

文章编号 1004-924X(2013)12-3021-08

# 激光投影显示中静态复合散斑的表征与建模

徐美芳<sup>1\*</sup>, 王维彪<sup>2</sup>, 高文宏<sup>1,2</sup>, 石云波<sup>1</sup>

(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:**对激光投影显示系统中形成散斑的光学系统进行了简化。采用理论与实验相结合的方式,用简化的光学系统分析了复合散斑的形成机理和有效表征方法。基于散斑对比度分析法,对影响复合散斑对比度的 4 个重要因素,即入射光束的光斑直径,散射片与屏幕之间的距离,屏幕上粗糙散斑颗粒和屏幕表面的精细散斑颗粒进行了系统实验分析,并通过实验数据确定了这些因素与复合散斑对比度的函数关系。基于统计分析,研究了复合散斑的构成成份,提出了粗糙散斑颗粒与精细散斑颗粒对复合散斑的贡献模型,并通过实验验证了其可行性。实验结果为有效抑制激光投影显示中的复合散斑提供了实验依据。

**关键词:**激光投影;激光显示;激光散斑;复合散斑;散斑表征

**中图分类号:** O436; TH741.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3021

## Characterization and modeling of static compound speckle in laser projection display

XU Mei-fang<sup>1\*</sup>, WANG Wei-biao<sup>2</sup>, GAO Wen-hong<sup>1,2</sup>, SHI Yun-bo<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Instrumentation Science, Dynamic Measurement, Key Laboratory of Electron Measurement Technology of the Ministry of Education,*

*North University of China, Taiyuan 030051, China;* 2. *Shanxi Ovision Optronics Ltd. Co., Taiyuan 030032, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: xmf0129@nuc.edu.cn*

**Abstract:** The optical system which produces speckles in a laser projection display system was simplified. By combining theories and practices, the simplified system was used to analyze the formation mechanism of a compound speckle and its effective characterization. Based on the speckle contrast analysis method, four important factors affecting the contrast of the compound speckles were analyzed by the experiments, namely, the spot diameter of an incident light beam, the distance between diffuser and screen, the coarse speckle granule on the screen and the fine speckle granule above the screen. Then, the contrasts of the compound speckles as a function of these parameters were determined by the experimental data. After researching the constitute of the compound speckle, a relational model based on contribution of the coarse granule and the fine granule on the compound speckle was presented by statistical analysis method and confirmed by an experiment. Obtained results provide an effective

收稿日期: 2013-05-29; 修订日期: 2013-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61078036); 山西省重大科技专项资助项目(No. 20111101045); 山西省自然科学基金资助项目(No. 20111011015-2); 中北大学 2011 年校青年科学基金资助项目

tive experimental basis for the speckle suppression in the laser projection display.

**Key words:** laser projection; laser display; laser speckle; compound speckle; speckle characterization

## 1 引言

激光具有的广色域、低功耗、长寿命和小体积等优点使得以它作为光源的激光显示技术更具竞争力<sup>[1]</sup>。但其固有的相干性使激光经粗糙屏幕后会产生散斑<sup>[2]</sup>，这一点严重阻碍了激光投影显示的商业化进程。

早在 20 世纪 70 年代, J. C. Dainty<sup>[3]</sup>, J. Ohtsubo<sup>[4]</sup>, Silvano Donati<sup>[5]</sup>, H. J. Tiziani<sup>[6]</sup> 和 J. W. Goodman 等人就已开展对激光散斑特性的研究, 并致力于其抑制方法的探索<sup>[7-9]</sup>。其中, J. W. Goodman 对散斑的形成和其统计特性的理论分析最详尽, 他还首次提出了复合散斑的概念和成因, 并建立了复合散斑分析的理论模型<sup>[10]</sup>。然而在理论模型中, 影响复合散斑对比度的两个参数, 即对照射屏幕做贡献的独立散斑元胞的数量和对探测光强做贡献的屏幕散射表面独立散斑的数量, 在实际操作中很难确定, 这样就无法判断影响复合散斑最终测试结果的因素。随后, Steen G. Hanson<sup>[11]</sup> 和 Zhaomin Tong<sup>[12]</sup> 等人对复合散斑的动态特性及其抑制进行了研究。

