

激光投影系统中影响散斑抑制的参数分析

徐美芳^{1*} 王浩全¹ 高文宏^{1,2} 闫杰²

¹中北大学电子测试技术重点实验室, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

²山西傲维光视光电科技有限公司, 山西 太原 030032

摘要 基于激光投影显示系统中散斑形成机理,从理论上分析了影响投影系统中散斑抑制的两个关键参数,即统计独立散斑图像数量 N 和探测器成像镜头在观测屏上一个分辨基元内投影镜头分辨基元的数量 M 。参数 M 或 N 值的增大,都将有效降低散斑图像的对比度,但即使投射到屏幕上的独立散斑图像数目 N 实现巨大,即 $N \rightarrow \infty$,也只能将散斑图像对比度降至 $1/\sqrt{M}$ 。在简化投影系统中,利用旋转小散射片产生统计独立散斑图像的方法,通过系统实验,比较了同一散斑抑制技术用于激光非投影和投影系统中散斑抑制的程度,以及投影镜头 F 数和探测器成像镜头 F 数的变化对参数 M 和散斑抑制的影响。结果表明:对于相同 N 值和检测条件,投影镜头的存在使散斑图像对比度从0.146提高到了0.427,呈现的散斑更严重,且投影镜头 F 数的增大还会进一步恶化散斑图像,这使得激光投影系统的小型化受到挑战。

关键词 统计光学; 激光散斑; 投影镜头分辨率; 散斑对比度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602011

Parameters Analysis for Speckle Suppression in Laser Projection Systems

Xu Meifang¹ Wang Haoquan¹ Gao Wenhong^{1,2} Yan Jie²

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

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

Abstract Base on speckle formation mechanism in laser projection display system, two key parameters that influence speckle suppression are theoretically analyzed, namely the number N of statistically independent speckle images and the number M of projection-lens resolution elements within a single imaging-lens resolution element on the screen. The increasing value of the parameter M or N can effectively reduce the contrast of the speckle image. However, although the number N of independent speckle images projected on the screen tends to infinity, the contrast of the speckle image can only be reduced to $1/\sqrt{M}$. By using a rotating small diffuser to generate independent speckle image, the degrees of speckle suppression are experimentally compared without projection-lens and with projection-lens in simplified projection system. And the effects of the change of the F -number of the projection-lens or the F -number of the imaging-lens on the parameter M and the speckle suppression are experimentally analyzed. The results demonstrate that for the same value of N and under the same test conditions, the contrast of the speckle image increases from 0.146 to 0.427 and the speckle is more serious due to the presence of the projection-lens, and the increase of the F -numbers of the projection-lens can further deteriorate the speckle image, which will be a challenge for the miniaturization of laser projection system.

Key words statistical optics; laser speckle; projection-lens resolution; speckle contrast

OCIS codes 140.7300; 120.3180

收稿日期: 2014-12-11; 收到修改稿日期: 2015-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(61078036)、山西省自然科学基金(2011011015-2)

作者简介: 徐美芳(1974—),女,博士,讲师,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

1 引 言

激光因其具有广色域、高亮度、高对比度、长寿命等优点,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表面漫反射之后会形成散斑^[2]。散斑是影响激光显示成像质量的关键因素,因此在激光投影显示技术中,抑制散斑的技术一直是研究热点。

目前,大量国内外文献都是基于叠加不相关和统计独立散斑图像的散斑抑制原理,在光强基础上进行空间或时间平均实现散斑抑制,如偏振多样性^[3]、角度多样性^[4]、波长多样性^[5-6]以及机械振动^[7]或旋转光学元件等。当这些散斑抑制技术应用于激光投影显示系统中时,弄清不同散斑抑制方法是如何影响人眼感知的散斑,以及投影显示系统中散斑减少的程度是关键。

在激光投影显示系统中,衡量散斑的主要参数是散斑对比度,它定义为均匀照明屏幕上光强的标准方差 σ_I 与均值 \bar{I} 的比值,即 $C = \sigma_I / \bar{I}$ 。当散斑现象比较明显时, C 值较大;反之, C 将趋于零^[8];文献[9]表明,要想让人眼感觉不到图像中散斑的存在,散斑对比度值应低于4%。任何一种散斑抑制机制的实施都将对散斑对比度的降低做出贡献。如旋转毛玻璃,散斑对比度值可降低至1%^[10];将散布有纳米颗粒胶体溶液的散斑抑制装置引入光源部分,可使散斑对比度值降到3.2%^[11]、在观测屏内填充胶体分散液,散斑对比度值可接近2.6%^[12];采用空间和角度多样性原理,散斑对比度值能减少到5%^[14];使用静态衍射光学元件,散斑对比度值可降低到37%^[13]。数据表明,文献[10]至文献[12]中采用的散斑抑制技术已将散斑对比度值降低到人眼不能识别散斑的程度。遗憾的是,这些技术的评价结果皆是通过激光非投影系统测试所得,没有考虑投影镜头对散斑对比度的影响。

