角度多样性激光散斑抑制方法的比较

徐美芳[1],丁俊文[2],王冠军[1],张秀丽[2],赵英亮[2]

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心,山西 太原 030051;
2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 & 电子测试技术重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要: 根据成像原理推导了运动透镜、运动 45°直角棱镜, 以及旋转反射镜所引起的角度变化公式,并对影响角度变化的参数(透镜的焦距、物距及光源的发散角等)和引入角度多样性的这三种方法进行了分析比较。实验结果与理论分析表明,在相同条件下,将 45°直角棱镜运动 20 μm 和反射镜旋转 0.02°就能实现两个完全独立散斑图样,而运动透镜需要更大的位移,这为设计运动方案引入角度多样性激光散斑抑制提供参考。

关键词: 激光散斑; 散斑抑制; 角度多样性; 散斑对比度

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0806004

Comparison of laser speckle suppression due to angle diversity

Xu Meifang[1], Ding Junwen[2], Wang Guanjun[1], Zhang Xiuli[2], Zhao Yingliang[2]

(1. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement & Electronic Measurement Technology, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Angle variation formula of illumination, which is induced by moving lens, or moving retroreflecting right-angle prism, or rotating mirror, was derived according to imaging principle. The extent of the angle change of illumination depends on three parameters, such as focal length of the lens, object distance, and divergence angle of light source. The three methods introducing angle diversity were compared. The experimental results are consistent with the theoretical analysis. The results demonstrate that 20 μm displacement for the retro-reflecting right-angle prism and 0.02° of rotating angle for the mirror can easily achieve two completely independent speckle patterns under the same conditions, which provides a basis to design a motion scheme introducing angle diversity to suppress laser speckle.

Key words: laser speckle; speckle suppression; angle diversity; speckle contrast

收稿日期: 2016-12-05; **修订日期:** 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(61471325,61405127);山西省科技攻关项目(20140321002-02);
山西省自然科学基金(2014021023-1)

作者简介: 徐美芳(1974-),女,副教授,博士,主要从事激光投影显示系统和激光散斑抑制等方面的研究。Email:xmf0129@nuc.edu.cn

0 引 言

激光由于其高亮度、单色性、方向性而在显示领域中具有无可比拟的优势[1]。然而,激光的相干性使其经粗糙表面漫反射或透射之后会形成散斑,散斑的存在严重影响着图像显示质量,阻碍观察者从图像中提取有用信息。因此,有效抑制激光散斑是激光显示技术领域研究的热点。

大量国内外文献都是基于叠加不相关和统计独立散斑图样的散斑抑制原理,在光强上进行空间或时间积分平均实现散斑抑制,如偏振多样性、角度多样性和波长多样性。参考文献[2-3]表明,通过偏振多样性最多能将散斑对比度降至原来的 1/2 倍;受激光带宽的限制,采用波长多样性也只能将散斑对比度减小到原来的$\sqrt{\delta\lambda/\Delta\lambda}$倍,其中,$\delta\lambda$ 为两列激光束的波长差,$\Delta\lambda$ 是激光束的谱宽,这两种情况都很难达到较高的散斑抑制。于是,通过各种机械振动或旋转光学元件实现角度多样性的散斑抑制方法应运而生,有旋转散射片[4]或新型散射体[5]、振动多模光纤[6]、振动屏幕[7]、振动衍射光学元件[8]、振动透镜或透镜阵列[9]、平移 45°直角棱镜[10]、高频振动扫描微镜[11]等。尽管各种方法效果不尽相同,但它们均是通过改变入射到屏幕上的照明方向,使散斑图样发生变化,在强度基础上叠加这些散斑图样,从而实现了观察图像中散斑的降低。

文中从入射角度变化的范围和影响入射角度变化的因素着手,理论上分析了光源部分通过运动透镜、反射镜和 45°直角棱镜引入角度多样性实现激光散斑抑制的效果,并通过仿真研究了影响角度多样性原理应用的关键参数。

1 角度多样性散斑抑制原理

散斑图样强度的变化取决于观察屏上有效表面粗糙度受照明光方向的变化。当照明角度改变 $\Delta\theta$ 时,在观察屏上获得的两个散斑图样的强度协方差由下式给出[2]:

$$|\mu_A(\vec{q}_1,\vec{q}_2)|^2=|M_h(\Delta q_z)|^2|\psi(\Delta\vec{q}_t)|^2 \tag{1}$$