在激光投影显示系统中, 散斑的成因极为复杂。为便于理论和实验的分析与计算, 本文将激光投影显示系统中形成散斑的光学系统简化, 仅保留对产生复合散斑起关键作用且投影显示系统中必不可少的用于匀光或消散斑的散射片和屏幕<sup>[10]</sup>。基于该简化光学系统, 通过系统实验确定了照射光斑和散射片与屏幕之间距离这两个参数与复合散斑对比度的函数关系, 并进一步分析了复合散斑的构成, 建立了各成份对复合散斑对比度的贡献模型。

## 2 复合散斑的形成

当一束激光经过一个散射片漫反射或透射后, 相遇的散射光满足建设性的干涉条件时就会在散射片上呈现亮的区域; 当相遇的散射光满足破坏性的干涉条件时, 散射片上就会呈现暗的区域。在散射片前或后放置另一有限大小的散射

片, 该散射片就会接收到来自前一个散射片的已散斑化(亮斑)的相干光的照射, 这时第二个散射片上会呈现强度涨落和散斑涨落的复合效应, 即散斑的散斑或复合散斑。复合散斑形成的实验装置如图 1 所示。光源是功率为 32 mW、波长为 532 nm 的固态绿色激光器, Diffuser<sub>1</sub> 与 Diffuser<sub>2</sub> (屏幕) 是参数完全相同的部分退偏、80° 发散角的毛玻璃。光束经扩束后, 直径控制在 5 mm 并通过 Diffuser<sub>1</sub> 透射, 散射光在自由空间中传播到距离 Diffuser<sub>1</sub> 1 m 处的 Diffuser<sub>2</sub> 上, 然后由空间分辨率为 640×480、CCD (Texas Instruments DMK-21BU04) 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 Diffuser<sub>2</sub> 上的散斑图样, 如图 2 所示。本文取图 2 中第 150 行信号显示在图 3 中, 这时能清晰观察到复合散斑图样中存在的粗糙散斑颗粒、精细散斑颗粒以及这两种颗粒叠加的成份。

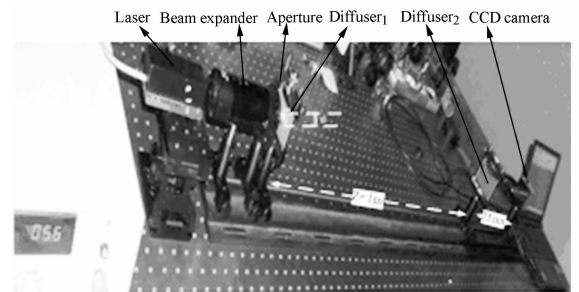


图 1 复合散斑形成的实验装置  
Fig. 1 Experimental setup for forming compound speckle

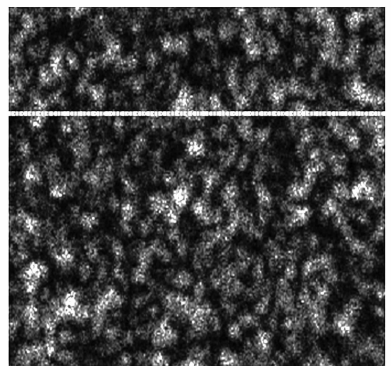


图 2 Diffuser<sub>2</sub> 上观察到的散斑图样  
Fig. 2 Photo of speckle pattern observed on diffuser<sub>2</sub>

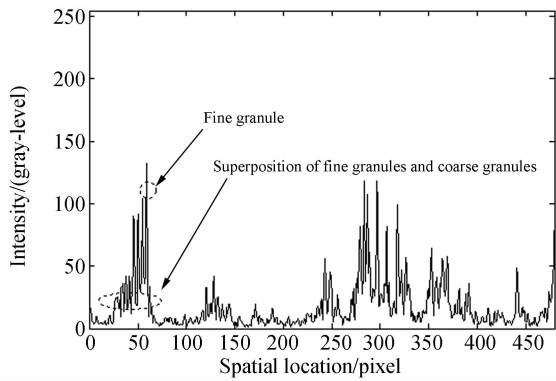


图 3 对应图 2 中点线的各像素的强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of pixels on dotted line in Fig. 2