在实际的激光投影显示系统中,散斑的形成极为复杂。为便于理论和实验的分析与计算,将激光投影系统中形成散斑的光学系统简化,仅保留对产生散斑起关键作用的,诸多投影系统中必不可少的,并用于匀光或消散斑的光学器件,即散射片、光导管、投影镜头和屏幕。本文基于该简化光学系统,利用旋转小散射片产生统计独立散斑图像的方法,通过系统实验,比较了同一散斑抑制技术用于激光非投影和投影系统中散斑抑制的程度;研究了投影系统中影响散斑抑制的两个关键参数:统计独立散斑图样数量 N 和探测器成像镜头在观测屏上一个分辨基元内投影镜头分辨基元的数量 M ,并明确了它们对测试散斑对比度的影响。

2 影响散斑抑制的关键参数

2.1 激光显示系统中散斑的统计特性

根据 Goodman 的散斑统计理论^[8],当激光通过一个散射片透射后,来自这个散射片的已散斑化的一个散斑元胞照射到有限大小的第二个散射屏上时,会发生强度涨落和散斑涨落组合的复合效应,形成一个服从负指数统计分布的复合散斑图像。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像照射第二个散射片,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上不同区域,假设这 N 个散斑完全独立且具有相同平均强度 \bar{I} ,则散射片上强度服从 Γ 密度分布:

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

式中 $\Gamma(N) = (N-1)!$, $K_N(\cdot)$ 是 N 阶第二类修正贝塞尔函数。而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 Γ 分布,强度的密度函数为

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

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

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

如果产生该散斑图像的装置对散斑减少存在一定贡献,或者观察屏具有一定退偏特性,或散斑图像中

的散斑颗粒在有效探测面上存在空间平均,则上式修正为

$$C = \beta \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{M} + \frac{1}{NM}}, \quad (3)$$

式中 $\beta \in [0, 1]$ 。

分别在 $\beta=0.5, 0.9$ 两种情况下,对统计独立散斑图像数量 N 分别为1、10、200和1000根据(3)式进行了仿真,结果如图1所示。图1中的仿真结果表明:当 $N=1, M=1$,也就是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,使得有效探测面上仅探测到了一个散斑元胞时,散斑图像的对比度达到最大值 $C = \sqrt{3}\beta$,这种情况下散斑图像对比度的减小主要取决于观察屏的退偏特性和投影装置产生散斑颗粒在探测面上的空间平均效应。当探测器成像镜头在观测屏上一个分辨基元内投影镜头分辨基元的数量 M 一定时,随着统计独立散斑图像数量 N 的增加,对比度值急剧减小;当 N 增大2个数量级及以上时,继续增加 N 的数量对散斑图像对比度值的减小贡献不明显;即使将投射到屏幕上的独立散斑图像数目 N 实现巨大,即 $N \rightarrow \infty$,理论上也只能将散斑图像对比度降至 β/\sqrt{M} 。当任何一种散斑机制下产生的统计独立散斑图像数量 N 一定时, M 的增大也会显著减小散斑图像的对比度值;当 $M \geq 15$ 之后, M 值的继续增大使得散斑图像对比度值的减小不显著。比较图1(a)和(b)的结果可知,除了参数 M 和 N 对散斑图像对比度的影响外,相同条件下,投影装置中存在退偏特性或空间平均效应(对应较小 β 值)对散斑图像的对比度也有一定的影响。

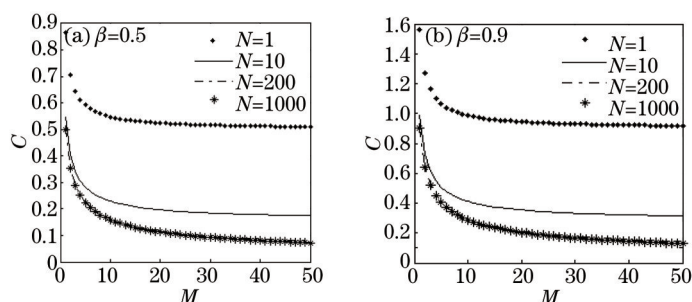


图1 散斑图像对比度 C 作为参数 M 和 N 的函数

Fig.1 Contrast C of the speckle image as a function of the parameters M and N

2.2 影响投影系统中散斑特性的参数

激光束照射到一小散射片上,经散射片透射散射后,具有一定发散角的已散斑化的光束由其后的光通管收集,经光通管的4个内壁多次全反射,匀场并整形后由其出口端出射,由投影镜头将均匀、方形的光场清晰地投影到距离 z_1 处的观察屏上,如图2所示。