式中:$M_h(\Delta q_z)$为表面高度涨落 h 的一阶特征函数,取决于表面高度涨落的均方根与波长之比;$\psi(\Delta\vec{q}_t)$表示入射或观察角变化时散斑图样的平移。其中照明光因表面散射而产生的相移为 $\phi(\alpha,\beta)=q_z h(\alpha,\beta)$。下面就透射光路分两种情况讨论。

(1) 在自由空间传播透射光路中,$\psi(\Delta\vec{q}_t)$由下式给出:

$$\psi(\Delta\vec{q}_t)=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int I(\alpha,\beta)\exp(-j\Delta\vec{q}_t\cdot\vec{\alpha}_t)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta}{\int_{-\infty}^{\infty}\int |I(\alpha,\beta)|^2\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta} \tag{2}$$

式中:$I(\alpha,\beta)$为散射光斑上的强度分布;$\alpha_t=(\alpha,\beta)$为散射表面上的横坐标;$\Delta\vec{q}_t$ 为散射矢量差的横向分量;Δq_z 为同一矢量差的法向分量的大小,固定在法线方向观察的情况下,由下式给出:

$$\Delta q_t=k[\sin(\theta_i+\Delta\theta)-\sin\theta_i] \tag{3}$$

$$\Delta q_z=k|\sqrt{n^2-\sin^2(\theta_i+\Delta\theta)}-\sqrt{n^2-\sin^2\theta_i}| \tag{4}$$

式中:$k=2\pi/\lambda$ 表示照明光束中的平均波矢的长度,λ 为入射波波长;n 为透射表面的折射率。

对一个高度涨落 h 为高斯分布的散射表面:

$$|M_h(\Delta q_z)|^2=\exp(-\sigma_h^2\Delta q_z^2) \tag{5}$$

式中:σ_h 为表面高度涨落的标准偏差。

若散射光斑是直径为 D 的亮度均匀的圆,那么公式(2)简化为:

$$|\psi(\Delta\vec{q}_t)|^2=\left[2\frac{J_1(D\Delta q_t/2)}{D\Delta q_t/2}\right]^2 \tag{6}$$

将公式(5)~(6)代入公式(1)中,发现归一化强度协方差 μ_A 主要取决于两个散斑图样的平移因子$|\psi|^2$。

(2) 在透射成像光路中,成像平面(x,y)上散斑相关的横向宽度主要取决于成像系统的光瞳函数 $P(\xi,\eta)$的归一化傅里叶变换的大小的平方。

$$\psi(\Delta x,\Delta y)=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int |P(\xi,\eta)|^2\exp\left(-j\frac{k}{z}(\xi\Delta x+\eta\Delta y)\right)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta}{\int_{-\infty}^{\infty}\int |P(\xi,\eta)|^2\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta} \tag{7}$$

对于光阑孔径为 D 的均匀灵敏度的探测器,公式(7)简化为:

$$|\psi(\Delta x,\Delta y)|^2=\left[2\frac{J_1\left(\frac{kDr}{2z}\right)}{\frac{kDr}{2z}}\right]^2 \tag{8}$$

式中:$r=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2}$;$z$ 为从入射光瞳到物平面的距离。

将公式(5)和公式(8)代入公式(1)中,发现归一

化强度协方差 μ_A 主要取决于有效表面高度涨落因子 $M_h(\Delta q_z)$，也就是入射角的变化引起有效表面高度涨落的改变，从而使像平面上获得的归一化强度协方差 μ_A 发生变化，而改变有效表面高度涨落对散斑的横向宽度没有显著影响。

2 由运动机制引入角度多样性

2.1 沿光轴或垂直于光轴方向运动透镜

如图 1 所示，当焦距为 f 的透镜未运动前，发散角为 α 的激光光源 O 经透镜成像于像平面 A 上 O' 点，物距和像距分别为 d_1，d_2，像方孔径角为 θ；透镜沿光轴方向向左运动距离 d 后，光源 O 经透镜成像于像平面 B 上 O''点，此时物距和像距分别为 d_1'，d_2'，像方孔径角为 θ'，此时在接收平面 A 光束角度变化为 $\Delta\theta_1$，光斑面积变化为 ΔS，其中箭头所指方向为运动方向，M 平面为焦平面。