本文通过实验来分析散斑图样中这两种颗粒成份的由来。首先保持 Diffuser<sub>1</sub> 静止,将 Diffuser<sub>2</sub> 固定在振动台上,由激振器的振动带动 Diffuser<sub>2</sub> 以 10 Hz 的频率振动。这时可观察到 Diffuser<sub>2</sub> 表面闪烁的精细颗粒几乎不可见,而 Diffuser<sub>2</sub> 上的粗糙颗粒没有任何改变,由此可见 Diffuser<sub>2</sub> 表面闪烁的精细颗粒是由 Diffuser<sub>2</sub> 产生的;然后保持 Diffuser<sub>2</sub> 静止,将 Diffuser<sub>1</sub> 固定在振动台上,由激振器的振动带动 Diffuser<sub>1</sub> 以 35 Hz 的频率振动,此时 Diffuser<sub>2</sub> 上的粗糙颗粒的强度涨落发生着显著变化,且初始形状基本消失,并呈现较均匀的强度分布,但其表面仍然会观察到闪烁的精细颗粒。这不仅说明了 Diffuser<sub>2</sub> 上的粗糙颗粒是由 Diffuser<sub>1</sub> 引入的,也证实了 Diffuser<sub>2</sub> 表面闪烁颗粒的来由。用 CCD Camera 在 5 ms 的较短曝光时间内捕获这两种情况下的散斑图样,如图 4 所示。

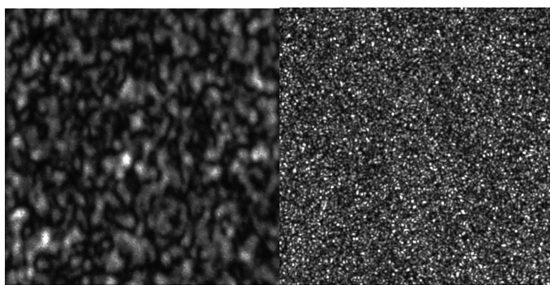
(a) Diffuser<sub>2</sub> 振动 (b) Diffuser<sub>1</sub> 振动(a) Vibration of diffuser<sub>2</sub> (b) Vibration of diffuser<sub>1</sub>图 4 Diffuser<sub>2</sub> 上的散斑图样

Fig. 4 Photos of speckle patterns observed on diffusers

后一种情况中,需进一步证实以某一频率振动 Diffuser<sub>1</sub> 在粗糙颗粒已经“完全”消失时,Diffuser<sub>2</sub> 上的闪烁颗粒仍然存在的原因。依据实验装置所设置的参数从理论上算得:Diffuser<sub>1</sub> 上 5 mm 的光斑通过自由空间传播至 Diffuser<sub>2</sub> 处,横向散斑颗粒的平均大小为  $S = 1.22\lambda z/D$ 。其中, $\lambda$  为入射光中心波长, $d$  和  $z$  分别为用于照射散射片表面的有效光源直径和两散射片之间的距离。 $S$  为  $129.8 \mu\text{m}$ ,约为 23 pixel,于是仍保持 Diffuser<sub>2</sub> 静止,并使 Diffuser<sub>1</sub> 以步进为 0.2 mm 沿垂直于光轴方向单步运动,在 2 cm 距离内获得 100 帧独立散斑图样并叠加,叠加结果与图 4(b) 中的散斑图样基本相同。由此可知,在 Diffuser<sub>1</sub> 运动的过程中,CCD Camera 仅对 30 ms 内强度涨落不断变化的多帧散斑图样进行了时间积分,并没有改变其光的相干性;故 Diffuser<sub>2</sub> 上虽然呈现光强分布均匀的图样,但其光仍具有一定的相干性,因此在 Diffuser<sub>2</sub> 表面仍能观察到闪烁的精细散斑颗粒。

### 3 复合散斑的表征原理

根据 Goodman 的理论<sup>[10]</sup>,复合散斑是由第一个散射片上的一个散斑元胞的光强照射第二个散射片上时,产生了一个服从负指数统计分布的散斑图样所致。但在实际应用中,一般不用一个散斑元胞照射后面的光学元件,那样会产生相当可观的光损。常用第一个散射片上的整个散斑图样照射第二个散射片,这样会有  $N$  个散斑之和照射到散射片上。由于这些散斑来自散射片的不同区域,假设这  $N$  个散斑完全独立且平均强度为  $\bar{I}$ ,则散射片上强度服从  $\Gamma$  密度分布:

$$P_I(I) = \frac{2N^{\frac{N+2}{2}}}{\Gamma(N)} \left(\frac{I}{\bar{I}}\right)^{\frac{N-1}{2}} K_{N-1} \left(2\sqrt{\frac{NI}{\bar{I}}}\right), \quad (1)$$