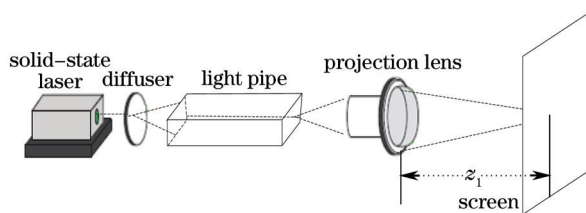


图2 投影系统中散斑的形成装置

Fig.2 Setup for generating speckle in projection system

观察屏上的散斑场 $A(\alpha, \beta)$ 与光通管出口端面上的场 $a(\xi, \eta)$ 通过菲涅耳衍射积分相联系:

$$A(\alpha, \beta) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(\alpha, \beta; \xi, \eta) a(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (4)$$

式中 $h(\alpha, \beta; \xi, \eta)$ 为投影系统的点扩展函数,根据夫琅禾费衍射理论^[4],该函数与投影系统的光瞳函数 $p(u, v)$ 有以下联系:

$$h(\alpha, \beta; \xi, \eta) = \frac{1}{\lambda^2 z_1 z_2} \iint_{-\infty}^{\infty} p(u, v) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda z_2} [(\alpha - \gamma\xi)u + (\beta - \gamma\eta)v]\right\} dudv, \quad (5)$$

式中 z_1 和 z_2 分别为投影系统到光通管和观察屏的距离, λ 为入射光束波长, $\gamma = -z_2/z_1$ 为投影系统的放大率,

投影系统的光瞳内, $p(u,v)=1$; 在其瞳外, $p(u,v)=0$ 。则观察屏上散斑场 $A(\alpha,\beta)$ 在两点 (α_1,β_1) 和 (α_2,β_2) 上的互相关函数 Γ_A 为

$$\Gamma_A = \overline{A(\alpha_1,\beta_1)A^*(\alpha_2,\beta_2)}, \quad (6)$$

将(4)式代入(6)式中, 整理得

$$\Gamma_A(\alpha_1,\beta_1;\alpha_2,\beta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \Gamma_a(\xi_1,\eta_1;\xi_2,\eta_2)h(\alpha_1,\beta_1;\xi_1,\eta_1)h^*(\alpha_2,\beta_2;\xi_2,\eta_2)d\xi_1d\eta_1d\xi_2d\eta_2, \quad (7)$$

式中 $\Gamma_a(\xi_1,\eta_1;\xi_2,\eta_2) = \overline{a(\xi_1,\eta_1)a^*(\xi_2,\eta_2)}$ 为光通管出口端面上的光场的相关函数, 它由散射片表面高度特性和入射到光通管出口面上的强度 I_{inc} 决定。由于光通管出口端面上光场 $a(\xi,\eta)$ 的相关函数显著不为零的区间都很小, 小到这个相关可以用一个 δ 函数来恰当表示:

$$\Gamma_a(\xi_1,\eta_1;\xi_2,\eta_2) = \overline{I_{inc}(\xi_1,\eta_1)}\delta(\xi_1-\xi_2,\eta_1-\eta_2), \quad (8)$$

式中 $\overline{I_{inc}}$ 为散射片表面平均振幅透射率。

将(8)式代入(7)式中, 并利用 δ 函数的筛选性质, 则观测屏上散斑场的归一化振幅相关函数为

$$\mu_A(\Delta\alpha,\Delta\beta) = \frac{\Gamma_A(\Delta\alpha,\Delta\beta)}{\Gamma_A(0,0)} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} H(\Delta\alpha,\Delta\beta)d(\Delta\alpha)d(\Delta\beta)}{H(0,0)}, \quad (9)$$

式中 $H(\Delta\alpha,\Delta\beta) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(\alpha_1,\beta_1)h^*(\alpha_1-\Delta\alpha,\beta_1-\Delta\beta)d(\alpha_1)d(\beta_1)$ 为投影系统的振幅点扩展函数的确定性的自相关函数。

对于具有有效直径为 P 的圆形光瞳函数 $p(u,v)$ 的投影系统:

$$\mu_A(\Delta\alpha,\Delta\beta) = 2 \frac{J_1\left(\frac{\pi P}{\lambda z_1} \sqrt{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}\right)}{\frac{\pi P}{\lambda z_1} \sqrt{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}}, \quad (10)$$

