

基于硅基液晶实现激光投影显示系统匀光整形和散斑抑制

梁传祥^{1,2} 张巍¹ 芮大为¹ 隋永新¹ 杨怀江¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光投影显示通常需要解决光束整形匀化和散斑抑制的问题。基于此, 提出利用硅基液晶(LCoS)空间光调制器(SLM)同时解决上述问题的方法。利用衍射光学元件(DOE)精细化设计思想设计所需整形 DOE 的相位分布, 可以同时较好地控制采样点与采样点以外的光场强度分布, 将圆形高斯分布照明激光束整形成平顶矩形光场; 在不同的初始相位条件下, 设计得到的多幅 DOE 生成具有相同强度分布、不同相位分布的衍射图样。当 SLM 依次调制出这些衍射图样, 通过时间积分将这些衍射图样相叠加, 不仅可以进一步提高光斑均匀性, 同时还可以抑制散斑。仿真结果表明, 通过叠加 16 幅衍射图样, 该方法可使照明光斑均匀性从 74% 提高到 92.57%, 屏幕上图样散斑对比度由 0.991 减小为 0.2508。该方法稳定性高, 能耗低, 且所用器件尺寸小, 为微投影显示结构设计提供了有益参考。

关键词 激光光学; 衍射光学; 散斑抑制; 空间光调制器; 衍射光学元件; 激光投影显示

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1201001

Beam Homogenized Shaping and Speckle Suppression in Laser Projection Display System Using Liquid Crystal on Silicon

Liang Chuanyang^{1,2} Zhang Wei¹ Rui Dawei¹ Sui Yongxin¹ Yang Huaijiang¹

¹Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Laser projection display usually need to solve the issues of beam shaping homogenization and speckle suppression. This paper proposes a method that liquid crystal on silicon (LCoS) spatial light modulator (SLM) is used to solve the problems simultaneously. The idea of fine design for diffractive optical element (DOE) is used to design phase distribution of DOE that needs to be shaped, which can control the intensity distribution of sampling points and other points. The circular Gaussian laser illumination beam is shaped into a flat-top rectangular profile. Under different initial phase conditions, the designed DOEs generate diffraction patterns with the same intensity distributions and different phase distributions. When diffraction patterns are modulated by SLM and they are overlapped by time integral, the uniformity of illumination spot can be improved, and image speckles can be suppressed. The simulation results show that by overlapping 16 diffraction patterns, the proposed method can improve the uniformity from 74% to 92.57%, and reduce the speckle contrast of the screen from 0.991 to 0.2508. The proposed method has high stability, low power consumption and small size, which provide good reference for display structure of pico-projector.

Key words laser optics; diffractive optics; speckle suppression; spatial light modulator; diffractive optical element; laser projection display

OCIS codes 140.3460; 050.1970; 110.6150; 230.4110; 030.6140

收稿日期: 2016-07-14; **收到修改稿日期:** 2016-08-31

基金项目: 国家 863 计划(2015AA033201)

作者简介: 梁传祥(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计、激光显示方面的研究。E-mail: lcy199201@163.com

导师简介: 杨怀江(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事紫外光刻技术、光学信息融合以及网络信息安全等方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

1 引 言

近年来,随着人们对投影画质的要求越来越高,数字投影显示技术向着高分辨率、大屏幕、高亮度方向发展,传统的诸如短弧氙灯、高压汞灯^[1]等光源已不能满足需求,业界纷纷将关注的目光投向了激光光源^[2]。与传统光源相比,激光光源具有大色域、高亮度、高效能、长寿命等优点,被认为是下一代数字投影显示系统的主流照明光源。

在激光投影显示系统中,通常需要将圆形高斯分布的激光束整形为矩形,以便能充分照射微显示器件从而减小光能损失。传统的常用器件如双面微透镜阵列^[3]、匀光方棒^[4]等体积较大,同时光能利用率较低。纯相位衍射光学元件(DOE)是一种用途广泛的激光光束整形器件,与上述方法相比,DOE具有更小的尺寸和更高的光能利用率^[5]。用于光束整形DOE的设计算法有许多,如Gerchberg-Saxton(G-S)算法^[6]、杨-顾算法^[7]等迭代算法,模拟退火法^[8]、基因遗传算法^[9]等优化算法等。但是,这些算法只是在采样点处取得了很好的光强分布,采样点以外的点的光强分布与理想分布相差较远,使得DOE在实际运用中得到的衍射光斑的场强分布并不是预期的均匀分布,导致光斑中出现强度分布不一的散斑现象。针对这种情况,谭峭峰等^[10]提出了DOE的精细化设计,较好地控制了采样点以外点的光强分布,但只设计了一维器件。本文利用精细化思想设计二维DOE器件来实现激光整形,同时可以很好地抑制由DOE产生的散斑。