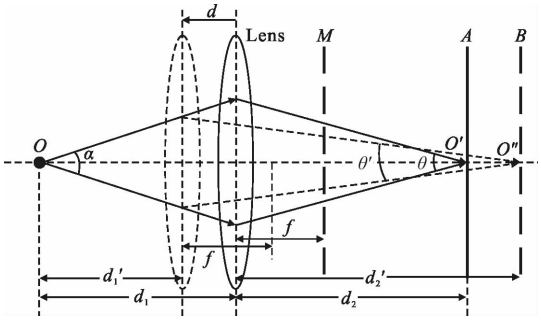

图 1 透镜沿光轴运动光路图

Fig.1 Schematic of moving a lens along the optical axis

根据共轭成像系统中角放大率公式有：

$$\frac{\tan(\theta/2)}{\tan(\alpha/2)}=\frac{d_1}{d_2},\ \frac{\tan(\theta'/2)}{\tan(\alpha/2)}=\frac{d_1^1}{d_2^1} \tag{9}$$

根据高斯公式有：

$$\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}=\frac{1}{f},\ \frac{1}{d_1'}+\frac{1}{d_2'}=\frac{1}{f} \tag{10}$$

由公式(11)和(12)有：

$$d_2=\frac{d_1 f}{d_1-f},\ d_2'=\frac{(d_1-d)f}{d_1-d-f}$$

$$\theta=2\arctan\left(\frac{d_1-f}{f}\tan(\alpha/2)\right) \tag{11}$$

$$\theta'=2\arctan\left(\frac{d_1-d-f}{f}\tan(\alpha/2)\right) \tag{12}$$

则运动前后角度变化为：

$$\Delta\theta_1=|\theta'-\theta|=2\left|\arctan\left(\frac{d_1-d-f}{f}\tan(\alpha/2)\right)-\arctan\left(\frac{d_1-f}{f}\tan(\alpha/2)\right)\right| \tag{13}$$

同理，当透镜沿垂直于光轴方向运动距离 d 时(如图 2)，根据成像原理可得，光源 O 经透镜成像后的像点 O'在像平面 A 上以 $\Delta d=d_1 d/(d_1-f)$进行扫描，运动前后角度变化为：

$$\Delta\theta_2=|\theta'-\theta|=2\left|\arctan\left(\frac{dd_1+d_1(d_1-f)\tan(\alpha/2)}{d_1 f}\right)-\arctan\left(\frac{d_1-f}{d_1}\tan(\alpha/2)\right)\right| \tag{14}$$

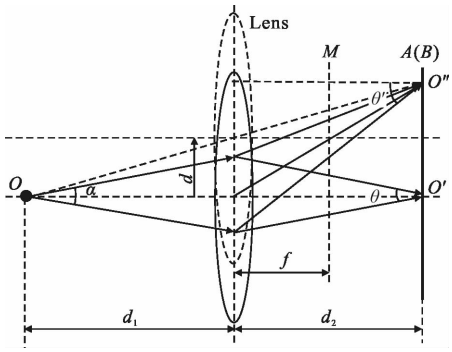

图 2 透镜沿垂直于光轴方向运动光路图

Fig.2 Schematic of moving a lens perpendicular to the optical axis

2.2 旋转反射镜

当反射镜以$\pm\theta_0$角沿光轴绕其中心旋转时，光束经反射镜反射后的扫描角为 $4\theta_0$，入射至反射镜中心 O 点处的光束经透镜成像后将其收集于像平面 A 上的 O'点，此过程中光束在 A 平面上的角度变化为 $\Delta\theta_3$，如图 3 所示。根据成像原理可知：

$$\Delta\theta_3=\arctan\left(\frac{f}{d_1-f}\tan(4\theta_0)\right) \tag{15}$$

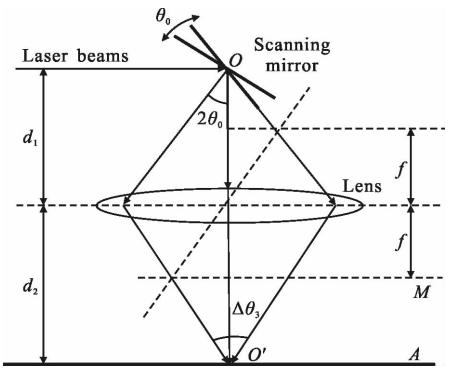

图 3 以 O 为中心旋转反射镜光路图

Fig.3 Schematic of rotating a mirror at O point as a center

2.3 沿垂直于光轴方向振动斜面为反光面的 45°直角棱镜

当斜面为反光面的 45°直角棱镜未运动前，激光光束入射至其反光面上被反射，然后沿主光轴传播；当 45°直角棱镜沿垂直光轴方向上下运动时，经准直的激光光束被直角棱镜的反射面反射后始终平行于光轴传播。传播中的光束由透镜收集于焦平面M上的焦点 F 处，所以棱镜的运动不改变光路，见图 4。运动距离 d 与接收平面 M 上的扫描角 $\Delta\theta_4$ 的关系为：

