

级联散射片引入多重散射机制的激光散斑抑制

徐美芳¹ 高文宏^{1,2} 石云波¹ 李江澜¹

(¹ 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)

² 山西傲维光视光电股份有限公司, 山西 太原 030032

摘要 散斑抑制是阻碍以激光为光源的显示技术发展的技术瓶颈。通过实验分析了散射片的发散角、级联散射片的数量和它们之间的间距对散射光束相关面积宽度的影响。在级联散射片和光通管构成的散射体的基础上, 利用多重散射理论解释了级联散射片减弱激光相干性的现象。基于积分散斑的统计学理论, 推导了 CCD 积分时间 T 内捕获的散斑图样的强度自协方差函数与散斑对比度之间的关系, 并明确了级联散射片对运动散射片位移的影响, 从而达到抑制散斑的目的。实验结果表明, 将散射体与运动散射片相结合不仅提高了整体光能利用率, 在探测器积分时间 $1/30$ s 内还能将散斑对比度从 0.753 降低到 0.069。

关键词 激光光学; 激光散斑; 散斑抑制; 多重散射机制; 级联散射片

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0414002

Laser Speckle Suppression with Multiple Scattering Schemes Introduced by Cascade Diffusers

Xu Meifang¹ Gao Wenhong^{1,2} Shi Yunbo¹ Li Jianglan¹

(¹ Ministry of Education Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China & National Key Laboratory of Electronic Testing Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

² Shanxi Ovision Optronics LTD, Taiyuan, Shanxi 030032, China

Abstract Speckle suppression is a technical bottleneck hampering the development of laser display technology. The effects of the scattering angle of the diffuser, the number of cascade diffusers and the separations between them on the width of the scattering beam coherence area are analyzed by the experiments. On the base of the scatterer composed of cascade diffusers and lightpipe, the laser decoherence phenomena achieved by applying cascade diffusers is explained according to the multiple scattering theory. Based on statistics of integrated speckle, the relationship between the autocovariance function of the intensity and the speckle contrast is derived from the speckle pattern within the integration time T of CCD, and the influence of cascade diffusers on the displacement of the moving diffuser is determined, which contributes speckle suppression. The experimental results show that the combination of the scatterer with the moving diffuser not only improves optical energy utilization, but also reduces the speckle contrast from 0.753 to 0.069 within the integration time $1/30$ s of the detector.

Key words laser optics; laser speckle; speckle suppression; multiple scattering scheme; cascade diffusers

OCIS codes 140.7300; 120.6160; 350.4600

1 引言

激光因具有广色域、低功耗、长寿命和小体积等

优点, 作为光源使得激光显示技术更具竞争力^[1]。然而, 激光固有的相干性使其经粗糙屏幕后会产生

收稿日期: 2013-09-08; 收到修改稿日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(61078036)、山西省重大专项(20111101045)、山西省自然科学基金项目(2011011015-2)、中北大学 2011 年校青年科学基金

作者简介: 徐美芳(1974—), 女, 博士研究生, 主要从事激光投影显示与激光散斑抑制等方面的研究。

E-mail: xmf0129@nuc.edu.cn

导师简介: 陈旭远(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事微电子机械传感器件及系统的研发、半导体材料与器件的表征与技术等方面的研究。E-mail: chenxy@online.no

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

散斑^[2], 这一点严重阻碍着激光显示的商业化进程。

基于叠加不相关和统计独立散斑图样的散斑抑制方法倍受国内外研究者的钟爱, 刘立人^[3]采用滑动聚焦模式结合多发射机/多接收机的多通道结构产生多个不相干散斑图像叠加对合成孔径激光成像的散斑进行了有效抑制。更受关注的是通过各种机械振动或旋转散射片^[4-9]调制入射光相位, 使观测屏上散斑图样随时间发生变化, 即每一时刻的散斑图样不相关或统计独立, 在一定时间内对这些散斑图样进行强度叠加, 降低散斑图样的对比度, 达到抑制散斑的目的。该散斑抑制的原理是利用随时间变化的散斑图样在人眼或探测器的积分时间内对其进行时间积分, 这一过程并没有从根本上减弱照射观测屏上光束的相干特性, 此点从文献^[7]中投影屏幕上热散斑的存在可见证。可见, 仅靠散射片运动抑制激光散斑局限性较大。

为了研究级联散射片对降低散斑和提高光能利用率的贡献, 构建了一个由级联散射片和光通管相结合的散射体。在推导激光散斑抑制原理的过程中, 通过理论和杨氏双孔干涉实验相结合, 分析了散射片的散射特性、级联散射片数量和他们之间间距对观测屏上散斑相关面积的影响。并通过多重散射散斑抑制理论解释了散射体减弱光束空间相干性, 从而减小散斑尺寸的现象。将运动散射片和与光管构成的散射体结合, 运用于简化的激光显示成像光路中, 通过 CCD 检测到的散斑图样的强度自协方差函数, 从理论上明确了散射片的运动位移与 CCD 在曝光时间内捕获到的散斑图样的对比度之间的关系, 并通过实验证实了运动散射片与散射体的结合不仅提高了光能利用率, 还进一步增强了激光散斑抑制效果。