散斑现象的存在严重影响投影图像质量,需要对其进行抑制。近年来,已有相当的学者针对消散斑的方法进行了研究,例如加入运动的散射体(DOE等)^[11-13]、振动匀光方棒^[14]等,由于这些方法引入了机械旋转或高频振动,不仅给投影显示系统带来不确定性,而且耗能较多。利用时间积分效应,通过硅基液晶(LCoS)空间光调制器(SLM)快速显示多幅不同的独立的散斑图样,使这些图样在一定积分时间内相叠加,从而实现散斑抑制。

本文提出了利用一个LCoS器件同时实现激光整形和散斑抑制的方法:利用DOE的精细化设计算法得到所需整形DOE的相位分布,将所得相位分布编码输入LCoS中,就能实现对激光束的整形匀化。不仅如此,如果在不同的初始相位条件下设计多个不同的整形DOE,在一定积分时间内,将这些相位分布依次输入LCoS中,就能得到多幅不同的均匀光强分布、随机相位分布的散斑图样,这些图样相叠加从而实现散斑抑制。该方法稳定性高,能耗低,且所用器件尺寸小,有利于激光投影显示系统的小型化,为微投影显示结构设计提供有益参考。

2 整形DOE的精细化设计

基于SLM实现激光整形和散斑抑制的系统示意图如图1所示。激光光源波长为632.8 nm,激光束通过准直扩束系统(包括空间滤波器和准直镜)变换成相位为常数的相位分布,光强为高斯分布的准直光。准直光经分束器入射到相位调制SLM上,SLM为Meadowlark Optics公司的LCoS相位调制器,其分辨率为1920 pixel×1152 pixel(像素大小为9 μm×9 μm),相位刷新频率为868 Hz,光能利用率为95%。利用电脑将设计好的DOE相位分布输入SLM中,SLM就会在衍射面处将圆形高斯分布的照明光场调制成矩形均匀光场,然后矩形均匀光场经中继镜组缩放至与微显示器件相同大小后充分照射微显示器件,并经微显示器件调制后投射出去产生投影图像。

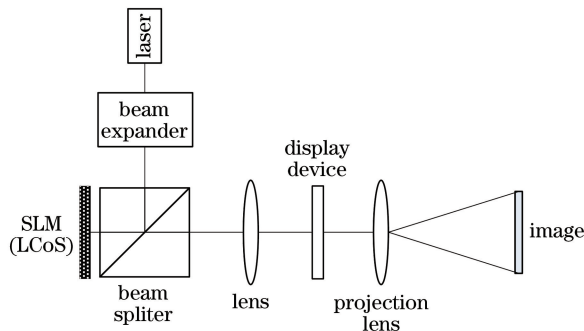


图1 基于SLM激光整形和散斑抑制的激光投影显示系统装置示意图

Fig. 1 System apparatus of laser projection displays using an SLM for beam shaping and speckle suppression

DOE 的设计可以通过引言中提到的算法进行,但这些算法只是在采样点处取得了很好的光强分布,采样点以外的点的光强分布较理想分布相差较远,导致 DOE 在实际运用时的匀化效果远不如仿真结果好。利用谭峭峰等^[10]提出的 DOE 的精细化设计思想来设计所需的 DOE。通常输出面的采样间隔为 $\Delta = \lambda f / D$,其中 λ 为入射光波长, f 为 DOE 衍射面与 DOE 的距离, D 为 DOE 的尺寸。DOE 的精细化设计思想就是将输出面的采样间隔减小为原来的一半,即 $\Delta' = \Delta / 2 = \lambda f / 2D$,从而起到同时兼顾采样点及采样点外其他点的强度分布的目的,改善 DOE 的性能。

