

doi: 10.3788/gzxb20174601.0105002

基于位相分布限制衍射光学元件的散斑抑制方法

梁传样^{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, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 根据散斑产生的机理, 利用像素点之间干涉的概念, 提出了通过限制光场的位相分布范围来抑制投影图像中散斑对比度的方法. 在部分发展散斑的条件下, 推导了位相均匀分布情况下的散斑对比度公式, 揭示了当相位分布范围在 $0.6\pi \sim 2\pi$ 之间时, 散斑对比度随相位分布范围的变化而震荡变化, 当把相位分布范围限制在 0.6π 以下时, 散斑对比度会随相位分布范围的减小而迅速下降. 建立了理想仿真模型和实际仿真模型来验证该方法的正确性和可行性. 在理想仿真模型中, 当位相分布范围从 2π 变到 0, 所得散斑图样对比度从 66.44% 降到 0; 在实际仿真模型中, 模拟了实际激光投影系统的光路结构, 并运用了两片衍射光学元件, 一片用于激光整形匀化, 一片用于光场的位相分布范围限制, 散斑图样对比度从 92.78% 降低到 2.09%. 该方法稳定性高、耗能低、使用元件尺寸小, 为全息投影显示的散斑抑制提供了参考.

关键词: 衍射光学; 散斑抑制; 位相调制; 衍射光学元件; 全息投影显示

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0105002-7

Speckle Reduction Method with Phase Range Limited Diffractive Optical Element

LIANG Chuan-yang^{1,2}, ZHANG Wei¹, RUI Da-wei¹, SUI Yong-xin¹, YANG Huai-jiang¹

(1 *Engineering Researcher Center of Extreme Precision Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: According to the generation mechanism of speckle, utilizing the concept of interference on a pixel point, a speckle suppression method was proposed which can reduce the Speckle Contrast (SC) of the projection image by limiting the phase distribution range in the optical field. The SC formula is derived in the uniform interval phase range for partially developed speckle conditions, showing that when phase distribution rang is limited between 0.6π and 2π , a quasi-oscillatory behavior of SC appears with the change of phase distribution rang; and SC will be falling rapidly with the lessening of phase distribution rang when phase distribution rang is smaller than 0.6π . An ideal simulation model and a real simulation model were established to verify the correctness and feasibility of this method. In the ideal simulation model, the SC can be reduced from 66.44% to 0% as the phase range limitation varying from 2π to 0. In the real simulation model, the actual structure of the optical path was simulated in the laser projection system, there are two diffractive optical elements in the real simulation model, one is for laser shaping, and the other one is for limiting the phase range of optical field, the SC is reduced from 92.78% down to 2.09% in the real simulation model. The proposed approach presents a significant reference with

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2015AA033201)资助

第一作者: 梁传样(1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学设计和激光显示. Email: lcy199201@163.com

导师: 杨怀江(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为紫外光刻技术、光学信息融合以及网络信息安全方面. Email: yanghj@sklao.ac.cn

收稿日期: 2016-08-01; 录用日期: 2016-10-08

<http://www.photon.ac.cn>

a low power consumption and a stable display architecture for speckle suppression application in holographic display.

Key words: Diffractive optics; Speckle; Phase modulation; Diffractive optical element; Holographic projection display

OCIS Codes: 050.1970; 030.6140; 060.5060; 050.1380; 090.2870

0 引言

激光以其高亮度、高准直性和高相干性等优异特性,被广泛应用于工业、军事、通信等领域.同时,在投影显示方面,相比于传统显示技术,激光显示具有高饱和度、大色域、高亮度、低能耗及长寿命等优点,被业界认为是下一代显示系统的主流光源^[1-2].然而,由于激光光源的高度相干性,以激光为光源的系统通常会观察到一种无规则分布的亮暗斑点的散斑现象.激光散斑的存在严重影响了投影图像的质量,这是激光照明应用的瓶颈之一^[3],在激光投影应用中,必须抑制激光散斑.

散斑抑制方法的主流思想是叠加多幅独立的散斑图样,通过时间积分实现散斑抑制.可大体将散斑抑制方法分为两类,一类是通过时间序列产生多幅独立的散斑图样^[4-8],例如加入运动的散射体(衍射光学元件等)^[4-5],振动匀光方棒^[6],超声波装置^[7],利用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)变形镜^[8]等;另一类是瞬时产生多幅独立的散斑图样^[9-12],如采用宽频激光光源^[9-10],随机激光^[11],采用多个激光阵列^[12]等.但是,这些方法都是利用人眼的积分效应,通过时间积分来进行消散斑,极少有研究人员根据散斑产生的本质原理,从光场的位相分布的角度出发来抑制散斑,而且这种方法可以得到低散斑对比度的图像.

