{\infty} |\mu_A(\Delta x', \Delta y')|^2 d\Delta x' d\Delta y' \quad (10)$$

假设屏幕被均匀照明.于是当用人眼或带有成像系统 CCD 探测时,在成像系统的振幅点扩展函数等效

面积 A_k 内含有的散斑个数为

$$N = A_k / A'_a \quad (11)$$

当光纤静止时,只要色散可忽略(显示系统通常用短光纤),出射光的相干性不会变化,即整个成像面都是相干照明的,检测器接收到的 N 种散斑结构完全相干,此时的衬比度大,人眼看到的散斑除了光纤所造成的一次散斑外,还有屏幕产生的二次散斑;当光纤振动时,屏幕上不同散斑之间的相位差随时间随机变化,物面(光纤出射端)上和像面上分别变成相干面积不超过 A_a 和 A'_a 的部分相干光(证明见附录 A),检测器探测的二次散斑的衬比度为

$$C \propto \sqrt{A_a / A'_a} \quad (12)$$

由式(9)、(10)、(12)得到,当给定成像面大小后,光瞳直径 D 增大,则衍射爱里斑面积减小从而导致 A'_a 减小,即衬比度也减小.当经过投影系统放大后的物面相关面积远大于衍射爱里斑面积时,卷积结果由前者决定,反之由后者决定.由此可见,降低散斑衬比度可通过使系统收集更多的光纤模式数,或增大光瞳直径来实现.

2 实验结果及分析

验证模式数对消散斑的影响的实验装置如图2和图3.实验中光源采用635 nm红光激光器,光纤分别采用型号为A1a的多模阶跃式石英光纤(纤芯直径50 μm 、数值孔径0.200)和多模阶跃式PMMA单芯塑料光纤(纤芯直径1 mm 数值孔径0.5),根据所选用的光纤参量,由式(13)计算模式数^[9]

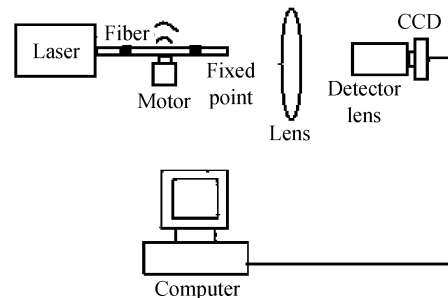
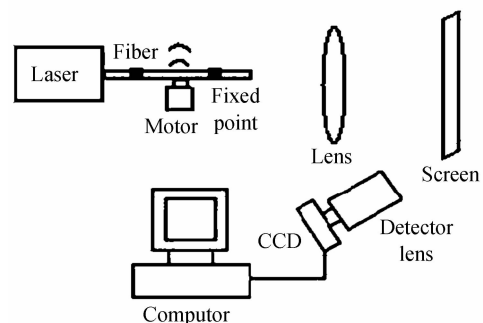


图2 一次散斑测量实验装置

Fig. 2 Experiment setup of the first speckle measurement



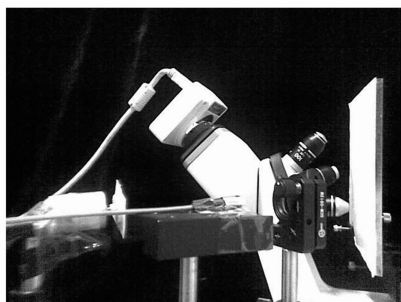


图3 二次散斑测量实验装置

Fig. 3 Experiment setup of the second speckle measurement

$$M \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} (NA)a \quad (13)$$

式中, a 是纤芯半径, λ_0 是光在空气中的波长, NA 是光纤的数值孔径. 由式(13)计算得玻璃光纤的模式数约为 49, 塑料光纤的模式数约为 2 472.

将激光分别耦合进通过电机振动的塑料光纤或石英光纤中进行扩束, 扩束后的激光光束通过透镜投影到屏幕上. 将光瞳调大使光能全部通过光瞳, 则光瞳对衬比度不产生影响. 探测器采用日本 NIKON 尼康正置生物显微镜将激光散斑图样成像到 CCD 上. CCD 分别位于图 2 所示位置拍下一次散斑图像, 图 3 所示位置拍下由屏幕散射的二次散斑图像, 采集进电脑. 通过 Matlab 软件处理, 得到激光散斑的光强分布和对比度大小.