依据 LCoS 的相关参数,参考文献[15]中的算法设计了一个分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的 DOE, $f = 300 \text{ mm}$, $D = 9.216 \text{ mm}$,形成的均匀矩形光斑为 $5.10 \text{ mm} \times 2.85 \text{ mm}$,其相位分布如图 2 所示。作为比较,根据常用采样间隔 $\Delta = \lambda f / D$,利用 G-S 算法设计了相同参数的普通 DOE,该 DOE 的衍射面强度分布如图 3(a)所示,其均方根误差(RMSE)为 0.0183;采样间隔变为 $\Delta / 2$ 时,重新计算的普通 DOE 衍射面强度分布如图 3(b)所示,其 RMSE 为 0.8198;图 2 所示的精细化 DOE 的衍射面强度分布如图 3(c)所示,其 RMSE 为 0.216;采样间隔变为 $\Delta' / 2$ 时,重新计算的精细化 DOE 的衍射面强度分布如图 3(d)所示,其 RMSE 为 0.238。从图 3 可以看出,普通 DOE 虽然对采样点的强度分布控制得很好,但对采样点以外的点的强度分布没有控制,导致采样间隔减小一半后性能劣化严重,出现严重的散斑现象。而精细化设计 DOE 虽然在采样点处的强度分布没有普通 DOE 好,但它很好地兼顾了采样点以外点的强度分布,采样间隔减小一半后性能基本不变,仍保持良好,有效抑制了图 3(b)中的散斑现象,改善了光斑的均匀性,提升了 DOE 的总体性能。因此,采用精细化的设计思想来设计所需 DOE。

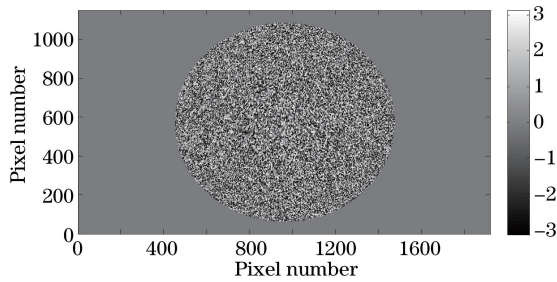


图 2 精细化设计 DOE 的相位分布

Fig. 2 Phase distribution of fine designed DOE

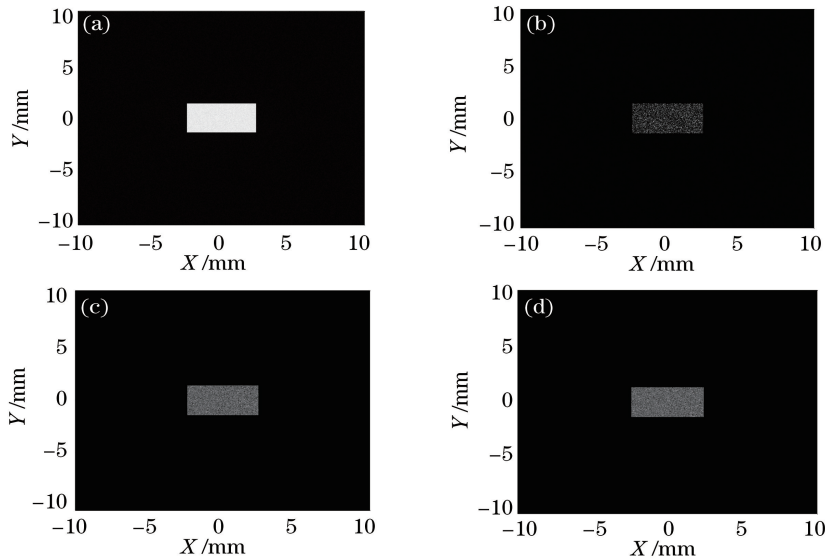


图 3 (a) 普通 DOE 衍射图样;(b) 普通 DOE 采样间隔变为 $\Delta / 2$ 时的衍射图样;(c) 精细化设计 DOE 衍射图样;
(d) 精细化设计 DOE 采样间隔变为 $\Delta' / 2$ 时的衍射图样

Fig. 3 (a) Diffraction pattern of ordinary DOE; (b) diffraction pattern of ordinary DOE with the sampling space of $\Delta / 2$;
(c) diffraction pattern of fine designed DOE; (d) diffraction pattern of fine designed DOE with the sampling space of $\Delta' / 2$

