

多孔掩模对统计独立散斑图像形成的影响分析

徐美芳¹, 丁俊文², 胡 鹏¹, 王浩全², 王冠军¹

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 基于叠加统计独立散斑图像的散斑抑制原理, 设计了一个具有 N 个透光孔的掩模板, 将其放置于成像透镜出瞳面上, 理论研究了产生统计独立散斑图像所需的条件。在简化光学系统中, 将散射片与探测面分别置于透镜成像共轭面上, 通过系统实验, 分析了多孔掩模板上相邻两个透光孔的不同中心间距以及单个透光孔孔径对统计独立散斑图像形成的影响, 其中单个透光孔孔径也会影响散斑颗粒的大小。在不考虑实验装置对测试精度的影响下, 实验结果与理论分析吻合。

关键词 激光光学; 激光投影; 激光散斑; 多孔掩模; 统计独立散斑图像

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0101005

Affects of Mutli-Apertures Mask on Formation of Statistically Independent Speckle Image

Xu Meifang¹, Ding Junwen², Hu peng¹, Wang Haoquan², Wang Guanjun¹

¹The Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Based on the speckle suppression theory of the superimposed statistically independent speckle image, a mask with N apertures is designed. It is placed in the pupil plane of the imaging lens. Required conditions of producing the statistically independent speckle images are studied theoretically. In the simplified optical system, diffuser and the detection plane of the CCD are placed on the conjugate imaging planes of the lens, respectively. The effects of the center spacing between the adjacent apertures and the single aperture diameter on the formation of statistically independent speckle image are experimentally analyzed. Diameter of the single aperture has an effect on the speckle particle size. Without considering the impact of the experimental apparatus on the measured accuracy, the experimental results agree with the theoretical analysis.

Key words laser optics; laser projection; laser speckle; mutli-apertures mask; statistically independent speckle image

OCIS codes 140.7300; 120.3180; 120.6150

1 引言

激光具有色域广、功耗低、寿命长和体积小等优点, 它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散斑^[2], 这一点严重阻碍着激光投影显示的商业化进程。

大量国内外文献都是基于叠加不相关或统计独立散斑图像的散斑抑制原理, 在光强上进行空间或时间

收稿日期: 2016-08-29; 收到修改稿日期: 2016-09-23

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

作者简介: 徐美芳(1974—), 女, 博士, 讲师, 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。

E-mail: xmf0129@nuc.edu.cn

积分平均实现散斑抑制。通过何种方法产生统计独立散斑图像是该原理的研究关键点,如旋转散射体^[3]、振动多模光纤^[4]、屏幕^[5]、衍射光学元件^[6]、透镜或透镜阵列^[7]、45°直角棱镜^[8]、扫描微镜^[9]、光通管^[10]和频旋转复面镜^[11]等。上述方法均是采用运动方案来实现的,这对于系统的稳定性、一致性和微/小型化都是挑战。

本文在保持原有激光投影显示系统光路的基础上,为便于理论和实验的分析与计算,将光学系统简化,仅保留成像透镜和用于匀光或配合消散斑的散射片,将一个多孔掩模板置于成像透镜出瞳面上,通过研究多孔掩模板中孔的大小和相邻两孔中心间距对统计独立散斑图像形成的影响,确定静态实现两个强度上统计相互独立散斑图像的基本条件,为实现非运动式激光散斑抑制方案提供新的思路。

2 由多孔掩模产生的散斑的统计特性

经扩束的激光束照射在散射片上,形成的散斑图像由透镜成像在 x - y 平面内,置于成像透镜出瞳面上的多孔掩模板位于 u - v 平面内,透镜离散射片和 CCD 成像平面的距离分别为 Z_0 和 Z_C ,如图 1 所示。