2 多重散射机制的散斑抑制原理

2.1 级联散射片对散斑相关面积的影响

根据 Van Cittert-Zernike 定理^[10], 当激光光源以发散角 θ_s 照射散射片 1(diffuser1)时, 形成的散射光场的平均相关面积宽度 ΔS_s 为

$$\Delta S_s = \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{1}{2}\theta_s\right)}, \quad (1)$$

式中 λ 为入射光束波长。光束经发散角为 θ_1 的散射片 1 透射后, 其波前以散射角 θ_1 在自由空间中传播至散射片 2 上, 所形成光场的平均相关面积宽度 ΔS_1 为: $\Delta S_1 = \lambda/\sin(\theta_1/2)$ 。同理, 波前再经散射角

为 θ_2 的散射片 2 透射后继续传播又会产生直径为 $\Delta S_2 = \lambda/\sin(\theta_2/2)$ 的相关面积宽度。如果散射片 2 后级联有散射片, 光束会以相同原理继续传播下去, 如图 1 所示。

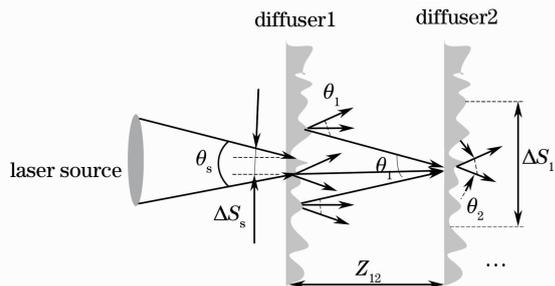


图 1 扩展光源宽度效果示意图

Fig. 1 Schematic of effect of an extended source width

如果散射片 1 与其后的散射片 2 及级联的散射片紧贴着, 即 $Z_{12} = 0$, 那么散射片 1 扩散后的光束经其后的散射片 2 进一步散射, 光束的散射角近似为 $\theta_1 + \theta_2$ ^[11], 这时散射片 2 透射后的光束产生的相关面积宽度修正为 $\Delta S_2 = \lambda/\sin[(\theta_1 + \theta_2)/2]$ 。依此类推, 每经一个散射片散射, 其发散角会继续增大, 若散射片 1 后级联有 n 个散射片, 则第 n 个散射片透射的光束的相关面积宽度为 $\Delta S_n = \lambda/\sin[(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)/2]$, 显然, $\Delta S_1 > \Delta S_2 > \dots > \Delta S_n$ 。

若散射片 1 与其后的散射片 2 及级联的散射片之间都存在一定空间间隙, 即 $Z_{12} > 0$, 那么因空气间隙扩展, 散射片 2 上的透射振幅产生的相关面积直径近似为 $\Delta S_2 = \Delta S_1 + Z_{12} \tan \theta_1$ 。同理, 经散射片 2 后级联的 n 个散射片散射后, 第 n 个散射片透射的光束的相关面积宽度为 $\Delta S_n = \Delta S_1 + Z_{12} \tan \theta_1 + \dots + Z_{n-1,n} \tan \theta_n$, 显然, $\Delta S_1 < \Delta S_2 < \dots < \Delta S_n$ 。

若级联散射片具有完全相同的散射特性, 即其发散角均为 θ , 则有

$$\Delta S_n = \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{1}{2}n\theta\right)}, \quad (2)$$

式中散射片的数量 n 与其发散角 θ 对激光光束的相关面积宽度的影响如图 2(a) 所示。图 2(a) 表明, 当散射片紧贴在一起时, 激光光束的相关面积宽度是随着散射片数量的增加和散射片发散角的增大而先急剧减弱, 随后趋于不变; 但当散片的数量 $n \geq 3$ 时, 散射片数量的继续增加对光束相关面积宽度的减小贡献不大; 而散射片的发散角 $\theta > 10^\circ$, 光束相关面积宽度趋于稳定。

若它们的间距 Z 相同且不为零, 则有

$$\Delta S_n = \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{1}{2}n\theta\right)} + (n-1)Z \tan \theta, \quad (3)$$

散射片的数量 n 、发散角 θ 以及散射片之间的距离对传播光束相干性的影响如图 2(b) 所示。由图 2(b) 可见, 当散射片之间距离较小时, 增加散射片的数量对散射光束相关宽度的影响基本和图 2(a) 中相应散射片数量所产生的结果相似, 这可由图 2 中的实线看