3 散斑抑制方法

散斑现象通常出现于激光投影显示系统的投影图像上,严重影响图像质量。在兼顾 SLM 对激光整形的同时,通过时间积分多幅独立散斑图样以抑制散斑^[16]。在不同的初始相位条件下设计多个不同的整形 DOE,这些 DOE 生成均匀光强分布、随机相位分布的矩形光场,让 SLM 在积分时间内依次调制出所设计的 DOE,DOE 所得目标光场相互叠加,从而实现散斑的抑制。

通常将散斑对比度(SC)作为衡量散斑强弱的参数,其表达式如下:

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}, \quad (1)$$

式中 σ_I 和 \bar{I} 分别为散斑图样强度的标准差和平均值。

N 幅散斑图样相叠加得到的总的散斑图样的强度为

$$I_s = \sum_{n=1}^N I_n, \quad (2)$$

式中 I_n 为第 n 个散斑图样的强度。则(2)式的一阶均值为

$$\bar{I}_s = \overline{\sum_{n=1}^N I_n} = \sum_{n=1}^N \bar{I}_n, \quad (3)$$

(2)式的二阶均值为

$$\bar{I}_s^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \bar{I}_n \bar{I}_m = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \bar{I}_n \bar{I}_m (1 + \rho_{m-n}), \quad (4)$$

式中 ρ_{m-n} 为 I_n 与 I_m 的相关系数,可由下式计算得到:

$$\rho_{m-n} = \frac{\bar{I}_n \bar{I}_m - \bar{I}_n \bar{I}_m}{[(I_n - \bar{I}_n)^2 (I_m - \bar{I}_m)^2]^{1/2}}. \quad (5)$$

通过(3)式和(4)式可得到总散斑图样的强度的方差:

$$\sigma_s^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \bar{I}_n \bar{I}_m \rho_{m-n}, \quad (6)$$

那么,总的散斑图样的散斑对比度为

$$C = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \bar{I}_n \bar{I}_m \rho_{m-n}}}{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n} = \frac{\sqrt{N + 2 \sum_{n < m} \rho_{m-n}}}{N}, \quad (7)$$

如果这 N 幅散斑图样的平均光强相同且相互独立非相关,那么(7)式就简化为

$$C = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (8)$$

即当 N 幅非相关的具有相同平均光强的散斑图样相叠加,所得的总的散斑图样的散斑对比度减小为以前的 $1/\sqrt{N}$ 。

4 结果分析

人眼积分时间大约为 20 ms,SLM 相位刷新频率为 868 Hz,那么在人眼积分时间内 SLM 可调制 16 幅 DOE 相位分布。利用不同的初始相位分布,利用第 2 节所述的精细化设计思想设计了 16 幅 DOE,所设计 DOE 的平均衍射效率为 86.34%,由于 SLM 的效率为 95%,所以该方法的能量利用率为 82.02%。将所设计的 16 幅 DOE 相位分布依次输入 SLM 中产生 16 幅不同的光斑图样。利用散斑对比度和照明均匀性(IU)两个参数来衡量照明光斑的质量,其中均匀性由美国国家标准协会(ANSI)规定的 13 点测量方法计算得到^[17]。所得的 16 个光斑的散斑对比度与 ANSI 均匀性如图 4 所示,平均散斑对比度为 0.22,平均 ANSI 均匀性为 74%。