则观察屏上散斑强度的相关面积 A_p 为

$$A_p = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} |\mu_A(\Delta\alpha,\Delta\beta)|^2 d(\Delta\alpha)d(\Delta\beta) = \left(\frac{\lambda z_1}{\pi P}\right)^2. \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 当投射到观察屏上激光光源的波长 λ 不变, 投射距离 z_1 确定(与此同时投影镜头的有效焦距 f_p 也被确定)后, 观察屏上所观察到的散斑颗粒的大小与投影镜头的孔径 P^2 成反比, 即投影镜头越小, 观察屏上呈现的散斑越严重, 这成为了采用大 F 数($F_p=f_p/P$)投影镜头使激光投影系统小型化方案的瓶颈。

2.3 影响投影-检测系统中散斑特性的参数

对于有限孔径的成像检测系统, 检测到观察屏上的散斑图像的平均强度为

$$I_{measured} = \frac{1}{A_k} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(\alpha,\beta)I(\alpha,\beta)d\alpha d\beta, \quad (12)$$

式中 $k(\alpha,\beta)$ 表示成像系统的光瞳函数, 在其瞳内, $k(\alpha,\beta)=1$; 在其瞳外, $k(\alpha,\beta)=0$ 。 $A_k = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(\alpha,\beta)d\alpha d\beta$, $I(\alpha,\beta)$ 为被测散斑图像的强度分布。

检测到的散斑图像的平均强度为

$$\bar{I}_{measured} = \frac{1}{A_k} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(\alpha,\beta)\bar{I}d\alpha d\beta = \bar{I}, \quad (13)$$

式中 \bar{I} 为被测散斑图像的平均强度。

散斑强度 $I_{measured}$ 的二阶矩:

$$\bar{I}_{measured}^2 = \frac{1}{A_k^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(\alpha_1,\beta_1)k(\alpha_2,\beta_2)\overline{I(\alpha_1,\beta_1)I(\alpha_2,\beta_2)}d\alpha_1d\beta_1d\alpha_2d\beta_2 = \frac{\bar{I}^2}{A_k^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(\Delta\alpha,\Delta\beta)(1 + |\mu_A(\Delta\alpha,\Delta\beta)|^2)d\Delta\alpha d\Delta\beta, \quad (14)$$

式中 K 为函数 $k(\alpha,\beta)$ 的确定性的自相关函数, 函数 μ_A 为散斑图像的场的统计自相关函数。

检测到的散斑图像的强度的方差为

$$\sigma_{I_{measured}}^2 = \bar{I}_{measured}^2 - \bar{I}_{measured}^2 = \frac{\bar{I}^2}{A_k^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(\Delta\alpha,\Delta\beta)|\mu_A(\Delta\alpha,\Delta\beta)|^2 d\Delta\alpha d\Delta\beta, \quad (15)$$

这里

$$M = \left[\frac{1}{A_k^2} \int \int_0^\infty K(\Delta\alpha, \Delta\beta) |\mu_\lambda(\Delta\alpha, \Delta\beta)|^2 d(\Delta\alpha)d(\Delta\beta) \right]^{-1} \quad (16)$$

一般情况下,成像系统的权重函数的等效面积比投影系统投射到观察屏上的散射光的相干面积大很多,即函数 $K(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ 比函数 $|\mu_\lambda(\Delta\alpha, \Delta\beta)|$ 宽很多,因此,可以将 $K(0,0)$ 提出积分,得到成像系统有效权重函数面积 $A_c = A_k^2/K(0,0)$,若检测器成像镜头与观察屏之间的距离为 z_2 ,成像镜头的有效直径为 $D(D=f_c/F_c, f_c$ 和 F_c 分别为成像镜头的有效焦距和 F 数),则 A_c 可等效为^[8]

$$A_c = \left(\frac{\lambda z_2}{\pi D} \right)^2 \quad (17)$$

将(11)式和(17)式代入(16)式中,有

$$M = \frac{A_c}{A_p} \approx \left(\frac{\lambda z_2 / \pi D}{\lambda z_1 / \pi P} \right)^2 = \left(\frac{d_c}{d_p} \right)^2 = \left(\frac{z_2 F_c / f_c}{z_1 F_p / f_p} \right)^2 \quad (18)$$

式中 $d_p = 1.22\lambda z_1/P$ 为投影镜头在观察屏上的分辨基元, $d_c = 1.22\lambda z_2/D$ 为探测器的成像镜头在观察屏上的分辨基元。工程上,一般通过调节投影镜头和成像镜头的 F 数、有效焦距、投射/成像距离等参数来测试和调节参数 M ,改善激光投影系统中散斑存在的影响。