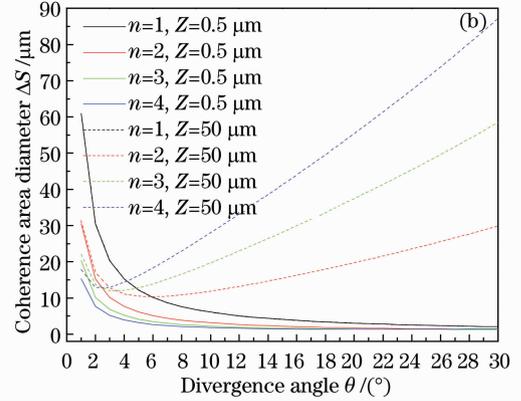
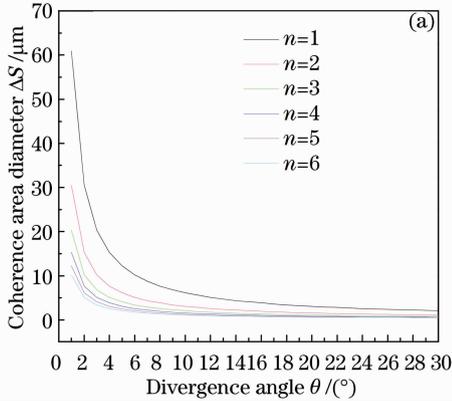


图 2 散射片的发散角对光束的相干宽度的影响。(a) $Z=0 \mu\text{m}$; (b) $Z=0.5 \mu\text{m}$ 和 $Z=50 \mu\text{m}$

Fig. 2 Effect of divergence angle of diffuser on coherence width of beams. (a) $Z=0 \mu\text{m}$; (b) $Z=0.5 \mu\text{m}$ and $Z=50 \mu\text{m}$

出;随着散射片之间的距离逐渐增大, 散射片数量对散射光束相关面积宽度的影响突显出来, 先是随散射片发散角的增加, 散射光束相关面积宽度急剧减弱, 但当 θ 增加到 θ_m , 再继续增大时, 散射光束相关面积宽度又迅速反弹。考察(3)式, 可以得出使级联散射片上入射光束平均相干宽度 ΔS_n 最小的 θ_m 随散射片数量和它们之间距离的不同而不同。

由图 2(a)、(b) 可以直观地看到, 多个散射片级联的间距直接影响着传播光束的相关面积宽度。当多个散射片级联的间距增大时, 级联散射片会增大传播光束的相关面积宽度, 反而不利于激光散斑的抑制。只有级联散射片的间距尽量接近零时, 才会降低激光散斑。散射片的发射角和级联散射片的数量也应当选择, 如果太大, 不仅不会抑制激光散斑, 还会增大收集光的难度。

2.2 引入多重散射机制降低散斑对比度

为了描述级联散射片产生多重散射的过程, 仅用有一定间距、完全相同的 2 片散射片, 通过简化并夸张的图 3 来说明。当一束激光照射到第一个散射片上时, 这束光将被散射片上随机分布的直径为微米或纳米级的砂粒发生米氏散射, 分成很多能量不等的子光束。这些子光束中的前向散射光束会在空气中传播至下一个散射片上, 会与第二个散射片上的砂粒发生米氏散射, 然后分束, 以相同规律继续传播, 最后由光通管将所有散射光收集。

图 3 中画了 3 条传播的子光束, 每条子光束因在级联散射片中发生多重散射会走过不同的路程, 其中经散射片上砂粒散射、分束、最后被光通管收集后, 经四壁反射的光束比直接传播的光束走过的路程会长很多。这种因级联散射片和光通管构成的散射体使光源光束在传播过程中发生多重散射形成不

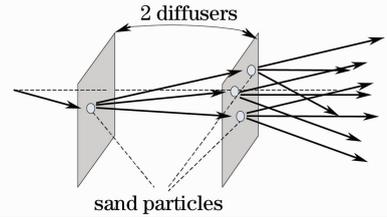


图 3 光束通过级联散射片发生多重散射
Fig. 3 Multiple scattering introduced by beam through cascade diffusers

同程长的散布范围会比单个散射片发生的面散射大得多, 同时造成的时间延迟也长很多。如果级联散射片上的砂粒折射率非均匀、尺寸大小与波长可比, 会展览光通管出射光束的角扩展散布范围, 从而降低散射体出射光束的空间相干性, 同时光通管的出射光束形成的出射光斑大于入射光斑, 也会减小出射面上的散斑尺寸。

根据文献[12], 散斑颗粒平均大小 R 正比于散射光束相关面积宽度 ΔS 。散射光束相关面积越大, 在观测屏上形成的散斑颗粒平均直径越大; 散射光束相关面积越小, 形成的散斑颗粒平均直径越小。下面分析 CCD 检测到的散斑图像中存在较大散斑或较小散斑对散斑抑制的影响。图 4 显示了这两类散斑在 CCD 上呈现的情况。图 4(a)、(c) 中浅灰色的部分显示一个较大散斑占用了 CCD 的多个像素,