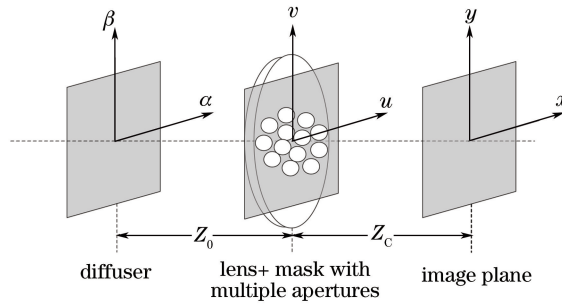


图 1 多孔掩模影响激光散斑的原理示意图

Fig. 1 Schematic of the effect of mask with multiple apertures on the laser speckle

对于具有 N 个透光孔的掩模板,CCD 探测面上散斑图像的强度分布 $I(x, y)$ 为

$$I(x, y) = |A(x, y)|^2 = \sum_{n=1}^N |A_n(x, y)|^2 + 2 \sum_{n, m=1, n < m}^N \text{Re}[A_n(x, y)A_m^*(x, y)], \quad (1)$$

式中 $A_n(x, y)$ 表示由第 n 个透光孔的光瞳函数 $k_n(u, v)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 所得到的图像的复振幅函数, $\text{Re}[\cdot]$ 为取实部函数。

CCD 探测面上散斑图像中任意两点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 之间的强度的互相关函数为

$$R_I(\Delta x, \Delta y) = \langle I(x_1, y_1)I(x_2, y_2) \rangle, \quad (2)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示取综述平均, $(\Delta x, \Delta y) = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$ 。

根据 Goodman 理论^[2],激光经散射片形成的完全散射散斑场遵从圆形复值高斯统计,然后经透镜并由掩模板上 N 个透光孔透射后在 CCD 上得到的 N 个不相关的圆形复值高斯散斑场的叠加也满足相同的统计特性。同时不同透光孔接收到的是来自散射片的散射波角谱的不同分量,故通过不同透光孔的散射波的复振幅是彼此统计独立的,这一点已由 Angel 等^[12]证实,即对于 $n, m = 1, 2, \dots, N$ 且 $n \neq m$, 有 $\langle A_n(x, y)A_m^*(x, y) \rangle \equiv 0$ 。基于这一点,由(1)式可知 CCD 探测面上获得的散斑图像的平均强度为

$$\langle I(x, y) \rangle = \sum_{n=1}^N \langle |A_n(x, y)|^2 \rangle, \quad (3)$$

可见,(1)式中的干涉项具有零均值。

对于圆形复值高斯散斑场,其强度相关 $R_I(\Delta x, \Delta y)$ 与场相关 $R_A(\Delta x, \Delta y)$ 通过

$$R_I(\Delta x, \Delta y) = \langle I \rangle^2 [1 + |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2] \quad (4)$$

相联系^[13],其中复相干因子 $\mu_A(\Delta x, \Delta y)$ 定义为

$$\mu_A(\Delta x, \Delta y) = \frac{R_A(\Delta x, \Delta y)}{\langle I \rangle}. \quad (5)$$

根据范西特-泽尼克定理,CCD 探测面上散斑图像场的复振幅的自相关函数正好是掩模板后强度分布

的傅里叶变换,即

$$R_A(\Delta x, \Delta y) = \langle A(x_1, y_1)A^*(x_2, y_2) \rangle = \frac{K}{(\lambda Z_C)^2} \mathcal{F}\{|P(u, v)|^2\} \left(\frac{\Delta x}{\lambda Z_C}, \frac{\Delta y}{\lambda Z_C} \right), \quad (6)$$