对于投影镜头有效焦距 $f_p=48$ mm, 投射距离 $z_1=62$ cm, 成像镜头有效焦距 $f_c=50$ mm, 成像距离 $z_2=25$ cm 的定焦投影-检测系统,由(18)式仿真结果如图3所示。图3中结果表明,探测器成像镜头在观测屏上一个分辨基元内投影镜头分辨基元的数量 M 随投影镜头 F 数的增大而减少,随成像镜头 F 数的增大而增加;对于 $F_c < 8$ 的情况,无论 F_p 多小, M 值都不大;对于 $F_c \geq 8$ 的情况,要想使 $M > 1$,投影镜头的 F 数不宜过大(图中显示 F_p 应小于5),这样势必会影响投影镜头结构的小型化。另外, $M \leq 1$ 的情况,说明经投影镜头投射到观察屏上的散斑颗粒的平均尺寸比成像系统权重函数的等效面积宽很多,即探测器成像镜头在观察屏上分辨基元内最多只有一个投影镜头在观察屏上的分辨基元数量。工程上,投影镜头的投射距离 z_1 与有效焦距 f_p 的比值还取决于投射幕布的宽度,投射幕布越宽, z_1/f_p 的值越大,在某一固定测试装置下, M 值会减小,也就是投影幕布上的散斑会更严重,抑制散斑的难度也会增大。

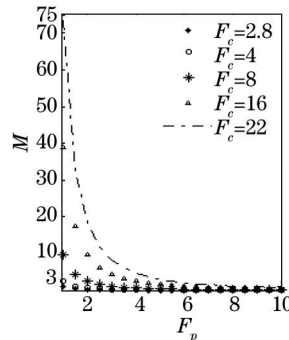


图3 M 作为投影镜头 F 数的函数

Fig.3 Plots of parameter M as a function of F -number of projection lens for different F -number of imaging lens

下面讨论上述系统中没有投影镜头的特殊情况。因为图2中光通管四表面的全反射性,会使一束呈高斯分布的、具有一定发散角的入射激光束以光源阵列形式在光通管出射端出射,为了获得均匀光场,所以测试时一般会将观察屏紧贴光通管出射端。此时,CCD探测器所获得的散斑图像的对比度为^[8]

$$C = \frac{\sigma_{I_{measured}}}{\bar{I}_{measured}} = \frac{1}{A_0^2} \int \int_0^\infty D(\Delta\alpha, \Delta\beta) |\mu_\lambda(\Delta\alpha, \Delta\beta)|^2 d(\Delta\alpha)d(\Delta\beta) = \sqrt{\frac{1}{M_0}} \quad (19)$$

式中 $d(\alpha, \beta)$ 表示探测器的光电灵敏度在空间的分布,在其灵敏区内, $d(\alpha, \beta) = 1$,在其灵敏区外, $d(\alpha, \beta) = 0$; D 为函数 $d(\alpha, \beta)$ 的确定性的自相关函数; A_0 为探测器的面积, $A_0 = \int_0^\infty \int_0^\infty d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$ 。由于探测器的面积比散斑的平均尺寸大很多,即函数 $D(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ 比函数 $|\mu_\lambda(\Delta\alpha, \Delta\beta)|$ 宽很多,因此,可以将 $D(0,0)$ 提出积分,得到有效测量面积 $A_0' = A_0^2/D(0,0)$ 。

CCD探测面上散斑强度的相关面积 A'_c 为^[1]

$$A'_c = \iint_0^\infty |\mu_A(\Delta\alpha, \Delta\beta)|^2 d\Delta\alpha d\Delta\beta = \frac{4\lambda^2 F_c^2}{\pi}. \quad (20)$$

CCD探测面上单个像素内包含平均散斑颗粒数 M_{no} 为

$$M_{no} = \frac{A'_D}{A'_c} = \frac{L^2}{4\lambda^2 F_c^2 / \pi} = \frac{L^2 \pi}{4\lambda^2 F_c^2}, \quad (21)$$

式中 L 为 CCD 探测器上单个像素的大小。

当波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的激光束经光通管收集整形后,由 F 数可在 2.8、4、8、16 和 22 之间变换的成像镜头将观察屏上的散斑图像成像在 $5.6 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$ 的 CCD 探测器上,由(21)式和(19)式仿真结果如图 4 所示。图 4 中结果表明:当 $F_c < 16$ 时,单个 CCD 像素内总存在多个散斑颗粒;当 $F_c \geq 16$ 时,单个散斑颗粒占用多个 CCD 像素,实际上无论探测面上单个像素尺寸有多小,至少能探测到一个散斑颗粒,即 $M_{no}=1$ 。也就是说,当 $F_c < 16$ 时, $C = 1/\sqrt{M_{no}}$, 因为空间平均效应使得散斑图像对比度存在不同程度降低,当 $F_c \geq 16$ 时, $C=1$ 。由图 3 与图 4 中结果进行比较可知:在相同测试条件下,存在投影镜头时参数 M 主要受投影镜头 F 数的影响,而没有投影镜头时参数 M 主要取决于 CCD 探测面上单个像素的尺寸。