而图 4(b)中深灰色的部分表明多个较小散斑充满一个像素。因来自同一个大散斑的光是完全相关的,且该散斑没有在单个像素上发生散斑强度的空间平均,必将导致散斑图像对比度高;而来自两个或多个不同小散斑的光是部分或完全不相关,同时因它们在单个像素上会产生空间强度平均而将显著降低散斑图像对比度;两个原本完全不相关的小散斑因其强度叠加在同一个大散斑强度上被 CCD 探测到而相关,如图 4(c)所示,但它们又因占用同一个大散斑会存在区域上空间强度叠加而减小散斑图像对比度。可见,产生小散斑的相关面积宽度实现了散斑颗粒在空间上的平均,从而有效降低了散斑图像的对比度,为散斑抑制做出了贡献。故这种多重散射机制为激光散斑抑制带来两个明显优势:对传播光束空间相干性的减弱,大大降低了观测屏上散斑的可见度;对观测屏上散斑尺寸的减小,使得探测面上单个像素内呈现多个散斑颗粒,从而发生空间平均,减弱观测到的散斑对比度。

根据杨氏双孔干涉原理,光束空间相干性的变化可通过其产生的干涉图样的可见度进行定性分析,下面通过实验观察级联散射片引入多重散射后对激光散斑相关面积的影响。实验中,选用功率为

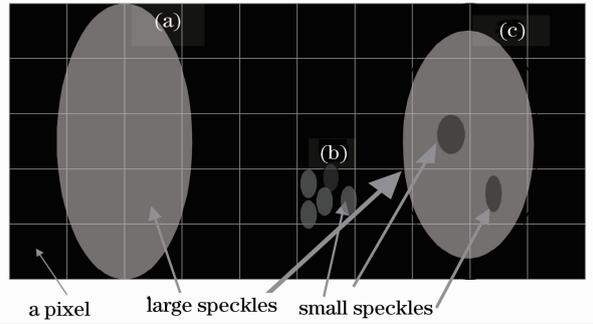


图 4 散斑颗粒之间的关系

Fig. 4 Relationship between speckle grains

32 mW、波长为 532 nm 的固态绿色激光器作为光源,3 片 5°发散角的毛玻璃作为被测散射片。先将光束分别经 1、2、3 片间距为零的散射片透射后,投射到距离为 25 cm 处的打印纸屏上,中央带有直径为 300 μm 、间距为 0.7 mm 的 2 个小孔,由 60 cm 处的 CCD 直接观测,观测结果如图 5 所示。然后小孔直径不变,其间距增大到 1.5 mm,分别将 3 片散射片调整为 1、3、6 cm 等间距放置,并使最后一一片散射片与纸屏距离为 25 cm 以及观测距离保持不变,测试干涉图样如图 6 所示。正如上述理论所分析的,图 5 和图 6 直观显示了干涉图样的可见度随紧

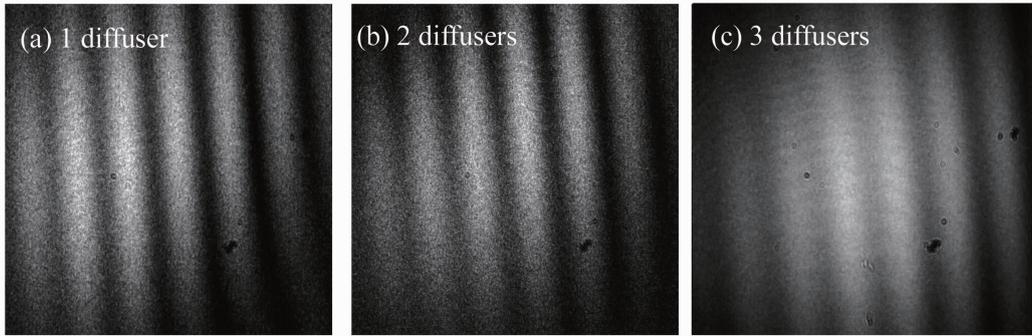


图 5 不同数量级联散射片产生的干涉图样

Fig. 5 Interference patterns generated by different numbers of cascade diffusers

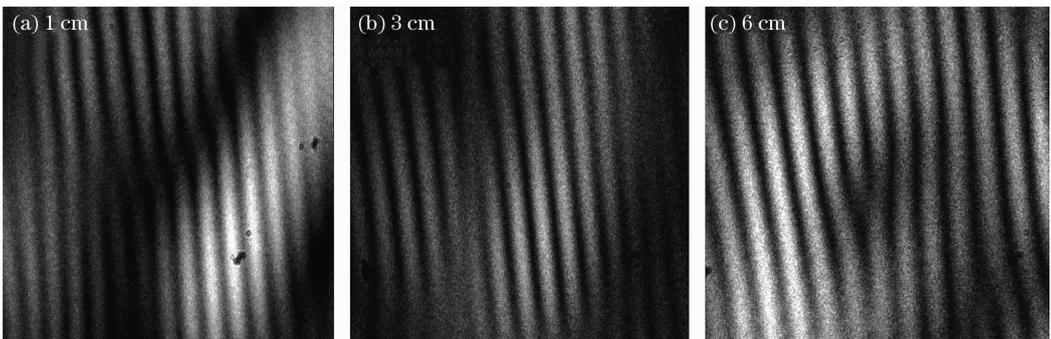


图 6 不同等间距的 3 个级联散射片产生的干涉图样

Fig. 6 Interference patterns generated by different equal separations of three diffusers