这里: $\Gamma(N) = (N-1)!$ , $K_N(\cdot)$  是  $N$  阶第二类修正贝塞尔函数。实际上探测器所探测到的强度不是空间一点上的强度,而是将探测强度在一个有效探测面上积分的结果。若用  $M$  表示单位探测面上探测到的散斑的平均数量,则探测到的散斑统计服从  $M$  阶  $\Gamma$  分布,强度的密度函数为:

$$P_I(I) = \frac{2(MN)^{\frac{N+M}{2}}}{\Gamma(M)\Gamma(N)} \left(\frac{I}{\bar{I}}\right)^{\frac{M+N-2}{2}} K_{|N-M|} \left(2\sqrt{\frac{NMI}{\bar{I}}}\right). \quad (2)$$

这类复合散斑图样的  $q$  阶矩由下式描述:

$$\begin{aligned} \bar{I}^q &= \int_0^{\infty} I^q P_I(I) dI = \\ & \int_0^{\infty} I^q \frac{2(MN)^{\frac{N+M}{2}}}{\Gamma(M)\Gamma(N)} \left(\frac{I}{\bar{I}}\right)^{\frac{M+N-2}{2}} K_{|N-M|} \left(2\sqrt{\frac{NMI}{\bar{I}}}\right) dI = \\ & \left(\frac{\bar{I}}{MN}\right)^q \frac{\Gamma(M+q)\Gamma(N+q)}{\Gamma(M)\Gamma(N)}. \end{aligned} \quad (3)$$

则复合散斑的强度的标准偏差与平均值之比,即其对比度为:

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} = \frac{\sqrt{\bar{I}^2 - \bar{I}^2}}{\bar{I}} = \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{M} + \frac{1}{NM}}. \quad (4)$$

当第一个散射片上仅有一个散斑元胞照射第二个散射片,产生的散斑元胞足够大,使得有效探测面仅探测到了一个散斑元胞,也就是  $N=1, M=1$ ,这时测得的散斑对比度达到最大值,  $C=\sqrt{3}$ ;当有无穷多个独立散斑之和照射第二个散射片,而单位探测面上只能探测到有限个散斑时,即

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{measured}}^2 &= \frac{1}{A_D^2} \iint_0^{\infty} \iint_0^{\infty} D(x_1, y_1) D(x_2, y_2) \overline{I(x_1, y_1) I(x_2, y_2)} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 = \\ & \frac{\bar{I}^2}{A_D^2} \iint_0^{\infty} K_D(\Delta x, \Delta y) d\Delta x d\Delta y + \frac{\bar{I}^2}{A_D^2} \iint_0^{\infty} K_D(\Delta x, \Delta y) |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y, \end{aligned} \quad (7)$$

其中:  $K_D$  是函数  $D(x, y)$  的确定性的自相关函数,函数  $\mu_A$  是散斑图样的场统计自相关函数。

检测到的散斑图样的强度的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{I_{\text{measured}}}^2 &= \bar{I}_{\text{measured}}^2 - \bar{I}_{\text{measured}}^2 = \\ & \frac{\bar{I}^2}{A_D^2} \iint_0^{\infty} K_D(\Delta x, \Delta y) |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y. \end{aligned} \quad (8)$$

这里:

$$M = \left( \frac{1}{A_D^2} \iint_0^{\infty} K_D(\Delta x, \Delta y) |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y \right)^{-1}. \quad (9)$$

一般情况下,探测器的面积比散斑的平均尺寸大很多,即函数  $K_D(\Delta x, \Delta y)$  比函数  $|\mu_A(\Delta x, \Delta y)|$  宽很多,因此,可以将  $K_D(0, 0)$  提出积分,得到有效测量面积  $A_m = A_D^2 / K_D(0, 0)$ ,散斑强度的相关面积为:

$$A_c = \iint_0^{\infty} |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y. \quad (10)$$

则有:

$$M = \frac{A_m}{A_c}. \quad (11)$$

$N \rightarrow \infty$  时,  $C = 1/\sqrt{M}$ ; 当  $N$  有限,  $M \rightarrow \infty$  时,  $C = 1/\sqrt{N}$ 。

对于有限大小的均匀探测器,检测到的散斑图样的强度为:

$$I_{\text{measured}} = \frac{1}{A_D} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} D(x, y) I(x, y) dx dy, \quad (5)$$

其中:  $D(x, y)$  表示探测器的光电灵敏度在空间的分布。在其灵敏区内,  $D(x, y) = 1$ ; 在其灵敏区外,  $D(x, y) = 0$ 。  $A_D$  是探测器的面积,  $A_D = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} D(x, y) dx dy$ 。  $I(x, y)$  是被测散斑图样的强度分布。

检测到的散斑图样的平均强度为:

$$\bar{I}_{\text{measured}} = \frac{1}{A_D} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} D(x, y) \bar{I} dx dy = \bar{I}, \quad (6)$$