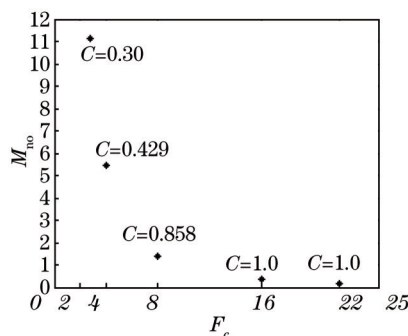


图 4 单个 CCD 像素内包含平均散斑颗粒数 M_{no} 作为成像镜头 F 数的函数 ($\beta=1$)
Fig.4 M_{no} of speckle grain within a CCD pixel versus F -number of imaging lens ($\beta=1$)

3 实验平台

根据激光投影-检测系统搭建的简化实验平台如图 2 所示。光源采用的是功率为 32 mW、出射直径为 2 mm、波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的绿色固态激光器,在电机的带动下以固定转速快速旋转 5° 发射角的小散射片用于在投影屏上产生连续变化的散斑图像,其后放置长度为 62 mm、横截面为 $5.5 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的光通管,用于收集来自散射片透射的散射光,并整形,以便获得均匀、方形的空间光场分布。光通管出口面上的光场经焦距为 48 mm、 F 数在 2.5 到 3.8 之间可变的投影镜头清晰投影在 61.6 cm 处的屏幕上。屏幕使用具有不完全退偏特性,透射率为 96% 以上的毛玻璃,其上的散斑图像由 25 cm 处、空间分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 、单个像素大小为 $5.6 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$ 的 CCD(Texas Instruments DMK-21BU04)和焦距为 50 mm、 F 数在 2.8 到 22 之间可变的相机镜头(Pentax, C5028-M)获取。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 $1/30 \text{ s}$ 。

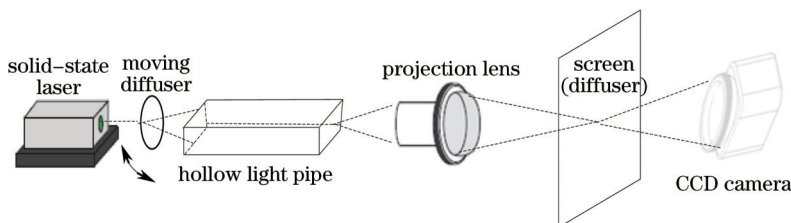


图 5 激光投影-检测实验装置示意图
Fig.5 Schematic of experiment setup for laser projection and detection

4 结果分析与讨论

实验中,采用了小散射片静止和旋转两种状态。首先,将毛玻璃屏直接放置在光通管的出口端,相机镜头的 F 数在 2.8 到 22 之间变化时,毛玻璃屏透射的散射光形成的散斑被 CCD 相机捕获;其次,投影镜头的 F 数在 2.5 到 3.8 之间变化时,将光管出口端面上的光场清晰成像在毛玻璃屏上,并保持相机镜头的 F 数为 16,且两镜头离毛玻璃屏的观测距离不变,获取毛玻璃屏上的散斑图像;最后,保持投影镜头的 F 数为 2.5,两镜头离毛玻璃屏的观测距离仍然不变,改变相机镜头的 F 数在 2.8 到 22 之间变化时,捕获毛玻璃屏上的散斑图像。将这 3 种情况下所得散斑图像运用公式 $C = \sigma_r / \bar{I}$ 计算它们的对比度,结果显示在表 1 中的后两列,表 1 中第三列 M 的值由(19)和(21)式计算所得。

表 1 不同实验装置在小散射片静止和旋转两种状态下的测试结果

Table 1 Measured results for the static and rotating small diffuser under different experimental setups

Experimental setup		M	Speckle contrast	
Projection lens F_p	Camera lens F_c		Static	Rotating
Without projection lens	2.8	11.1	0.223	0.074
	4	5.44	0.314	0.093
	8	1.36	0.575	0.146
	16	1	0.694	0.189
	22	1	0.722	0.229
2.5		6.22	0.931	0.328
3.0	16	4.32	0.98	0.397
3.8		2.69	1.069	0.496
2.5	2.8	1	1.178	0.677
	4	1	1.109	0.551
	8	1.55	0.979	0.427
	16	6.22	0.931	0.328
	22	11.76	0.876	0.241

由表 1 的测试结果可以看出,对于屏幕上呈现的同一个散斑图像,光路中没有投影镜头时,参数 M 随着相机镜头的 F 数增大而减小,其对比度值随着相机镜头的 F 数增大而增大;而对于投影-检测系统,参数 M 却随着相机镜头的 F 数增大而增大,其对比度值随着相机镜头的 F 数增大而减小。在相同检测条件下,投影镜头的存在明显提高了被测散斑图像的对比度(见没有投影镜头和投影镜头 $F_p=2.5$ 时对应的测试结果)。当检测系统参数一定时,参数 M 随投影镜头的 F 数增大而减小,其对比度值随着投影镜头的 F 数增大而增大(见成像镜头 $F_c=16$ 时对应的测试结果)。