式中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示双边傅里叶变换, K 是常数因子^[14]。假设 CCD 探测到的散斑图像是由掩模板上大小完全相同的透光孔所产生, 则各透光孔的光瞳函数 $k_n(u, v)$ 可认为是由单孔函数 $k(u, v)$ 在 $u-v$ 平面内平移不同位移所得, 即 $k_n(u, v) = k(u - u_n, v - v_n)$, 其中 (u_n, v_n) 表示第 n 个透光孔的常位置矢量 ($n = 1, 2, \dots, N$)。则多孔掩模板上透光孔的函数为

$$|P(u, v)|^2 = \sum_{n=1}^N |k_n(u - u_n, v - v_n)|^2. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式, 并利用傅里叶变换的平移特性, 可得

$$R_A(\Delta x, \Delta y) = R_0(\Delta x, \Delta y) \sum_{n=1}^N \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda Z_C} (u_n \Delta x + v_n \Delta y) \right], \quad (8)$$

其中,

$$R_0(\Delta x, \Delta y) = \langle A_0(x_1, y_1)A_0^*(x_2, y_2) \rangle = \frac{K}{(\lambda Z_C)^2} \mathcal{F}\{|k(u, v)|^2\} \left(\frac{\Delta x}{\lambda Z_C}, \frac{\Delta y}{\lambda Z_C} \right), \quad (9)$$

式中 $A_0(x, y)$ 表示使用单孔 $k(u, v)$ 时在 (x, y) 处获得的散斑场的复振幅函数。由(8)式和(5)式可知, 平均强度 $\langle I \rangle$ 为

$$\langle I \rangle = R_A(0, 0) = NR_0(0, 0) = N \langle I_0 \rangle, \quad (10)$$

其中 $\langle I_0 \rangle = R_0(0, 0)$ 是(3)式的特殊情况, 为来自掩模板上单个透光孔中出射的光波在 CCD 接收面上产生的散斑图像的平均强度。由 N 个透光孔所产生的散斑图像的平均强度均相同。

将(8)式和(10)式代入(5)式中, 整理可得

$$|\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 = \frac{1}{N^2 \langle I_0 \rangle^2} |R_0(\Delta x, \Delta y)|^2 \times \left\{ N + 2 \sum_{\substack{n, m=1 \\ n < m}}^N \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda Z_C} [(u_n - u_m)\Delta x + (v_n - v_m)\Delta y] \right\} \right\}. \quad (11)$$

对于直径为 D 的圆形透光孔, $R_0(\Delta x, \Delta y)$ 为

$$R_0(\Delta x, \Delta y) = \langle I_0 \rangle 2 \left\{ J_1 \left[\frac{\pi D \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{\lambda Z_C} \right] \right\} \left/ \left[\frac{\pi D \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{\lambda Z_C} \right] \right., \quad (12)$$

其中 $J_1(\cdot)$ 为一阶 Bessel 函数,

$$\langle I_0 \rangle = R_0(0, 0) = \frac{K}{(\lambda Z_C)^2} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2. \quad (13)$$

由(12)式分析得出, 激光束经多孔掩模调制后在 CCD 上形成的散斑图像中散斑颗粒的平均大小由单个透光孔所形成的散斑场的相关函数 $R_0(\Delta x, \Delta y)$ 的半峰全宽处的宽度来量度, 约为 $1.22\lambda Z_C/D$, 而与透光孔在 $u-v$ 平面内的位置无关。对(11)式分析可知, 对于 $n, m = 1, 2, \dots, N$ 且 $n \neq m$ 的透光孔对 $k(u - u_n, v - v_n)$ 和 $k(u - u_m, v - v_m)$, 来自它们的两束光之间发生干涉的特性取决于 $\cos(\cdot)$, 所产生的干涉条纹的平均空间周期为 $\Delta_{nm} = \lambda Z_C/d_{nm}$, 其中 $d_{nm} = \sqrt{(u_m - u_n)^2 + (v_m - v_n)^2}$ 。

对于一个具有直径为 D , 中心间距为 d 的两个相邻圆形透光孔的掩模板, (11)式简化为

$$|\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 = \frac{1}{N^2 \langle I_0 \rangle^2} \times |R_0(\Delta x, \Delta y)|^2 \left[2 + 2\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda Z_C} d \Delta x \right) \right]. \quad (14)$$