将 16 幅 DOE 产生的照明光斑相叠加,得到最终的照明光斑如图 5 所示,散斑对比度为 0.0714,均匀性

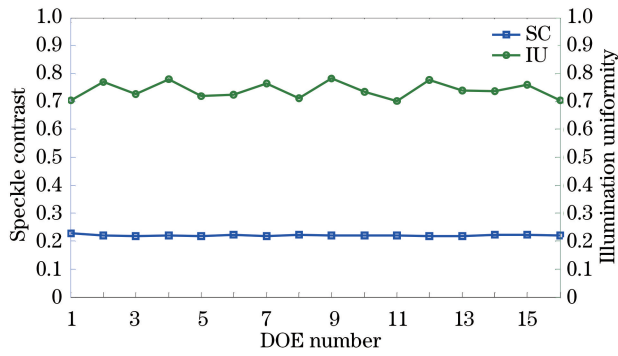


图 4 设计生成的 16 幅 DOE 的衍射图样的均匀性和散斑对比度示意图

Fig. 4 Uniformity and SC of the diffraction patterns generated by 16 DOEs

为 92.57%。与图 3(c)相比,最终照明光斑均匀性得到很好的改善,照明均匀性由 74%提高到 92.57%,满足激光投影显示的照明需求。可见,该方法实现了将圆形高斯照明激光整形成矩形均匀光斑。同时,光斑中的散斑也得到了抑制,用散斑抑制比(SCR)来说明散斑抑制程度,SCR 定义为结果图样的散斑对比度与初始散斑图样平均散斑对比度之比,得到 SCR 为 0.325。与(8)式计算得到的散斑对比度(0.055)相比(SCR 为 0.25),16 幅 DOE 叠加的散斑图样的散斑对比度偏大,表明所得到的 16 幅光斑图样之间并非完全非相关,而是具有一定的相关性。

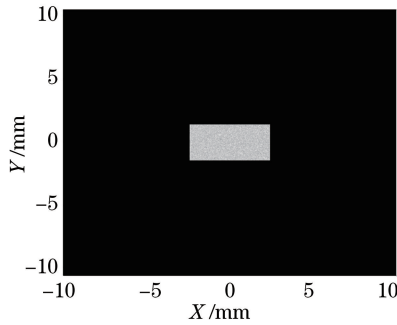


图 5 16 幅 DOE 的衍射图样叠加所得的照明图样

Fig. 5 Illumination pattern generated by superposition of 16 DOEs diffraction pattern

为验证所得 16 幅光斑图样的相关情况,计算两两光斑图样的强度分布相关系数 ρ_{m-n}, ρ_{m-n} 通过(5)式计算得到,所得 16 幅光斑图样的相关系数如表 1 所示,可以看到,表 1 中不同光斑图样之间的互相关系数均小于 0.1。根据表 1 数据和(7)式,重新计算得到 16 幅光斑图样叠加后的散斑对比度理论值为 0.0713,与仿真得到的 0.0714 相符合,表明多幅图样之间的相关性影响了散斑抑制程度,且散斑抑制程度对多幅叠加图样之间的相关系数敏感,即使是小于 0.1 的相关系数也对散斑抑制影响较大。

表 1 16 幅 DOE 的衍射图样强度分布之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of the intensity distribution of the diffraction patterns generated by 16 DOEs

DOE number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.0000	0.0521	0.0461	0.0443	0.0314	0.0475	0.0380	0.0466	0.0376	0.0422	0.0405	0.0485	0.0389	0.0440	0.0357	0.0393
2	0.0521	1.0000	0.0349	0.0432	0.0375	0.0373	0.0431	0.0385	0.0406	0.0469	0.0497	0.0447	0.0307	0.0465	0.0431	0.0399
3	0.0461	0.0349	1.0000	0.0364	0.0337	0.0471	0.0392	0.0385	0.0412	0.0387	0.0385	0.0418	0.0399	0.0467	0.0315	0.0392
4	0.0443	0.0432	0.0364	1.0000	0.0432	0.0423	0.0313	0.0375	0.0317	0.0437	0.0509	0.0479	0.0459	0.0316	0.0368	0.0321
5	0.0314	0.0375	0.0337	0.0432	1.0000	0.0507	0.0392	0.0513	0.0411	0.0338	0.0442	0.0434	0.0409	0.0450	0.0490	0.0379
6	0.0475	0.0373	0.0471	0.0423	0.0507	1.0000	0.0339	0.0432	0.0360	0.0448	0.0320	0.0400	0.0417	0.0377	0.0495	0.0378
7	0.0380	0.0431	0.0392	0.0313	0.0392	0.0339	1.0000	0.0478	0.0303	0.0474	0.0448	0.0286	0.0273	0.0428	0.0368	0.0359
8	0.0466	0.0385	0.0385	0.0375	0.0513	0.0432	0.0478	1.0000	0.0265	0.0382	0.0484	0.0374	0.0395	0.0373	0.0400	0.0392