$$\Delta\theta_4=2\arctan\left(\frac{d}{f}\right) \tag{16}$$

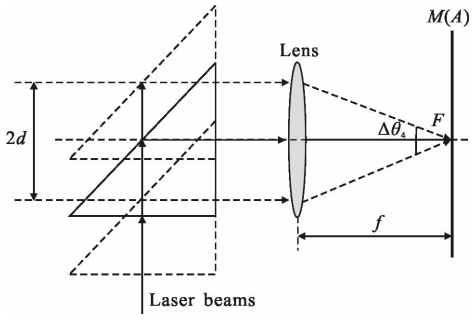

图 4 斜面为反光面的 45°直角棱镜沿光轴平移光路图

Fig.4 Schematic of translating a retroreflecting 45° right-angle prism along the optical axis

3 仿真分析

根据角度多样性激光散斑抑制理论，在自由空间传播透射光路中，产生两个完全独立的散斑图样需照射到散射片上的角度变化 $\Delta\theta$，可根据公式(1)计算得到。有效表面高度涨落因子 $M_h(\Delta q_z)$可通过公式(5)强度相关降至 $1/e^2$ 的条件得到：

$$\sigma_h^2\Delta q_z^2=2 \tag{17}$$

两个散斑图样的平移因子$|\psi|^2$可通过公式(6)中函数的第一个零点出现处得到，即一阶 Bessel 函数的第一个零点出现在幅角为 1.22π 处。

$$D\Delta q_t/2=1.22\pi \tag{18}$$

对于散射表面粗糙度为 σ_h=100 μm，散射光斑直径 D=0.5 mm，以 θ_i=0 正入射，透射面的折射率 n=1.5，代入公式(17)中有 $\sigma_h^2(k|\sqrt{n^2-\sin^2\theta}-n|)$，得 $\Delta\theta$=3.438°；代入公式(18)中有 $Dk\sin(\Delta\theta)/2=1.22\pi$，得 $\Delta\theta$=0.074°。

由公式(13)~(16)可知，角度变化除了和运动距离或旋转角度有关外，还受透镜焦距、物距以及光源自身特点，如发散角的影响。权衡这四种方法受透镜焦距及物距影响的程度，仿真中采用焦距为f=25 mm 的透镜实现运动或收集来自旋转反射镜和运动 45°直角棱镜的光束。对于物距 d_1=40 mm，发散角分别为 α=1°和 12.8°的光源，由公式 13、14、16 得透镜和 45°直角棱镜运动距离与角度变化之间的关系如图 5 所示，其中“·”，“*”和“o”分别表示沿光轴运动透镜、沿垂直于光轴方向运动透镜以及 45°直角棱镜时的结果。由公式(15)得反射镜旋转角度与角度变化之间的关系如图 6 所示。由图 5 和图 6 的结果表示，

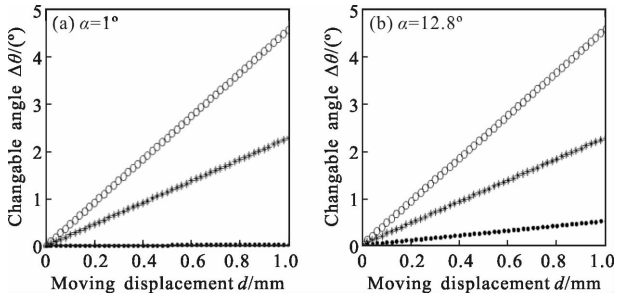

图 5 运动距离 d 与光束在接收面上的角度变化 $\Delta\theta$ 的关系

Fig.5 Moving displacement d vs angle change $\Delta\theta$ of light on the receiving plane