(14)式表明, 这一对透光孔产生的干涉条纹周期为 $\lambda Z_C/d$ 。当增大两个透光孔的中心间距 d 时, 一方面, 在成像面 CCD 上产生的干涉条纹的周期变小, 条纹变得密集, 且 CCD 接收面的同一点会产生不同的相位差, 可能使各个光源干涉的极大值和极小值点重合, 这样会降低干涉条纹的可见度, 从而减弱散斑图像对比度; 另一方面, 不同透光孔的光束来自散射片不同区域上散射的激光, 随着 d 的增大, 这两束光的相关性逐渐减弱, 在成像面 CCD 上记录的散斑图像是基于该散射片上两个不同区域形成的散斑图像强度叠加, 故散斑图像对比度也会降低。可见, 当相干条纹的平均周期 $\lambda Z_C/d$ 接近或小于 CCD 探测的最小分辨率 Δx_{\min} 时,

由相邻两孔产生的两个散斑图像呈现空间非相关。依此不难推出:具有 N 个透光孔的掩模板上任意相邻两个透光孔的中心间距只要满足 $d_{min} \geq \lambda Z_C / \Delta x_{min}$, N 个统计独立散斑图像则可产生,这 N 个散斑图像在 CCD 探测面上是基于强度叠加而产生的。如果将该掩模板放置于投影镜头出瞳面,则可使散斑图像对比度降至原来的 $1/\sqrt{N}$ 倍^[2]。

3 影响两个独立散斑图像的参数分析

3.1 实验平台

根据上述理论,搭建实验平台如图 2 所示。实验中利用 32 mW、出射光斑直径为 0.2 mm 的绿色固态激光器(峰值波长 $\lambda = 532$ nm)作为光源,通过光束扩展器扩束,用光圈挡住部分杂散光,并将投射到散射片上的光斑直径控制在 7 mm,光经散射片透射散射后,由透镜将散射片上的光斑清晰成像在 CCD(Texas Instruments DMK-21BU04)探测面上。透镜距离散射片 12 cm,焦距为 50 mm,有效孔径为 25 mm,且出瞳面上放置有多孔掩模板。CCD 的空间分辨率为 640 pixel \times 480 pixel,单个像素大小为 5.6 $\mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$ 。

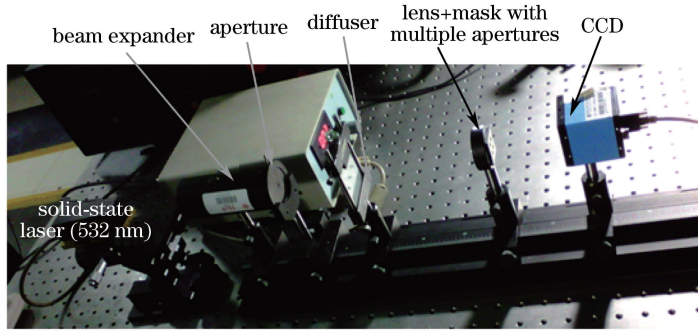


图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental setup

3.2 统计独立散斑图像对掩模板上相邻两个透光孔的中心间距和单个透光孔孔径的依赖

实验中,对于孔径 D 均为 2 mm 的两个圆形透光孔,调节双孔中心间距 d 从 3 mm 到 9 mm 之间变化,改变步长为 1 mm,CCD 记录的部分散斑图像如图 3 所示。对各散斑图像运用公式 $C = \sigma / \langle I \rangle$ (σ 为散斑图像的方差, $\langle I \rangle$ 为散斑图像的平均强度) 来计算其对比度,结果如图 4。