DOE number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9	0.0376	0.0406	0.0412	0.0317	0.0411	0.0360	0.0303	0.0265	1.0000	0.0417	0.0471	0.0377	0.0517	0.0355	0.0385	0.0391
10	0.0422	0.0469	0.0387	0.0437	0.0338	0.0448	0.0474	0.0382	0.0417	1.0000	0.0530	0.0368	0.0416	0.0384	0.0494	0.0323
11	0.0405	0.0497	0.0385	0.0509	0.0442	0.0320	0.0448	0.0484	0.0471	0.0530	1.0000	0.0366	0.0441	0.0449	0.0450	0.0450
12	0.0485	0.0447	0.0418	0.0479	0.0434	0.0400	0.0286	0.0374	0.0377	0.0368	0.0366	1.0000	0.0508	0.0489	0.0404	0.0406
13	0.0389	0.0307	0.0399	0.0459	0.0409	0.0417	0.0273	0.0395	0.0517	0.0416	0.0441	0.0508	1.0000	0.0356	0.0419	0.0356
14	0.0440	0.0465	0.0467	0.0316	0.0450	0.0377	0.0428	0.0373	0.0355	0.0384	0.0449	0.0489	0.0356	1.0000	0.0346	0.0471
15	0.0357	0.0431	0.0315	0.0368	0.0490	0.0495	0.0368	0.0400	0.0385	0.0494	0.0450	0.0404	0.0419	0.0346	1.0000	0.0336
16	0.0393	0.0399	0.0392	0.0321	0.0379	0.0378	0.0359	0.0392	0.0391	0.0323	0.0450	0.0406	0.0356	0.0471	0.0336	1.0000

上述散斑只是照明光斑图样中所包含的,且属于未完全发展的散斑,照明光斑被微显示器件调制后投影到屏幕上形成图像,由于粗糙屏幕的影响,散斑会进一步发展。16 幅 DOE 的照明光斑分别投影到屏幕上产生的散斑对比度如图 6 所示,16 幅 DOE 经过屏幕产生的平均散斑对比度为 0.991,表明此时散斑属于完全发展散斑。表 2 显示了叠加 1、4、8、12、16 幅 DOE 的散斑图样后结果散斑图样的散斑对比度与 SCR 的理论值[由(8)式计算得到]和仿真值。表 2 中的数据表明,叠加多幅 DOE 散斑图样后得到的散斑图样的散斑对比度与 SCR 理论值和仿真值十分接近,可以认为 16 幅 DOE 产生的照明光斑经粗糙屏幕的作用后得到的散斑图样相互之间完全独立。

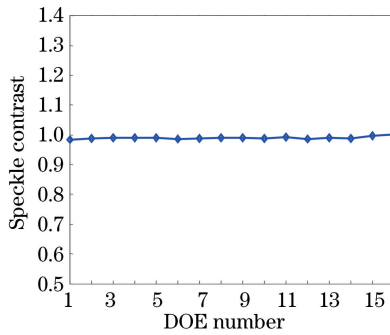


图 6 16 幅 DOE 的衍射图样投影到屏幕上的散斑对比度

Fig. 6 SC while 16 DOEs diffraction pattern is projected to screen

表 2 多幅 DOE 散斑图样时域叠加后的散斑对比度与 SCR 的理论值和仿真值

Table 2 Theoretical value and simulation of SC and SCR of temporal superposition of several DOEs speckle pattern

		Number of DOEs added				
		1	4	8	12	16
Theoretical value	SC	0.991	0.4955	0.3504	0.2861	0.2477
	SCR	1	0.5	0.3536	0.2887	0.25
Simulation value	SC	0.991	0.4968	0.3521	0.2879	0.2508
	SCR	1	0.5013	0.3553	0.2905	0.2531

单幅 DOE 照明光斑投影到屏幕上产生的散斑示意图如图 7(a)所示,叠加 16 幅散斑图样后的结果如图 7(b)所示,通过对比可以证明该方法在散斑抑制方面的有效性(将散斑对比度从 0.991 降低到 0.2508)。

5 结 论

提出了利用一个 LCoS 器件同时实现激光整形匀化和散斑抑制的方法。在不同的初始相位条件下,运用精细化设计思想设计了所需的 16 幅 DOE 的相位分布,与普通的 G-S 算法相比,精细化设计的 DOE 不仅实现了将圆形照明光束整形成矩形光斑,而且可以同时较好地控制采样点及采样点以外的光场强度分布,一定程度上抑制了由 DOE 自身带来的散斑,改善了光斑的均匀性。在人眼积分时间内,LCoS 依次显示出 16 幅 DOE 的矩形光斑图样,实现 16 幅光斑图样的叠加,改善了照明光斑均匀性,抑制了系统投影到屏幕上的