散斑现象可以看作是像面上形成干涉的光矢量的叠加,光矢量的位相分布不同,像面上形成的散斑现象也会不同.因此,可以通过调整光场的位相分布来改变投影图像,这就用到了波前操作技术.波前操作技术在许多场合中都有应用,例如,荷兰屯特大学的 Vellekoop 和 Mosk 就是通过改变波前位相分布,使得照明相干光在通过不透明散射介质后,在特定的像面上聚焦^[13];华侨大学的黄惠玲等也通过该技术实现了相干光经过散射介质的有效聚焦^[14].

本文采用相同的思想:通过采用位相调制型衍射光学元件来实现波前的位相补偿,从而抑制投影图像中存在的散斑.建立了简单的理想仿真模型和模拟实际激光投影显示系统的实际仿真模型来验证该方法的正确性.在实际仿真模型中,运用了两片衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE),一片用于激光的整形匀化,通过傅里叶迭代算法^[15]设计得到;另一片则是通过位相补偿的原理来限制光场的位相分布.仿真结果显示了该方法对散斑的有效抑制,与前面提到的散斑抑制方法相比,该方法不需要复杂冗余的机械运动装置,稳定性高,且运用的 DOE 具有体积小、重量轻的优点,有利于激光投影系统的小型化.

1 仿真模型

1.1 理想仿真模型

为了验证基于位相分布限制抑制散斑的方法的合理性和有效性,将激光投影系统简化成 3 部分:物面,透镜及像面,基于此建立一个理想的仿真模型(Ideal Simulation Model, ISM),模型示意图如图 1(a).

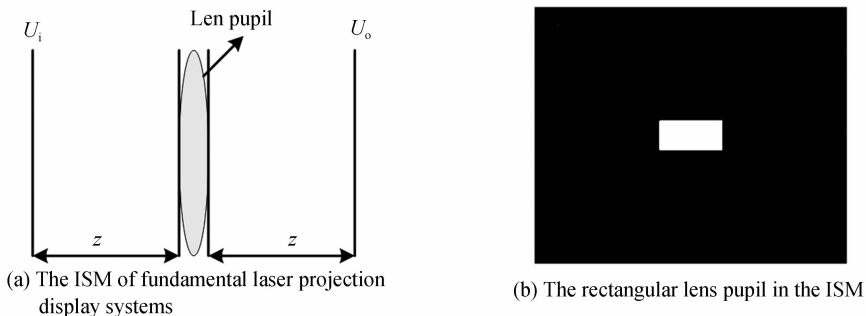


图 1 理想仿真模型及其矩形光瞳

Fig. 1 Schematic diagram of the ISM and the rectangular pupil

在理想仿真模型中,物面光场分布为理想光场分布 $U_i(\xi, \eta)$,然后通过透镜的点扩散函数 $h(u, v; \xi, \eta)$ 的

作用,得到像面光场分布 $U_o(u, v)$. 为了数学上的简化,将系统的放大倍率设为 1,则系统的点扩散函数可表示为

$$h(u, v; \xi, \eta) = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \iint P(x, y) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda z} [(u - \xi)x + (v - \eta)y] \right\} dx dy \quad (1)$$

式中, $P(x, y)$ 是系统中透镜的光瞳函数. 令 $\tilde{x} = x/\lambda z, \tilde{y} = y/\lambda z$, 点扩散函数则为

$$h(u, v) = \iint P(\lambda z \tilde{x}, \lambda z \tilde{y}) \exp \{-j 2\pi [u \tilde{x} + v \tilde{y}]\} d\tilde{x} d\tilde{y} \quad (2)$$

那么像面光场分布 $U_o(u, v)$ 可表示为

$$U_o(u, v) = \iint h(u - \xi, v - \eta) U_i(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (3)$$

或者可表示为

$$U_o(u, v) = h(u, v) \otimes U_i(u, v) \quad (4)$$

因此,可以通过改变系统中 $U_i(\xi, \eta)$ 的位相分布来抑制像面上的散斑,改善像面上的成像质量. 由于激光投影系统的空间光调制器为矩形,将图 1(a)中透镜的光瞳窗的形状也设置为矩形,矩形光瞳窗如图 1(b).

1.2 实际仿真模型

实际仿真模型 RSM(Real Simulation Model)模拟了在实际激光投影系统的光路结构下,利用限制位相分布范围的方法,来抑制激光投影显示系统中散斑的情况,模型示意图如图 2.