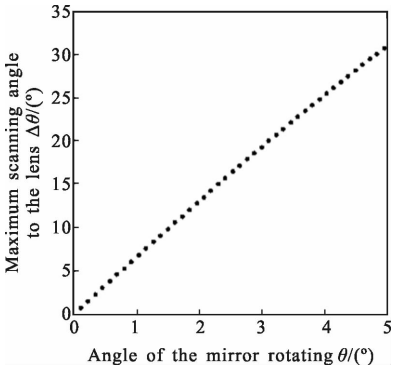

图 6 反射镜的旋转角度与光束在成像面上的角度变化 $\Delta\theta$ 的关系

Fig.6 Rotating angle of the reflecting mirror vs the angle change $\Delta\theta$ of light on the imaging plane

对于发散角为 1°的光源，采用这四种方式要产生两个完全独立的散斑图样，沿光轴方向运动透镜很难达到，因为 1 mm 的位移只能产生 0.04°的角度变化，而沿垂直于光轴方向只需要运动透镜 35 μm、45°直角棱镜 17 μm、反射镜仅需旋转 0.012°就能实现角度变化 $\Delta\theta$=0.074°；较大发散角的光源对沿垂直光轴方

向运动的透镜、45°直角棱镜和旋转反射镜进一步改变角度不明显，但对沿光轴方向运动的透镜影响显著，此时，透镜只需运动 0.15 mm，就能达到获得两个统计完成独立的散斑图样的角度变化条件。

根据上述分析可知，沿光轴方向振动透镜，不改变光路，但扫描角较小，光斑面积有一定改变；沿垂直光轴方向振动透镜，扫描角有明显提高，但容易改变光路；相比之下，沿垂直光轴方向振动 45°直角棱镜和旋转反射镜，既能保持光路，扫描角也有显著提高，更容易实现两个完全独立的散斑图样；在较小运动距离或旋转角度，沿垂直光轴方向振动 45°直角棱镜和旋转反射镜能得到更多的独立散斑，从而可更有效地抑制散斑。

4 实验与讨论

为了进一步弄清这四种角度多样性散斑抑制方式对测试散斑的影响，文中将这四种光学元器件置入简化的投影系统中进行了实验，图 7 为运动透镜的情况。实验中利用 32 mW、出射光斑直径 0.2 mm 的绿色固态激光器(峰值波长 λ=532 nm)作为光源，通过扩束镜扩束，用光阑控制入射到光通管内的光场，光经散射片透射后进入紧贴其后的光通管完成匀场和整形，投影镜头将整形后的均匀方形光场直接投射到屏幕上。由一维调节架带动固定在其上的透镜或 45°直角棱镜、由旋转刻度盘带动反射镜分别进行步长为 10 μm 和 0.01°的单步运动，用空间分辨率为 640 ×480、CCD (Texas Instruments DMK－21BU04) 上单个像素大小为 5.6 μm×5.6 μm、焦距为 50 mm 的 Camera (Pentax,C5028–M) 在成像距离 25 cm 处捕获每一次运动后屏幕上的散斑图样，在 50 μm 和 0.05°范围内共获取了 6 帧散斑图像。计算第一帧散斑图像与其他 5 帧散斑图像之间的互相关系数，记录如表 1 所示。

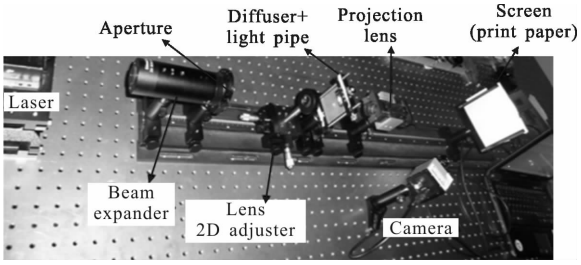

图 7 运动透镜情况下的实验装置

Fig.7 Experimental setup for moving lens case

由表 1 中的计算结果可以看出，在 50 μm 的范围内沿光轴运动透镜，所获得的散斑图像仍具有强相关性；而沿垂直于光轴方向运动透镜 40 μm、运动 45°直角棱镜 20 μm 和旋转反射镜 0.02°散斑图像之间就呈现弱相关了。运动位移或旋转角度再增大一个步长，后三种情况下测得的散斑图样就已经完全不相关了。这一点从表 2 中对第 1 帧图像以及第 1帧图像与其后相邻 2 帧、3 帧、4 帧、5 帧、6 帧图像叠加后图像的对比度($C=\sigma/\bar{I}$，其中 σ 为图像的标准方差，$\bar{I}$ 为图像的平均强度)结果可以进一步证实。不考虑实验中运动位移或旋转角度装置精度的影响，测得的结果与理论分析是吻合的。