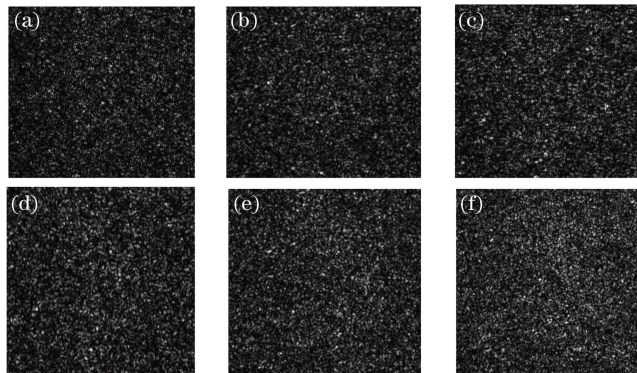


图 3 孔径为 2 mm 的两个透光孔之间不同中心间距 d 下测得的散斑图像。(a) $d = 3$ mm; (b) $d = 4$ mm; (c) $d = 5$ mm; (d) $d = 6$ mm; (e) $d = 7$ mm; (f) $d = 8$ mm

Fig. 3 Speckle images for different d between the two apertures with the diameter of 2 mm. (a) $d = 3$ mm; (b) $d = 4$ mm; (c) $d = 5$ mm; (d) $d = 6$ mm; (e) $d = 7$ mm; (f) $d = 8$ mm

从图 3 中散斑图像内各个散斑颗粒上因双孔产生的干涉条纹的清晰程度可以看出,随着 d 的增大,干涉条纹空间周期变小,可见度变弱,而单个透光孔孔径远大于入射波波长,因此很难从散斑图像中观察到明显的衍射现象。其中,图 3(a)~(c) 的散斑图像中干涉现象较明显,而图 3(e) 和 3(f) 中基本观察不到干涉现

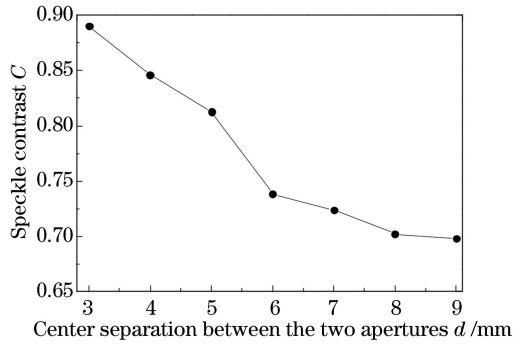


图 4 两个孔径为 2 mm 的透光孔之间不同中心间距 d 对应的散斑图像的对比度

Fig. 4 Speckle contrast corresponding to different d between the two apertures with the diameter of 2 mm

象,这一点也可以由图 4 中对应于不同中心间距的散斑图像的对比度得到证实。根据 Goodman 理论^[2],由单个散射片产生的完全散射散斑图像的对比度约为 1。如果两个散斑图像之间存在某种程度的退相关,那么在强度基础上叠加时,散斑图像的对比度会显著减小。图 4 中测试结果表明,随着相邻两个透光孔中心间距从 3 mm 增大到 9 mm,散斑图像对比度从 0.89 降低到 0.698,这也正好可以说明:由掩模板上两个透光孔截取的来自散射片不同区域的光所形成的散斑图像的相关程度随着散射片上不同区域之间间距的增大逐渐减弱。于是,可通过调节透镜出瞳面内掩模板上的透光孔之间的间距来获得统计独立的散斑图像。由图 4 中的结果可以看出,当两个透光孔之间间距大于或等于 8 mm 时,散斑图像对比度约为 0.70,且趋于稳定。可见,此时由两个透光孔所形成的两个散斑图像是统计独立的。

将两个透光孔的孔径增大到 4 mm 后, d 从 6 mm 增加到 11 mm,CCD 探测器记录的散斑图像的对比度显示在图 5 中。结果表明:当 d 大于或等于 9 mm 时,经这两个透光孔所形成的散斑图像是统计独立的。进一步增大透光孔的孔径为 6 mm 和 8 mm,结果发现它们分别构成的透光孔对的中心间距为 8 mm 和 10 mm 时,测试散斑图像的对比度分别为 0.67 和 0.602。该结果不仅说明通过它们形成的散斑图像是统计独立的,而且还存在着显著的空间平均现象。