图 4 为玻璃光纤作用下, 用 CCD 相机拍下的一次散斑图像. 图 5 为石英光纤作用下, 用 CCD 相机拍下的二次散斑图像.

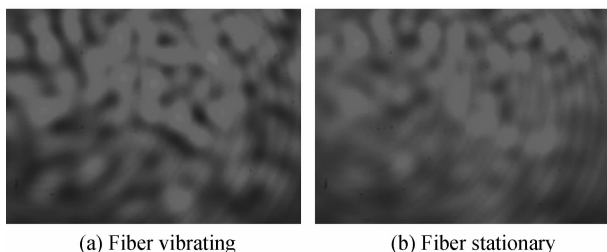


图4 石英光纤一次散斑

Fig. 4 The first speckle of glass fiber

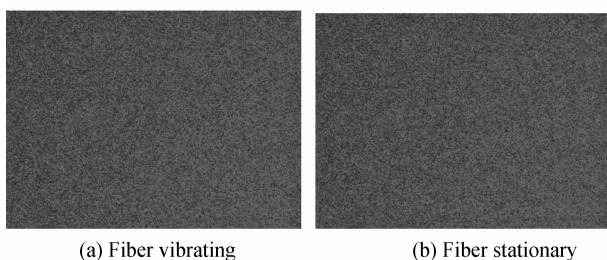


图5 石英光纤二次散斑

Fig. 5 The second speckle of glass fiber

图 6 为塑料光纤作用下, 用 CCD 相机拍下的一次散斑图像, 图 7 为塑料光纤作用下, 用 CCD 相机拍下的二次散斑图像.

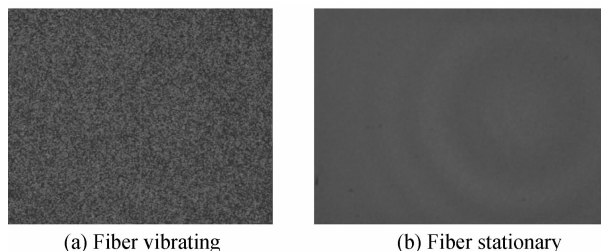


图6 塑料光纤一次散斑

Fig. 6 The first speckle of plastic fiber

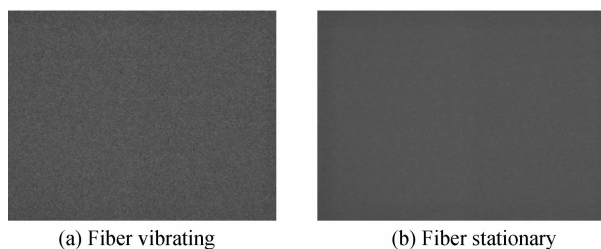


图7 塑料光纤二次散斑

Fig. 7 The second speckle of plastic fiber

利用 Matlab 软件分别将以上彩色图像转换为灰度图像, 并用该软件处理灰度图像, 得到的衬比度如表 1.

表1 衬比度/(%)

Table 1 Speckle contrast/(%)

	Quartz fiber(contrast)		Plastic fiber(contrast)	
	First speckle	Secondary speckle	First speckle	Secondary speckle
Fiber static	44.7%	28.0%	29%	8.3%
Fiber vibration	33.3%	27.2%	4.9%	3.4%

对照表 1 和图 4~7 可以看出, 在振动光纤作用下一次散斑衬比度均下降, 这是由于一次散斑面积 A_a' 在人眼响应时间内被部分地均匀化. 二次散斑在石英光纤作用下衬比度在振动光纤时几乎没有变化. 而在塑料光纤作用下, 二次散斑在振动光纤作用下衬比度有明显降低. 其原因是, 对于石英光纤, 一次散斑颗粒面积 A_a' 大到与探测器点扩展函数等效面积 A_k 可比拟, 所以抖动光纤几乎不改变二次散斑衬比度 C (见图 5), 至于塑料光纤, 一次散斑颗粒面积远小于探测器点扩展函数等效面积, 由散斑衬比度降低明显 (见图 7). 所有实验结果与式(12) $C \propto \sqrt{A_a/A_k}$ 的结论一致.

利用 Matlab 软件分别将图 5(b) 和图 7(b) 转化为灰度图并用该软件处理灰度图像到如图 8 所示的强度分布图.

图 8(a) 为石英光纤时二次散斑光强分布情况, 图 8(b) 为塑料光纤时的二次散斑光强分布情况.