其中:  $\bar{I}$  是被测散斑图样的平均强度。

散斑强度  $I_{\text{measured}}$  的二阶矩:

对于给定的像点,形成该像点的场强由屏幕上不同区域的散射独立贡献组成。实验中可以近似为在屏幕上的一个成像分辨基元内有  $M$  个独立散斑,即:

$$M \approx \left( \frac{R}{S} \right)^2, \quad (12)$$

式中:  $R = 1.22\lambda F/\#$ ,  $F/\#$  为成像镜头的  $F$  数,  $S$  为独立散斑的平均大小,  $M$  表示散射表面有多少个相关面积对探测到的光强做出了贡献。

## 4 影响复合散斑特性的参数分析

实验装置如图 1 所示。实验中,根据 Nyquist 定理,将 Camera 的  $F$  数设置为  $16^{[13]}$ ; 因线性 CCD,应将 Camera 的伽玛值设置为 1; 根据人眼的积分时间,将 Camera 的曝光时间设置为  $1/30$  s; Camera 始终保持在成像距离 25 cm 处获取散斑图像。

### 4.1 Diffuser<sub>1</sub> 上光斑大小对复合散斑的影响

通过在 Diffuser<sub>1</sub> 后紧贴一光阑控制照射

Diffuser<sub>2</sub> 的光斑直径  $d$  从 3 mm 增大到 15 mm, Diffuser<sub>1</sub> 与 Diffuser<sub>2</sub> 之间的距离  $z$  保持 50 cm 不变,则被 Diffuser<sub>1</sub> 散斑化的光照射到 Diffuser<sub>2</sub> 上产生的散斑颗粒的平均大小从 108.17  $\mu\text{m}$  减小到 21.63  $\mu\text{m}$ 。因 Camera lens 的分辨基元  $R$  为 10.38  $\mu\text{m}$ ,它小于散斑颗粒的平均大小,故仅有来自散射面的一个散斑对特定像点做出贡献,即  $M=1$ ,根据式(4)可知, $C=\sqrt{2/N+1}$ 。

Diffuser<sub>1</sub> 上光斑直径与复合散斑图像对比度之间的关系如图 5 所示,曲线拟合满足: $C=-1.384d^{-2}+1.466d^{-1}+0.9162$ 。这是因为光斑大小一定的光源经过 Diffuser<sub>1</sub> 后,Diffuser<sub>1</sub> 上不同位置处散斑的相位随机变化,且相邻散斑之间具有一定相关性,存在一定距离的散斑可能完全独立;故随着 Diffuser<sub>1</sub> 上的光斑直径  $d$  变大,照射到 Diffuser<sub>2</sub> 上的独立散斑数量相对增加,即  $N$  值增大, $C$  必然会减小,且趋向 1,这与图 5 中实际测得的对比度值吻合。

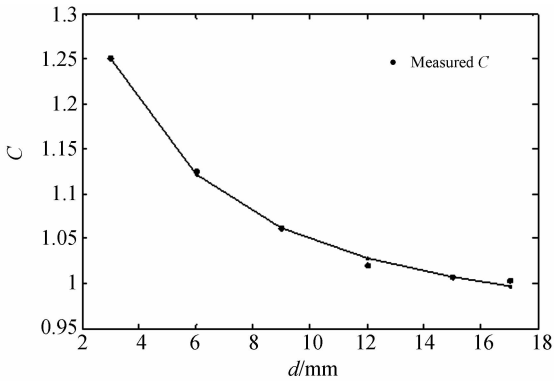


图 5 Diffuser<sub>1</sub> 上光斑直径  $d$  对复合散斑图像对比度的影响

Fig. 5 Dependence of light spot diameter on contrast of compound speckle patterns on diffuser<sub>1</sub>

#### 4.2 Diffuser<sub>1</sub> 与 Diffuser<sub>2</sub> 间距对复合散斑的影响

通过在 Diffuser<sub>1</sub> 后紧贴一光阑控制照射 Diffuser<sub>2</sub> 的光斑直径  $d$  为 15 mm,调整 Diffuser<sub>1</sub> 与 Diffuser<sub>2</sub> 之间的距离  $z$  从 20 mm 逐渐增大到 1 350 mm,Diffuser<sub>2</sub> 上散斑颗粒的平均大小从 0.865  $\mu\text{m}$  增大到 58.41  $\mu\text{m}$ ,同时照射到 Diffuser<sub>2</sub> 上的独立散斑数量减小,即  $N$  变小。当  $z < 300$  mm 时,其散斑的平均大小小于 Camera lens 的分辨基元,这时会有来自散射面的多个散斑对特定像点做出贡献,即  $M > 1$ ;当  $z \geq 300$  mm 时,其散