图 6 显示了散射片静止和旋转两种状态下,没有投影镜头和有投影镜头存在两种装置下,相机镜头的 F 数设置为 8 时的实验结果。图 6(a)和(b)是散射片静止时没有投影镜头和有投影镜头下捕获到的散斑图像,其散斑对比度分别为 0.575 和 0.979。当散射片在电机的带动下开始旋转时,在有无投影镜头的光学系统中,独立散斑图像都以相同数量进行增加。当无投影镜头时,测得散斑图像对比度为 0.146,如图 6(c)所示,而有

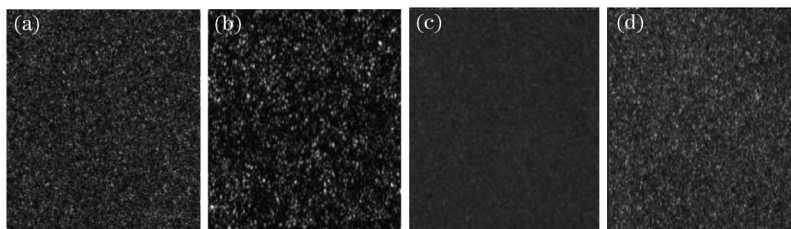


图 6 毛玻璃屏上所得散斑图像。(a) 小散射片静止且没有投影镜头($C=0.575$); (b) 小散射片静止且有投影镜头($C=0.979$); (c) 小散射片旋转且没有投影镜头($C=0.146$); (d) 小散射片旋转且有投影镜头($C=0.427$)

Fig 6 Speckle images on glass screen. (a) Static small diffuser and without camera lens ($C=0.575$); (b) static small diffuser and with camera lens ($C=0.979$); (c) rotating small diffuser and without camera lens ($C=0.146$); (d) rotating small diffuser and with camera lens ($C=0.427$)

投影镜头时所测得结果为0.427,如图6(d)所示。

当散射片静止时,即 $N=1$,根据文献[15],两散射片之间无光通管且间距为62 mm时,毛玻璃屏上形成的是复合散斑,其颗粒平均大小约为2.6 mm,由 F 数为16的相机镜头检测到的散斑图像的对比度值为0.9352,该值低于复合散斑的理论值范围 $[1, \sqrt{3}]$,这主要是因散斑颗粒在CCD的单个像素上产生空间平均和毛玻璃屏的不完全退偏所致。当光通管放置于这两散射片之间,激光光束经光通管传播后,照射到毛玻璃屏上的光斑直径由2 mm增大到 $2 \times 62 \times \tan 2.5^\circ = 5.414 \text{ mm}^{[6]}$ 。由Van Cittert-Zernike定理^[10]可知,观察屏上散射光斑的相干面积 $A_{cs} = 2\lambda L/A_s$,其中 A_s 为散射光光源的面积。这样,光通管的置入使毛玻璃屏上散射光的相干面积减小了 $5.414/2=2.707$ 倍,也就是由该光场形成的散斑颗粒的平均大小也减小为原来的 $1/\sqrt{2.707} = 0.608$ 倍,相当于参数 M 增大为原来的 $1/0.608=1.65$ 倍,即散斑对比度减小因子 β 约为 $1/\sqrt{1.65} = 0.779$,则散斑图像的对比度约为 $0.779 \times 0.9352 = 0.728$,实际测试结果0.6943比该理论值小,这主要是扩展光源照射毛玻璃屏产生部分退相干的结果^[17]。在非投影成像系统中,随着检测系统的入瞳孔径逐渐减小,即相机镜头的 F 数逐渐增大,检测散斑图像中散斑颗粒的平均大小增大,使得CCD上单个像素所包含的散斑颗粒的数量减小,即参数 M 减小迅速,散斑图像的对比度值急剧增大;当检测系统的光瞳孔径小到CCD单个像素上仅有一个散斑颗粒或一个散斑颗粒占有多个CCD的像素,即 $M=1$,散斑图像的对比度值趋于稳定。将图4中的理论值 C 都考虑因子 $\beta=0.779$,表1中第4列的测试结果都会低于相应理论值,结果分析与理论吻合。