表 1 四种情况下第 1 帧散斑图像与其他各帧散斑图像之间的互相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between the first speckle image and the others for four cases

Correlation coefficient μ	μ_{11}	μ_{12}	μ_{13}	μ_{14}	μ_{15}	μ_{16}
Moving a lens along the optical axis	1.0	0.987	0.975	0.965	0.953	0.915
Moving a lens along perpendicular to the optical axis	1.0	0.896	0.656	0.397	0.167	0.075
Moving a retroreflecting right-angle prism along perpendicular to the optical axis	1.0	0.639	0.133	0.050	0.068	0.044
Rotating the mirror	1.0	0.376	0.126	0.065	0.058	0.074

根据上述理论与实验结果分析可知，与其它两种方法相比，运动透镜实现两个完全独立的散斑图像较困难，但可以通过实验观察到：运动透镜时，投射到光管入口端散热片上的整个光场会同时变化，而采用其他两种方法时，散热片上的光场只能在垂直于光轴的某一个方向上变化；若想通过旋转反射镜或运动 45°直角棱镜使散热片上的光场整体变化，一般会采用二维扫描的方法，而这样又会增大驱动

表 2 四种情况下第 1 帧散斑图像与其他相邻多帧散斑图像之间叠加后的散斑对比度

Tab.2 Contrast of the first speckle image and adjacent multi-frame speckle images superimposed for four cases

Contrast of speckle images	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Moving a lens along the optical axis	0.985	0.972	0.982	0.976	0.985	0.970
Moving a lens along perpendicular to the optical axis	0.985	0.824	0.783	0.722	0.704	0.689
Moving a retroreflecting right-angle prism along perpendicular to the optical axis	0.974	0.736	0.701	0.643	0.518	0.488
Rotating the mirror	0.982	0.725	0.706	0.628	0.501	0.471

装置的难度。

5 结 论

角度多样性原理普遍应用于激光散斑抑制中。文中通过运动透镜、运动 45°直角棱镜,以及旋转反射镜在激光照明部分引入角度多样性，并利用成像原理推导了这几种方法引起的角度变化。结合理论，通过仿真分析和实验可知运动 45°直角棱镜和旋转反射镜更容易实现两个完全统计独立的散斑图样，这为选择运动机制以期实现激光散斑抑制的方案提供了参考。

参考文献：

[1] Stijn Roelandt, Youri Meuret, Gordon Craggs, et al. Standardized speckle measurement method matched to human speckle perception in laser projection systems [J]. ***Opt Expr***, 2012, 20(8): 8770-8783.

[2] Goodman J W. Speckle Phenomena in Optics Theory and Application[M]. Englewood: Roberts and Company Pulishers, 2007: 23-27.

[3] Trisnadi J I. Speckle contrast reduction in laser projection displays[C]//SPIE, 2002, 4657: 131-137.

[4] Völker A, Zakharov P, Weber B, et al. Laser speckle imaging with an active noise reduction scheme [J]. ***Opt Expr***, 2005, 13(24): 9782-9787.

[5] Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Wei Zhonglun, et al. Speckle suppresion by new diffuser in laser projection display system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44 (2): 503-507. (in Chinese)
孟祥翔, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 激光投影显示中新型散射体的散斑抑制 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 503-507.

[6] Dalip Singh Mehta, Dinesh N Naik, Rakesh Kumar Singh, et al. Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal, spatial, and angular diversity [J]. ***Appl Opt***, 2012, 51(12): 1894-1904.

[7] Sung Chul Shin, Sin Sung Yoo, Sang Yeon Lee, et al. Removal of hot spot speckle on laser projection screen using both the running screen and the rotating diffuser [J]. ***Displays***, 2006, 27: 91-96.

[8] Seungdo An, Anatoliy Lapchuk, Victor Yurlov, et al. Speckle suppression in laser display using several partially coherent beams[J]. ***Opt Expr***, 2009, 17(1): 92-103.

[9] Yao Pohung, Chen Chiehhui, Chen Chenghuan. Low speckle laser illuminated projection system with a vibrating diffractive beam shaper[J]. ***Opt Expr***, 2012, 20(15): 16552-16566.

[10] Bashkansky M, Reintjes J. Statistics and reduction of speckle in optical coherence tomography [J]. ***Opt Lett***, 2000, 25(4): 545-547.

[11] Akram M N, Tong Z, Ouyang G, et al. Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror [J]. ***Appl Opt***, 2010, 49 (17): 3297-3304.