斑的平均大小总是大于 Camera lens 的分辨基元,故仅有一个散斑对特点像点做贡献。即  $M=1$ 。综合上述分析,根据式(4),当  $z < 300$  mm 时,复合散斑对比度值小于 1;当  $z \geq 300$  mm 时,复合散斑对比度值随  $z$  的增大而趋于  $\sqrt{3}$ ,且总大于 1。由图 6 实验可知, $z$  为 300 mm 和 450 mm 处的结果小于理论分析值,这可能是因 Diffuser 具有一定退偏特性所致。根据实验结果得到散斑对比度与两散射片之间的距离满足拟合曲线: $C=3.959 \times 10^{-8} z^2 + 9.336 \times 10^{-5} z + 0.9293$ 。

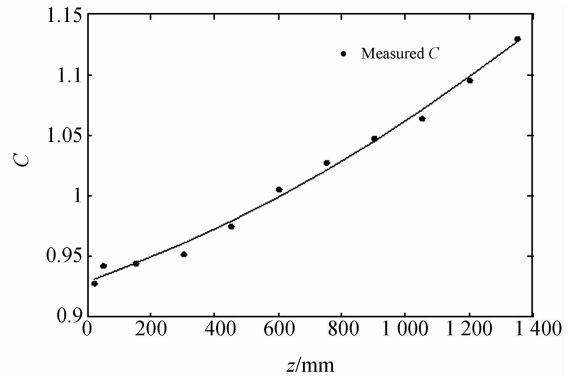


图 6 两个散射片之间的距离对复合散斑图像对比度的影响

Fig. 6 Effect of distance between two diffusers on contrast of compound speckle patterns

#### 4.3 Diffuser<sub>2</sub> 上散斑大小对其表面精细颗粒大小的影响

根据文献[14],Diffuser<sub>2</sub> 表面精细颗粒的散斑图像可采用 Camera 对 Diffuser<sub>2</sub> 离焦获得。实验中,在改变两散射片之间距离的同时,本文选择了 Camera 镜头紧贴 Diffuser<sub>2</sub>、Camera 距离 Diffuser<sub>2</sub> 分别离焦 50 cm 和 100 cm 3 种情况来获取 Diffuser<sub>2</sub> 表面精细颗粒的散斑图像。尽管两散射片之间距离的增加使得 Diffuser<sub>2</sub> 上粗糙散斑颗粒尺寸呈线性增大;但由于 Camera 处于完全离焦状态,Diffuser<sub>2</sub> 上粗糙散斑颗粒无法成像在 CCD 上,这时通过 CCD Camera 获得的散斑均是以 Diffuser<sub>2</sub> 上的光斑为扩展光源,经 Camera lens 后到达 CCD 发生干涉的结果,Diffuser<sub>2</sub> 上光斑的变化并没有影响到它表面精细颗粒的大小,而且 3 种离焦状态下测得的散斑对比度值基本相同。在不考虑随机噪声对测试结果的影响下,测

得 Diffuser<sub>2</sub> 表面精细颗粒的平均大小约为 2.4 个 CCD 像素,散斑图像对比度约为 0.89,如图 7 所示。

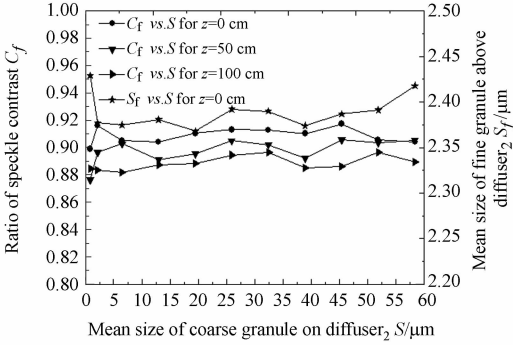


图 7 Diffuser<sub>2</sub> 上散斑颗粒大小对 Diffuser<sub>2</sub> 表面精细颗粒的散斑图像的对比度及其大小的影响

Fig. 7 Dependence of mean size of coarse granule on diffuser<sub>2</sub> on contrast of speckle patterns and mean size of speckle granule above diffuser<sub>2</sub>