贴一起的散射片数量增加而显著降低；随 3 片散射片间距增大而有明显增大。这说明来自相邻散斑颗粒的光束仍具有较强的相关性，散射片级联的数量只能在一定程度上减小激光散斑相关面积，从而减小散斑颗粒尺寸。

最后，将 3 片散射片紧贴在一起放置于光通管入口端面处，光通管的出射光束由投影镜头分别投影到带有间距为 0.7 mm 和 1.5 mm 的 2 个直径为 300 μm 小孔的打印纸屏上，观测距离不变。结果发现，对于间距为 1.5 mm 的 2 个小孔不能使其产生干涉图样，而光束通过间距为 0.7 mm 的 2 个小孔后尽管能产生可见度较低的干涉图样，但仍能清晰观察到 2 个独立光斑，如图 7 所示。比较图 7 与图 5(c) 可知，多重散射机制的引入与光通管结合，在降低激光空间相干性的同时，也进一步减小了激光散斑颗粒的尺寸。

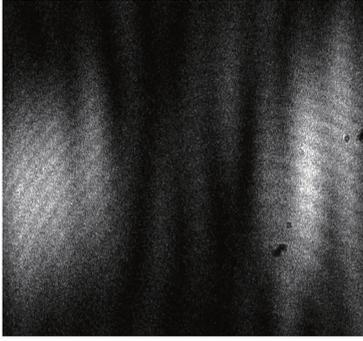


图 7 由级联散射片和光管构成的散射体产生的干涉图样

Fig. 7 Interference patterns generated by the scatterer composed of cascade diffusers and lightpipes

2.3 散斑抑制原理

由上述分析可知，由级联散射片和光通管构成

的散射体一直是处于静止工作状态的，而对于单色性极好的激光光源，通过这种静态体散射机制降低散射体出射光的相干性存在一定局限性，从而也减小了其对散斑抑制的贡献。为了提高激光散斑抑制效果，在 3 个级联散射片的前面引入运动散射片，如图 8 所示。假设所有散射片及屏幕的透射率都为 1，成像系统的点扩散函数为 $H(x, y; u, v)$ ，则屏幕上的光场为

$$E(x, y) = E_0(x, y) T_m(x, y) T(x, y) = E_0(x, y) \exp\{jk[h_m(x, y) + 4h(x, y)]\}, \quad (4)$$

式中 $E_0(x, y)$ 为入射到运动散射片上的光场， $T_m(x, y)$ 和 $T(x, y)$ 分别为运动散射片及级联散射片和屏幕的透射函数， $h_m(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 分别为光传播到相应散射片表面而散射所对应的高度涨落， $k = 2\pi/\lambda$ 为照明光束的平均波矢， λ 为入射光波长。

则观察面 CCD 上探测到的场为

$$E(u, v) = \iint E_0(x, y) \exp\{jk[h_m(x, y) + 4h(x, y)]\} H(x, y; u, v) dx dy. \quad (5)$$

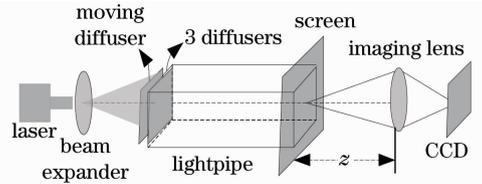


图 8 由运动散射片引入多重散射机制的激光散斑抑制示意图

Fig. 8 Schematic of laser speckle suppression based on multiple scattering scheme introduced by a moving diffuser

散射片相对散射体运动位移 Δx 、 Δy 后导致在 CCD 上产生新的场分布：

$$E'(u, v) = \iint E_0(x, y) \exp\{jk[h_m(x + \Delta x, y + \Delta y) + 4h(x, y)]\} H(x, y; u, v) dx dy, \quad (6)$$

运动前后两个场的互相关 $\Gamma(u_1, v_1; u_2, v_2)$ 为

$$\Gamma(u_1, v_1; u_2, v_2) = \langle E(u_1, v_1) E'*(u_2, v_2) \rangle = \iiint E_0(x_1, y_1) E_0^*(x_2, y_2) \times \langle \exp\{jk[h_m(x_1, y_1) - h_m(x_2 + \Delta x, y_2 + \Delta y) + 4h(x_1, y_1) - 4h(x_2, y_2)]\} \rangle \times H(x_1, y_1; u_1, v_1) H^*(x_2, y_2; u_2, v_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2, \quad (7)$$

对于高度涨落为高斯分布的散射表面，则

$$\langle h_m(x_1, y_1) h_m(x_2, y_2) \rangle = \sigma_h^2 \exp[-(\Delta x'^2 + \Delta y'^2)/r_h^2], \quad (8)$$