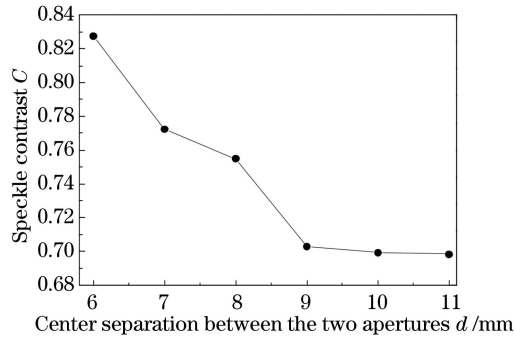


图 5 两个孔径为 4 mm 的透光孔之间不同中心间距 d 对应的散斑图像的对比度

Fig. 5 Speckle contrast corresponding to different d between the two apertures with the diameter of 4 mm

采用文献[15]中(1)式计算透光孔孔径 D 分别为 2, 4, 6, 8 mm 时所形成的散斑图像内散斑颗粒的平均大小,记录在表 1 中。结果表明:散斑颗粒的平均大小随 D 的增大而减小,与透光孔的数量无关,将 CCD 探测面放置在距离掩模板 3 cm 处的离焦平面上也可观察到,如图 6 所示。

表 1 不同透光孔孔径下散斑图像内散斑颗粒平均大小

Table 1 Average sizes of the speckle granules under the apertures with different diameters

Parameter	Value			
Diameter of the aperture /mm	2	4	6	8
Average size of the speckle granule / μ m	27.82	13.91	9.27	6.95

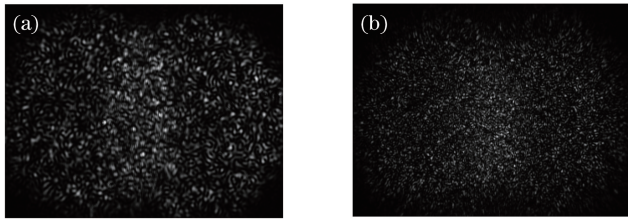


图 6 不同透光孔孔径离焦情况下观察到的散斑图像中呈现的散斑颗粒。(a) $d=2\text{ mm}, d=5\text{ mm}$; (b) $d=4\text{ mm}, d=7\text{ mm}$
 Fig. 6 Granules observed in the speckle image for the apertures with different diameters in the defocus case.

(a) $d=2\text{ mm}, d=5\text{ mm}$; (b) $d=4\text{ mm}, d=7\text{ mm}$

4 讨论与分析

理论上,不管单个透光孔的孔径多大,只要相邻两个透光孔的中心间距 $d \geq \lambda Z_c / \Delta x_{\min}$,即 $d \geq \lambda [Z_o f / (Z_o - f)] / \Delta x_{\min} = 532\text{ nm} \times [12\text{ cm} \times 5\text{ mm} / (12\text{ cm} - 5\text{ mm})] / 5.6\text{ }\mu\text{m} = 8.14\text{ mm}$,则通过这两个透光孔得到的两个散斑图像是统计独立的。本文 3.2 节中实验测试结果表明,透光孔孔径和产生两个相互独立的散斑图像的两个相邻透光孔中心间距的关系是: $D=2\text{ mm}, d \geq 8\text{ mm}$; $D=4\text{ mm}, d \geq 9\text{ mm}$; $D=6\text{ mm}, d \geq 8\text{ mm}$; $D=8\text{ mm}, d \geq 10\text{ mm}$ 。可见,在不考虑实验装置对测试精度的影响时,实验结果与理论分析基本吻合。另外,上述关系中,虽然透光孔孔径与相邻两孔中心间距之间没有明确关联性,但可看出随透光孔孔径的增大,两孔相邻边缘间距逐渐减少。说明透光孔孔径对产生独立散斑图像的相邻两孔之间的间距存在间接影响,这是因为当透光孔孔径小于 6 mm 时,散斑颗粒平均大小与 CCD 的单个像素尺寸之间的关系满足 Nyquist 定理,故 CCD 探测器记录的散斑图像不会发生空间平均;而透光孔孔径大于或等于 6 mm 时,不满足 Nyquist 定理,故 CCD 探测器记录散斑图像的过程中,在 CCD 的单个像素上散斑颗粒发生了空间平均,且随着透光孔孔径的增大,空间平均现象更加显著。尽管散斑图像是由来自散射片上较近的两个散射面的散射光形成,相关性会稍强些,但由于空间平均现象的存在,两个透光孔的中心间距仍能满足理论条件。