由此可见, 在相同成像面下, 选择模式数多的光纤对激光散斑的减弱是十分有效的, 当然, 模式数的多少会对投影系统的视场和 F 数的设计提出不同

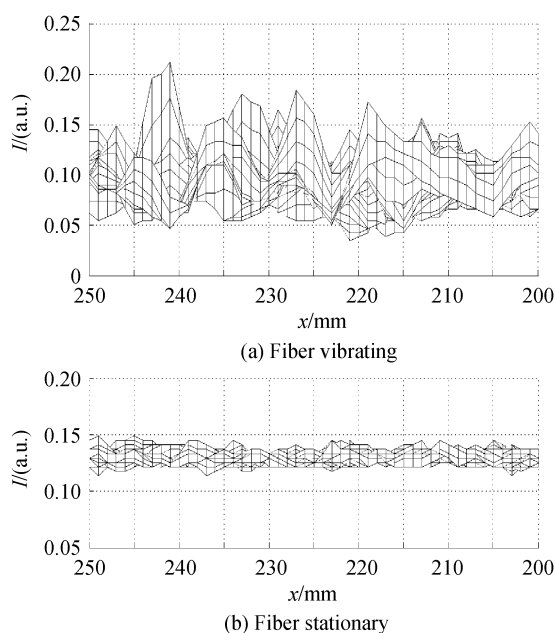


图 8 光强分布
Fig. 8 Intensity distribution

的要求,因此本文的工作对激光投影显示系统的设计有一定的参考.

3 结论

本文将物面看成有一定相关面积的光源,采用广义范西特-泽尼克定理对激光投影显示中采用振动光纤抑制散斑做了理论分析.结果表明,散斑衬比度的大小取决于光纤的模式数和投影系统的光瞳

大小,对于相同大小的像面,收集更多的光纤模式数和增大孔径均可减弱散斑衬比度.

参考文献

- [1] GEORGE N, JIAN A. Speckle reduction using multiple tones of illumination [J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(6): 1202-1212.
- [2] RAWSON E G, NAFARRSTE A B, NORTON R E, *et al.* Goodman speckle-free rear-projection screen using tow close screens in slow relation motion[J]. *JOSA*, 1976, **66**(11): 1290-1294.
- [3] TRISNADI J I. Hadamard speckle contrast reduction [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(1): 11-13.
- [4] WANG L, TSCHUDI T, HALLDÖRSSON T, *et al.* Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(10): 1770-1775.
- [5] LI Xia, LIU Wei-qi. Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2008, **23**(2): 153-156.
李霞,刘伟奇.激光显示中散斑对比度的降低[J]. *液晶与显示*, 2008,**22**(2):153-156.
- [6] KIEMLE T H, WOLFF U. Application de cristaux liquides en holographie optique [J]. *Optics Communication*, 1971, **3**(1): 26-28.
- [7] GOODMAN J W, RAWSON E G. Statistics of modal noise in fibers; A case of constrained speckle [J]. *Optics Letters*, 1981, **6**(7): 324-326.
- [8] TREMBLAY Y, KAWASAKI B S, HILL K O. Modal noise in optical fibers; Open and closed speckle pattern regimes[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**: 1652-1655.
- [9] SENIOR J M. *Optical fiber communications*[M]. 2nd ed. NJ: Pearson Education, Upper Saddle River, 1992.
- [10] GOODMAN J W. *Speckle phenomena in optics theory and applications* [M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2006.

Analysis of Speckle Reduction by the Vibrating Fiber

WANG Li-juan, QIU Yi-shen, CHEN Huai-xi, LI Gao-ming

(Key Laboratory of OptoElectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education);
Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In the laser projection displays technology, The method by vibrating the fiber can effectively suppress the speckle and reduce the light loss. Generalized van Cittert - Zernike theorem was used in the theoretical analysis of speckle reduction in the laser projection display, where the vibrating fiber was used as speckle reduction approach. The results show that the speckle contrast depends on number of optical fiber model and the projection system pupil size. For the same size of the image plane, more models of multimode fibers should be collected and pupil diameter of projection system should be enlarged in order to reduce speckle contrast. In the projection system, the comparison experiment using two different multimode fibers were carried out and the results confirmed this conclusion qualitatively. This result provides a guidance for choosing the fiber production program and designing the illumination mode.

Key words: Laser projection display; Contrast; Speckle; Fiber; Mode