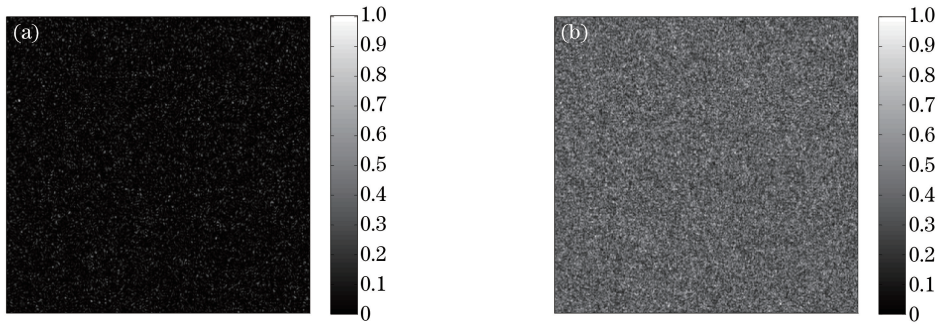


图 7 不同数量的 DOE 衍射图样投影到屏幕上产生的散斑示意图。(a)单片 DOE;(b)16 幅 DOE 叠加

Fig. 7 Speckle pattern on screen projected by different numbers of DOE diffraction patterns.

(a) One DOE; (b) overlap of 16 DOEs

散斑。结果显示,该方法可使照明光斑均匀性从 74% 提高到 92.57%,使散斑对比度从 0.991 降低到 0.2508。该方法稳定性高,能耗低,且所用器件尺寸小,有利于激光投影显示系统的小型化,为微投影显示结构设计提供了有益参考。

参 考 文 献

- 1 Zhao Jianyong. Projection display technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 30-42.
赵坚勇. 投影显示技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 30-42.
- 2 Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based display: a review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): 79-98.
- 3 Chen P C, Chen C C, Yao P H, *et al.* Double side lenslet array for illumination optics of laser projector[C]. SPIE, 2009, 7232: 72320X.
- 4 Dong Hui, Zhang Yunfang, Li Hui, *et al.* Light pipe illumination system design for new laser projection display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 012202.
董 辉, 张运方, 李 慧, 等. 新型激光投影显示方棒照明系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 012202.
- 5 Zhang Wei, Liang Chuanyang, Li Jin, *et al.* Design of optical elements for beam shaping and uniform illumination in laser digital projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0805001.
张 巍, 梁传样, 李 金, 等. 用于激光数字投影显示系统的匀光整形元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0805001.
- 6 Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane picture[J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
- 7 Yang G, Gu B. On the amplitude-phase retrieval problem in optical systems[J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(3): 410-413.
- 8 Kirkpatrick S, Galatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.
- 9 Voicu L I, Rabadi W A, Myler H R. Object support reconstruction from the support of its autocorrelation using multiresolution genetic algorithms[J]. Optical Engineering, 1997, 36(10): 2820-2827.
- 10 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan, *et al.* Precise design of diffractive optical element for beam smoothing[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(1): 29-32.
谭峭峰, 严瑛白, 金国藩, 等. 衍射光学束匀滑器件的精细化设计[J]. 中国激光, 2002, 29(1): 29-32.
- 11 Wang L, Tschudi T, Halldorsson T, *et al.* Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements [J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1770-1775.
- 12 Kuratomi Y, Sekiya K, Satoh H, *et al.* Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(8): 1812-1817.
- 13 Trisnadi J I. Hadamard speckle contrast reduction[J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 11-13.
- 14 Sun Mingjie, Yu Kanglong, Meng Zhaokui. Speckle suppression method with vibrating light pipe[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002013.
孙鸣捷, 于康龙, 孟照魁. 一种采用振动混光棒的散斑抑制技术[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002013.
- 15 Qu Weidong, Gu Huarong, Tan Qiaofeng, *et al.* Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping[J]. Applied Optics, 2015, 54(21): 6521-6524.
- 16 Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Englewood: Roberts & Company, 2007: 14-50.
- 17 International Classification for Standards. ANSI/N APM IT7. 228-1997, American national standard for audiovisual systems-electronic projection fixed resolution projectors[S]. American Nuclear Society Specificatioin.