式中 σ_h 为散射表面高度涨落的方差， r_h 为表面相关下降到 $1/e$ 的半径，若 $(\Delta x + \Delta x')^2 + (\Delta y + \Delta y')^2 < r_h^2$ ，那么有 $\langle \exp\{jk[h_m(x_1, y_1) - h_m(x_2 + \Delta x, y_2 + \Delta y)]\} \rangle = \exp\{-k^2[\sigma_h^2 - \langle h_m(x_1, y_1) h_m(x_2 + \Delta x, y_2 + \Delta y) \rangle]\} = \exp\{-k^2[\sigma_h^2\{1 - \exp[-[(\Delta x + \Delta x')^2 + (\Delta y + \Delta y')^2]/r_h^2]\}]\} \approx \exp\{-k^2\sigma_h^2[(\Delta x + \Delta x')^2 + (\Delta y + \Delta y')^2]/r_h^2\} = \exp\{-[(\Delta x + \Delta x')^2 + (\Delta y + \Delta y')^2]/s_{mh}^2\}$ ，

和

$$\begin{aligned} \langle \exp\{j4k[h(x_1, y_1) - h(x_2, y_2)]\} \rangle &= \exp\{-16k^2[\sigma_h^2 - \langle h(x_1, y_1)h(x_2, y_2) \rangle]\} = \\ \exp\{-16k^2\{\sigma_h^2\{1 - \exp[-(\Delta x'^2 + \Delta y'^2)/r_h^2]\}\} \} &\approx \\ \exp[-16k^2\sigma_h^2(\Delta x'^2 + \Delta y'^2)/r_h^2] &= \exp[-(\Delta x'^2 + \Delta y'^2)/s_{mh}^2], \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $s_{mh} = r_h/k\sigma_h$, $\Delta x' = x_1 - x_2$, $\Delta y' = y_1 - y_2$, $s_h = r_h/4k\sigma_h$.

若直径为 D 的圆形光瞳内受到屏幕上散射光的均匀照明,也就是散射片的相关函数比成像系统的点扩散函数的自相关函数窄很多,即 $s \ll \lambda z/D, 2\pi z\sigma_h/r_h \gg D$ 或 $8\pi z\sigma_h/r_h \gg D$, 将(9)式代入(7)式中,则有

$$\begin{aligned} \Gamma(\Delta u, \Delta v) &= |E_0|^2 \iint H(\Delta u, \Delta v) \exp\{-[(\Delta x' + \Delta x)^2 + (\Delta y' + \Delta y)^2]/s_{mh}^2\} \times \\ &\exp[-(\Delta x'^2 + \Delta y'^2)/s_h^2] d\Delta x' d\Delta y' \approx \\ &\pi |E_0|^2 \frac{s_{mh}^2 s_h^2}{s_{mh}^2 + s_h^2} \exp\left[-\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{s_{mh}^2 + s_h^2}\right] \frac{\pi D^2}{(\lambda z)^2} \left[2 \frac{J_1(\pi D \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}/\lambda z)}{\pi D \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}/\lambda z}\right], \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\Delta u = u_1 - u_2$, $\Delta v = v_1 - v_2$,

$$H(\Delta u, \Delta v) = \iint H(x, y; u_1, v_1) H^*(x, y; u_1 - \Delta u, v_1 - \Delta v) dx dy = \frac{\pi D^2}{(\lambda z)^2} \left[2 \frac{J_1(\pi D \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}/\lambda z)}{\pi D \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}/\lambda z}\right].$$

将(10)式进行归一化处理,光场 E 的归一化互相关函数 $\mu(\Delta u, \Delta v)$ 为

$$\mu(\Delta u, \Delta v) = \frac{\Gamma(\Delta u, \Delta v)}{\Gamma(0, 0)} \approx \exp\left(-\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{s_{mh}^2 + s_h^2}\right) \left[2 \frac{J_1(\pi D \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}/\lambda z)}{\pi D \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}/\lambda z}\right], \quad (11)$$

随着散射体前面散射片的运动,屏幕上散斑强度也随时间持续变化。在曝光时间 T 内,CCD 捕获到的散斑图像强度为

$$I_m(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} I(t') dt', \quad (12)$$

式中 $I(t')$ 是被测散斑图像在时刻 $t' \in [t, t+T]$ 处的强度分布。

检测到的散斑图像强度的综述平均为

$$\langle I_m(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \langle I(t') \rangle dt', \quad (13)$$

散斑强度 $I_m(t)$ 的二阶矩为

$$\langle I_m^2(t) \rangle = \left\langle \frac{1}{T^2} \int_{t_1}^{t_1+T} \int_{t_2}^{t_2+T} I(t') I(t'') dt' dt'' \right\rangle = \left\langle \frac{1}{T^2} \int_{t_1}^{t_1+T} \int_{t_2}^{t_2+T} \langle I(t') I(t'') \rangle dt' dt'' \right\rangle, \quad (14)$$