对于投影-检测系统,参数 M 不再取决于毛玻璃屏上散斑颗粒的大小和CCD单个像素尺寸,而是由检测镜头在毛玻璃屏上的分辨基元内投影镜头在毛玻璃屏上的分辨基元数量决定。当检测系统参数不变,对于固定焦距和投射距离的投影镜头,随着其出瞳孔径变小,即 F 数的增大,投射到毛玻璃屏上的散斑颗粒变大,从而使得相机镜头分辨基元内投影镜头分辨单元数量的减小,即参数 M 变小,散斑对比度增大;当投影系统参数不变,对于固定焦距的成像物距的相机镜头,随着其入瞳孔径变小,即 F 数的增大,检测到毛玻璃屏上的散斑颗粒变大,即相机镜头的分辨基元增大,从而增多了相机镜头分辨基元内投影镜头分辨单元数量,即参数 M 增大,散斑对比度减小。表1中参数 M 的变化和散斑图像对比度测试结果与理论分析吻合(见成像镜头 $F_c=16$ 和 $F_p=2.5$ 时对应的测试结果)。

随着散射片的快速旋转,不管成像系统中是否存在投影系统,独立散斑图像都以相同数量产生了。独立散斑图像数量的增加显著减小了观察屏上散斑图像的对比度值,但并不改变对比度的变化趋势,这一点从表1中最后一列的实验结果得到证实。

5 结 论

基于简化的激光投影显示系统,在散斑形成机理的基础上,理论分析了影响散斑抑制的两个关键参数,即统计独立散斑图像数量 N 和探测器成像镜头在观测屏上一个分辨基元内投影镜头分辨基元的数量 M 。任何一种贡献于散斑抑制的机制都将增大参数 M 和 N 的值,同时减弱散斑对图像信息的影响。实验中利用旋转小散射片产生独立散斑图像的方法,系统分析了投影镜头 F 数和探测器成像镜头 F 数对参数 M 的影响,从而对散斑抑制的影响。实验结果表明,在相同检测条件下运用同一种散斑抑制技术,存在投影镜头会使散斑现象更明显,且投影镜头 F 数的增大,即出瞳孔径变小会进一步增大散斑抑制的难度,这将成为激光投影系统结构小型化的一大挑战。

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 Express*, 2012, 20(8): 8770-8783.
- 2 P S Considine. Effect of coherence on imaging system[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(8): 1001-1009.
- 3 C Saloma, S Kawata, S Minami. Laser-diode microscope that generates weakly speckled images[J]. *Opt Lett*, 1990, 15(4): 203-205.
- 4 M N Akram, Z Tong, G Ouyang, *et al.*. Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(17): 3297-3304.
- 5 C Saloma, S Kawata, S Minami. Speckle reduction by wavelength and space diversity using a semiconductor laser[J]. *Appl Opt*,

- 1990, 29(6): 741–742.
- 6 B Dingel, S Kawata. Speckle-free image a laser-diode microscope by using the optical feedback effect[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(7): 549–551.
- 7 Xu Meifang, Gao Wenhong, Shi Yunbo, *et al.*. Laser speckle suppression with multiple scattering scheme introduced by cascade diffusers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0414002.
徐美芳, 高文宏, 石云波, 等. 级联散射片引入多重散射机制的激光散斑抑制[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0414002.
- 8 J W Goodman. *Speckle Phenomena in Optics Theory and Application*[M]. Englewood: Roberts and Company Pulishers, 2007: 23–27.
- 9 Lingli Wang, Theo T Tschudi, Markus Boeddinghaus, *et al.*. Speckle reduction in laser projections with ultrasonic[J]. *Opt Eng*, 2000, 39(6): 1659–1664.
- 10 Völker A, Zakharov P, Weber B, *et al.*. Laser speckle imaging with an active noise reduction scheme [J]. *Opt Express*, 2005, 13(24): 9782–9787.
- 11 Brandon Redding, Graham Allen, Eric Dufresne, *et al.*. Low-loss high-speed speckle reduction using a colloidal dispersion[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(6): 1168–1172.
- 12 F Riechert, G Bastian, U Lemmer. Laser speckle reduction via colloidal-dispersion-filled projection screens[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(19): 3742–3749.
- 13 C Ouyang, Z Tong, M N Akram, *et al.*. Speckle reduction using a motionless diffractive optical element[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(17): 2852–2854.
- 14 J W Goodman. *Introduction to Fourier Optics (3rd edition)*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- 15 Xu Meifang, Wang Weibiao, Gao Wenhong, *et al.*. Characterization and modeling of static compound speckle in laser projection display[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 33–40.
徐美芳, 王维彪, 高文宏, 等. 激光投影显示中静态复合散斑的表征与建模[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 33–40.
- 16 Xu Liu, Haifeng Li. *Modern Projection Display Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009: 162–167.
刘旭, 李海峰. *现代投影显示技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009: 162–167.
- 17 Xu Meifang, Shi Yunbo, Gao Wenhong, *et al.*. Surface roughness measurement of screen for laser projection display[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0108005.
徐美芳, 石云波, 高文宏, 等. 激光投影显示屏表面粗糙度的测量[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108005.

栏目编辑: 宋梅梅