### 5 复合散斑的统计模型建立

实验过程见 4.2 节,只是在改变两散射片之间距离的过程中,将 Diffuser<sub>2</sub> 固定在振动台上,由激振器的振动带动 Diffuser<sub>2</sub> 以 10 Hz 频率振动,消除 Diffuser<sub>2</sub> 表面精细颗粒,使得 CCD Camera 仅能得到 Diffuser<sub>2</sub> 上粗糙散斑颗粒的图像,每帧散斑图像的对比度值如图 8 所示。图 8 中还列有图 6 和图 7 中所测试的复合散斑和精细散斑图像的对比度。由前面分析可知,复合散斑是由 Diffuser<sub>2</sub> 上粗糙颗粒、Diffuser<sub>2</sub> 表面精细颗粒以及这两种颗粒的叠加构成。本文进一步对图 8 中这 3 种散斑的统计特性进行研究,发现这 3 种散斑图像的统计特性满足下列模型:

$$C = \alpha C_c + (1 - \alpha)C_f + \beta C_c C_f, \quad (13)$$

其中: $\alpha$  和  $\beta$  分别为粗糙颗粒与精细颗粒所占比重。由上述分析可判断, $\alpha$  取 0.5~1, $\beta$  取 0~1,其值与屏幕的退偏特性有关。 $C$ 、 $C_c$  和  $C_f$  分别为复合散斑图像、粗糙散斑颗粒图像和精细散斑颗粒图像的对比度。根据实验结果拟合求得参数  $\alpha=0.764 5$  和  $\beta=0.304 3$ ,拟合曲线见图 9。

为了验证所述模型的可行性,实验将 Diffus-

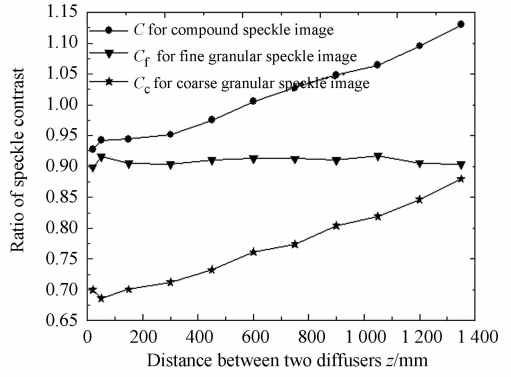


图 8 两个散射片之间的距离对 3 种散斑图像对比度的影响

Fig. 8 Dependence of contrast of three kinds of speckle image on distance between two diffusers

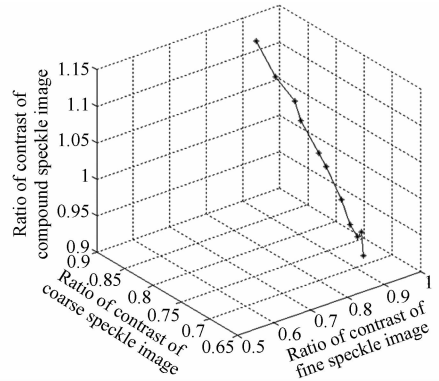


图 9 不同距离下粗糙散斑颗粒对复合散斑图像的贡献  
Fig. 9 Contribution of coarse speckle granule to compound speckle image at different distances

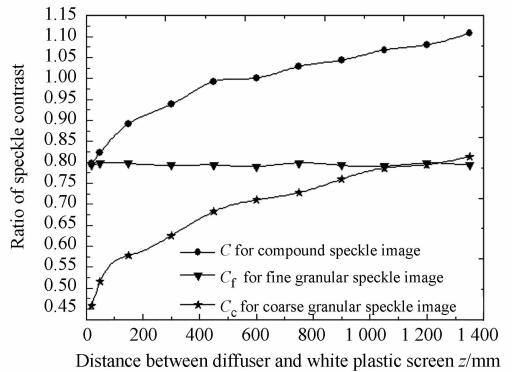


图 10 散射片和白塑屏之间的距离对 3 种散斑对比度的影响

Fig. 10 Dependence of distance between diffuser and white plastic screen on contrast of three kinds of speckle image

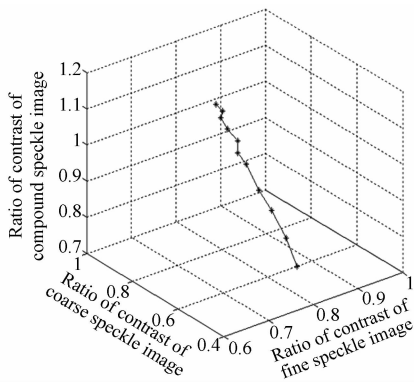


图 11 不同距离下粗糙散斑颗粒对复合散斑图像的贡献

Fig. 11 Contribution of coarse speckle granule to compound speckle images at different distances between diffuser and white plastic screen