式中 $t' \in [t_1, t_1 + T]$, $t'' \in [t_2, t_2 + T]$, $t' - t'' = \tau$, τ 为延迟时间,运动散射片以速度 v 运动时, $v\tau = \Delta x$ 或 Δy 。

根据 Siegert 关系^[13],有

$$\langle I(t') I(t' - \tau) \rangle = \langle I(t') \rangle^2 (1 + \beta |\mu(\tau)|^2), \quad (15)$$

式中参数 $\beta \in [0, 1]$ 由屏幕的退偏特性和 CCD 上单个像素内散斑个数的空间平均决定, $\mu(\tau)$ 是光场 E 的归一化互相关函数,见(11)式。

将(15)式代入到(14)式中,有

$$\langle I_m^2(t) \rangle = \left\langle \frac{1}{T^2} \int_{t_1}^{t_1+T} \int_{t_2}^{t_2+T} \langle I(t') \rangle^2 (1 + \beta |\mu(\tau)|^2) dt' dt'' \right\rangle = \langle I_m(t) \rangle^2 \left[1 + \frac{2\beta}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) |\mu(\tau)|^2 d\tau \right]. \quad (16)$$

根据 Goodman 的散斑统计理论^[12],被检测到的散斑图像的对比值 C 为

$$C = \frac{\sqrt{\langle I_m^2(t) \rangle - \langle I_m(t) \rangle^2}}{\langle I_m(t) \rangle} = \sqrt{\frac{2\beta}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) |\mu(\tau)|^2 d\tau} = \sqrt{\beta} \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (17)$$

式中

$$N = \left[\sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) |\mu(\tau)|^2 d\tau} \right]^{-1}, \quad (18)$$

为在该运动装置下产生独立散斑图像的数量。将(11)式代入(17)式中, 不仅可确定散斑图像的强度自协方差函数与散斑对比度的关系, 还可获知级联散射片的散射特性对运动散射片位移以及散斑对比度的影响。

3 测试平台

根据散斑抑制原理搭建的简化激光显示系统如

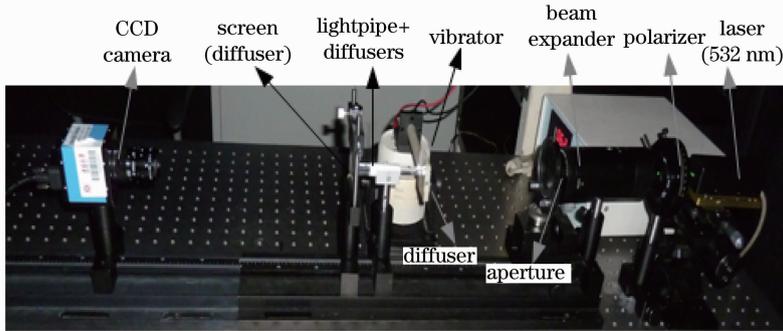


图9 激光散斑抑制实验装置

Fig. 9 Experimental setup for laser speckle suppression

4 结果分析与讨论

实验中, 采用两种不同散射特性的散射片作为运动用散射片。其中一种散射片的散射特性满足 $s_{mh} = r_h/k\sigma_h$, 与放置于光通管入口处的单个散射片特性完全相同; 另一种散射片的散射特性满足 $s_{mh} = s_h = r_h/(i+1)k\sigma_h$, 与放置于光通管入口处的级联散射片的总的散射特性相同, $i=1, 2, 3$ 为放置于光通管入口处的散射片的数量。对不同散射特性下的散射片, 在光通管入口处分别放置有 1、2、3 片散射片 3 种实验装置下进行了多次重复实验, 获取并保存了振动台保持静止和以 35 Hz 频率、2.83 mm/s 有效平均速度振动两种状态下的散斑图像。散斑图像采集过程中, 根据 Nyquist 定理, 将相机的 F 数设

置为 $16^{[14]}$; 因线性 CCD, 应将相机的伽玛值设置为 1; 根据人眼的积分时间, 将相机的曝光时间设置为 $1/30$ s。由成像镜头的分辨基元 $R=1.22\lambda(M+1)F/\#, F/\#$ 为成像镜头的 F 数 ($F/\#=16$), $M=f/(z-f)$ 为成像镜头的放大倍数 ($M=0.25$), f 和 z 分别为成像镜头的焦距 ($f=50$ mm) 和成像物距 ($z=25$ cm), 可得知它在散射片屏幕上的分辨基元为 $12.98 \mu\text{m}$, 这比 CCD 上单个像素尺寸 ($5.6 \mu\text{m}$) 的 2 倍稍大, 保证了 CCD 上散斑大小能清晰识别, 即在散斑抑制的效果上可不用考虑空间平均效应。由(17)式分别计算两种状态、3 种不同实验装置下所得散斑图像的对比度, 结果如表 1 所示。