5 结 论

以光学系统中存在散射片的激光投影系统为研究对象,简化光学系统,基于叠加统计独立散斑图像的激光散斑抑制理论,进行了系统实验,分析了多孔掩模板中相邻两个透光孔的中心间距与单个透光孔的孔径对激光散斑特性的影响,明确了通过多孔掩模板上相邻两个透光孔产生两个统计独立散斑图像与单个透光孔的孔径大小以及相邻两个透光孔的中心间距间的关系。这一关系的确立,对于给定相邻透光孔间间距,在一定尺寸的掩模板上分布透光孔的数量就会受透光孔孔径的限制,影响多孔掩模板产生非相干散斑图像的数量,从而直接影响散斑抑制效果。这为设计多孔掩模板上最大限度布置透光孔的个数并将其应用于激光投影显示系统中进行散斑抑制提供了依据,也为开展非运动式激光散斑抑制方案提供了新的思路。

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]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8770-8783.
- [2] Goodman J W. *Speckle phenomena in optics theory and application*[M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007: 23-27.
- [3] Völker A C, Zakharov P, Weber B, *et al.* Laser speckle imaging with an active noise reduction scheme[J]. *Optics Express*, 2005, 13(24): 9782-9787.
- [4] Mehta D S, Naik D N, Singh R K, *et al.* Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal, spatial, and angular diversity[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1894-1904.
- [5] Shin S C, Yoo S S, Lee S Y, *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.
- [6] An S, Lapchuk A, Yurlov V, *et al.* Speckle suppression in laser display using several partially coherent beams[J]. *Optics Express*, 2009, 17(1): 92-103.

- [7] Yao P H, Chen C H, Chen C H. Low speckle laser illuminated projection system with a vibrating diffractive beam shaper[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16552-16566.
- [8] Bashkansky M, Reintjes J. Statistics and reduction of speckle in optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 545-547.
- [9] Akram M N, Tong Z, Ouyang G, *et al.* Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(17): 3297-3304.
- [10] Deng Q L, Lin B S, Wu P J, *et al.* A hybrid temporal and spatial speckle-suppression method for laser displays[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31062-31071.
- [11] Hao Li, Zhang Yue, Liu Weiqi, *et al.* Speckle suppression in laser display[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(10): 927-930.
郝 丽, 张 岳, 刘伟奇, 等. 激光显示中散斑的抑制[J]. *激光与红外*, 2006, 36(10): 927-930.
- [12] Angel L, Tebaldi M, Bolognini N, *et al.* Speckle photography with different pupils in a multiple-exposure scheme[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(1): 107-119.
- [13] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. 3rd ed. United States: Englewood CO Roberts & Company, 2005: 67.
- [14] Uno K, Uozumi J, Asakura T. Speckle clustering in diffraction patterns of random objects under ring-slit illumination [J]. *Optics Communications*, 1995, 114(3-4): 203-210.
- [15] Xu M F, Gao W H, Shi Y B, *et al.* Measurement settings for speckle characterization in laser displays[J]. *Lasers in Engineering*, 2015, 31(1): 53-69.