$er_2$  换成白塑屏,其它装置和设置不变,重复上述实验过程,测得3种散斑图像的对比度见图10。拟合参数  $\alpha=0.5153$  和  $\beta=0.4558$ ,拟合曲线见图11。

## 参考文献:

- [1] ROELANDT S, MEURET Y, CRAGGS G, *et al.*. Standardized speckle measurement method matched to human speckle perception in laser projection systems [J]. *Opt. Express.*, 2012, 20(8): 8770-8783.
- [2] CONSIDINE P S. Effect of coherence on imaging [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, 56:1001-1009.
- [3] DAINTY J C. Some statistical properties of random speckle patterns in coherent and partially coherent illumination [J]. *Opt. Acta*, 1970, 17:761-772.
- [4] OHTSUBO J, ASAKURA T. Statistical properties of the sum of partially developed speckle patterns [J]. *Opt. Lett.*, 1977, 1:98-100.
- [5] DONATI S, MARTINI G. Speckle-pattern intensity and phase: second-order conditional statistics [J]. *JOSA*, 1979, 69(12):1690-1694.
- [6] TIZIANI H J. *Physical Properties of Speckles in Speckle Metrology* [M]. New York: Academic Press Inc., 1978:5-9.

由图9与图11中各散斑图像对比度之间的关系可以判断,复合散斑不是由屏幕上粗糙散斑颗粒和屏幕表面精细散斑颗粒简单的强度叠加。根据系统实验结果的拟合参数可知,复合散斑的统计信息中一般含有粗糙散斑颗粒的比重比精细散斑颗粒的比重大,这一结论印证了复合散斑的形成过程。

## 6 结 论

本文以光学系统中存在散射片的激光投影系统为研究对象简化了光学系统,理论与实验相结合详细地分析了复合散斑的形成机理和表征方法。在散斑对比度分析法的基础上,为改变参数  $N$  与  $M$ ,调整入射光的光斑直径和散射片之间的距离,并利用实验数据建立了它们与复合散斑对比度之间的函数关系。基于复合散斑由粗糙颗粒与精细颗粒构成,通过统计分析建立了它们在统计上对复合散斑对比度的贡献模型,为开展激光投影系统中复合散斑的抑制奠定了基础。

- [7] OUYANG G, TONG Z, AKRAM M N, *et al.*. Speckle reduction using a motionless diffractive optical element [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2852-2854.
- [8] AKRAM M N, TONG Z, OUYANG G M, *et al.*. Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(17):3297-3304.
- [9] 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.
- [9] TIAN ZH H, LIU W Q, LI X, *et al.*. Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1366-1370. (in Chinese)
- [10] GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics Theory and Application* [M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007.
- [11] HANSON S G, JAKOBSEN M L, HANSEN R S, *et al.*. Compound speckles and their statistical and dynamical [J]. *SPIE*, 2008, 7008:70080M1-8.
- [12] TONG ZH M, CHEN X Y, AKRAM M N, *et al.*. Compound speckle characterization method and re-

duction by optical design [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(3):132-137.

- [13] XU M F, SHI Y B, TANG G X, *et al.*. Speckle characterization in laser projector display [J]. *International Journal of Engineering and Physical*

*Sciences*, 2012, 6:233-236.

- [14] KURATOMI Y. Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, 27(8): 1812-1817.

#### 作者简介:



**徐美芳**(1974—),女,湖北监利人,博士研究生,讲师,2005年于中北大学获得硕士学位,主要从事激光投影显示与激光散斑抑制方面的研究。E-mail: xmf0129@nuc.edu.cn



**高文宏**(1977—),男,黑龙江双鸭山人,博士,工程师,2012年于北京理工大学获得工学博士学位,主要从事激光散斑消除技术的研究。Email: wangweibiao2008@163.com



**王维彪**(1986—),男,山西祁县人,工学学士,助理工程师,2010年于山东师范大学获得学士学位,主要从事激光显示与LD制冷系统性能改进等方面的开发应用工作。Email: wangweibiao.2008@163.com



**石云波**(1972—),男,山西垣曲人,副教授,硕士生导师,2003年于中北大学获得硕士学位,主要从事MEMS技术与系统集成技术的研究。E-mail: shiyunbo@nuc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)