表 1 不同装置下实验所得散斑对比度情况

Table 1 Measured speckle contrasts for different experimental setups

Experimental setup	Speckle contrast $C (s_{mh} = r_h/k\sigma_h)$		Speckle contrast $C (s_{mh} = r_h/(i+1)k\sigma_h, i=1, 2, 3)$	
	Static	Moving	Static	Moving
1 diffuser	0.868	0.121	0.809	0.078
2 diffusers	0.815	0.118	0.772	0.073
3 diffusers	0.783	0.104	0.753	0.069

当级联散射片前端散射片在振动台的带动下开始运动时, 入射到散射片上的激光光束的空间位置

也开始发生改变, 经光通管入口处级联散射片进一步散射后, 由光通管出口端出射的光场的相位也随

之发生变化,变化前后产生两个完全统计独立的散斑图样,可通过(11)式中场的相关降至 $1/e^2$ 的条件得到,即

$$(\Delta x + \Delta y)|_{\min} = \sqrt{s_{mh}^2 + s_h^2} \geq \sqrt{2}s, \quad (19)$$

(18)式中当且仅当 $s = s_{mh} = s_h$ 时,获得两个完全统计独立散斑图像所需散射片运动位移最小。由实验条件可知:当所有散射片都采用 r_h/σ_h 为 20 的散射片时,在 1/30 s 内,3 种不同实验装置下能分别产生约 45、48 和 50 个独立散斑图像;当光通管入口处放置的散散片和观测屏都采用 r_h/σ_h 为 20 的散射片,而 3 种实验装置下运动所用散射片 r_h/σ_h 分别为 10、7 和 5,可分别产生约 71、106 和 142 个独立散斑图像。对于具有部分退偏,即 $\beta=0.7$ 的散射片,由(17)式计算这两种实验条件下散斑对比度 C 的理论值分别为:0.1247、0.1208 和 0.1183;0.0993、0.0813 和 0.0702。与表 1 中第 3 列和第 4 列实验所得结果相比,理论分析结果稍高些。原因在于,一旦散射片开始运动,测试情况就变得相对复杂。散射片的运动不仅产生了独立散斑图像,还减弱了照射到其上的激光光束的相干性,这对测试散斑图像对比度值的减小也做出了贡献。

5 结 论

通过理论与实验相结合,分析了散射片的发散角、级联散射片的数量和它们之间的间距,以及级联散射片和光通管构成的散射体对散射光束相关面积宽度的影响。提出了级联散射片引入多重散射机制的激光散斑抑制法。将散射体与运动散射片相结合不仅提高了整体光能利用率,更有效降低了散斑对比度,尤其是运动散射片的散射特性与放置于光通管入口处的级联散射片的总的散射特性相同时的情况,散斑对比度可进一步降低 40% 左右,为激光投影显示系统中散斑的有效抑制提供了理论和实验基础。

参 考 文 献

- 1 S Roelandt, Y Meuret, G Craggs, *et al.*. Standardized speckle measurement method matched to human speckle perception in laser projection systems [J]. *Opt Express*, 2012, 20(8): 8770–8783.
- 2 P S Considine. Effect of coherence on imaging systems [J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(8): 1001–1009.
- 3 Liu Liren. Structure and operating mode of synthetic aperture laser imaging lidar for speckle reduction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1028001.
刘立人. 基于散斑抑制的合成孔径激光成像雷达的结构和工作模式[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1028001.
- 4 S Lowenthal, D Joyeux. Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser [J]. *J Opt Soc Am*, 1971, 61(7): 847–851.
- 5 H C Kandpal. Generation of cross-spectrally pure light by two diffusers moving in opposite directions and determination of diffuser surface roughness [J]. *Opt Commun*, 2002, 207(6): 73–76.
- 6 A Völker, P Zakharov, *et al.*. Laser speckle imaging with an active noise reduction scheme [J]. *Opt Express*, 2005, 13(24): 9782–9787.
- 7 S C Shin, S S Yoo, S Y 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(3): 91–96.
- 8 Y Kuratomi, K Sekiya, H Satoh, *et al.*. Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser [J]. *J Opt Soc Am*, 2010, 27(8): 1812–1817.
- 9 Sun Mingjie, Lu Zukang. Study of speckle suppression by a moving diffuser in liquid crystal on silicon based laser projection system [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 718–721.
孙鸣捷, 陆祖康. 硅基液晶激光投影中散射体散斑抑制作用的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 718–721.
- 10 M Born, E Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th edition. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002. 521.
- 11 W N Partlo, W G Oldham. Diffuser speckle model: application to multiple moving diffusers [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(16): 3009–3014.
- 12 J W Goodman. *Speckle Phenomena in Optics Theory and Application* [M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007.
- 13 P A Lemieux, D J Durian. Investigating non-Gaussian scattering processes by using n th-order intensity correlation functions [J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, 16(7): 1651–1664.
- 14 Meifang Xu, Yunbo Shi, Guoxian Tang, *et al.*. Speckle characterization in laser projector display [J]. *International Journal of Engineering and Physical Sciences*, 2012, 63: 233–236.

栏目编辑: 宋梅梅