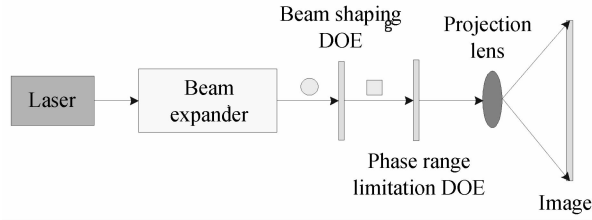


图 2 激光投影显示系统实际仿真模型示意图

Fig. 2 The RSM of a laser projection display system

在该模型中,激光光源波长为 632.8 nm,激光通过准直扩束系统(包含一空间滤波器和准直镜)变换成位相分布为常量位相分布,光强为高斯分布的准直光. 准直光正入射在第一片 DOE 上,该片 DOE 用于激光整形匀化,其尺寸为 7.2 mm,像素数量为 1024×1024 ,像素大小为 $7 \mu\text{m}$,在距离整形 DOE 120 mm 的衍射面上产生 $5.712 \times 3.15 \text{ mm}$ 的矩形光场. 整形 DOE 通过傅里叶迭代算法设计得到,图 3(a)是整形 DOE 的位相分布图,图 3(b)则是衍射面上产生的矩形光场的示意图. 因此,整形 DOE 将圆形的高斯分布的激光束整形成平顶矩形光束. 位于衍射面处的位相分布限制 DOE 大小与形状均与矩形光场一致,像素特征也一致,得到该 DOE 像素数量为 300×544 ,像素大小为 $10.5 \mu\text{m}$. 该片 DOE 用于补偿矩形光场的位相分布,从而限制光场的位相分布范围,达到抑制散斑的目的. 图 3(c)是将出射波前位相分布限制为 0 的位相分布限制 DOE 的位相分布示意图,它与图 3(b)矩形光场的位相分布数值相等,符号相反. 因此,衍射面波前经过位相分布限制 DOE 的位相补偿后,出射波前位相分布就被限制为 0.

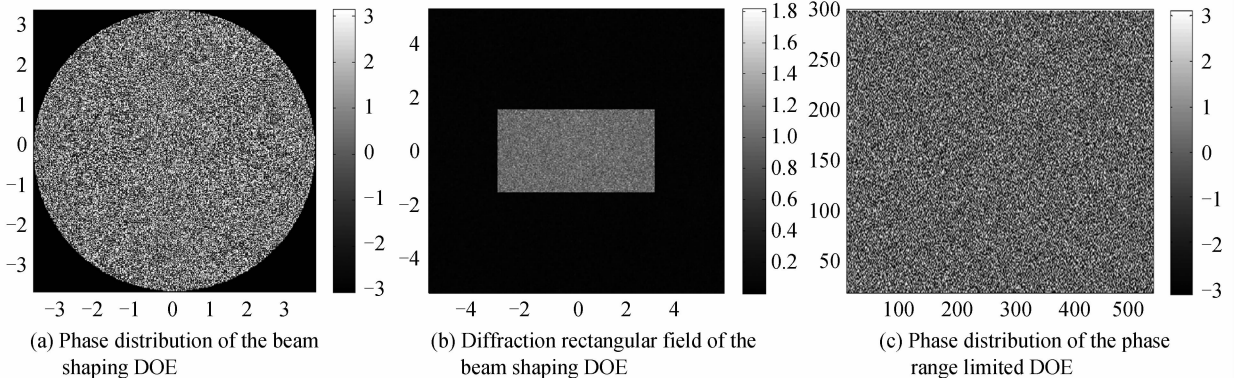


图 3 衍射光学元件的位相分布与衍射光场分布

Fig. 3 Phase distribution and diffraction field distribution of DOEs

2 理论分析

散斑现象本质上可以视为光强场上光矢量相互之间不规则的干涉行为,因此,本文通过限制光场位相分布范围,从而影响光场矢量干涉行为,达到散斑抑制的效果.根据文献[16]所述,当光场中大量位相分布不均匀的光矢量相叠加时,此时将产生部分发展散斑(Partially Developed Speckle, PDS).通常将散斑对比度(Speckle Contrast, SC)作为衡量散斑强弱的参量,其表达式为

$$SC = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} = \frac{\sqrt{\bar{I}^2 - \bar{I}^2}}{\bar{I}} \quad (5)$$

式中 \bar{I} 与 \bar{I}^2 分别是散斑场图样强度的一阶均值和二阶均值, σ_I 是散斑场强度的标准差.

下面将理论分析光场位相分布范围对散斑的影响.有 N 个光矢量分量的光场表达式为

$$A = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{j\varphi_n} \quad (6)$$

则场强可表示为

$$I = AA^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N a_n a_m e^{j(\varphi_n - \varphi_m)} \quad (7)$$

认为式(7)中的振幅 a_n 和 φ_n 具有任意的统计性质且相互之间统计独立,那么可以得到场强的均值为

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \overline{a_n a_m e^{j(\varphi_n - \varphi_m)}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{a}_n^2 + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \overline{a_n a_m} M_\varphi(1) M_\varphi(-1) = \\ &\bar{a}^2 + (N-1) \bar{a}^2 M_\varphi(1) M_\varphi(-1) \end{aligned} \quad (8)$$

关于式(7),我们假定所有的 a_n 都独立统计,且具有相同的一阶均值 \bar{a} 和二阶均值 \bar{a}^2 ;同时假定所有 φ_n 独立统计,且有共同的特征函数 $M_\varphi(\omega)$.

接下来计算场强的二阶均值 \bar{I}^2 ,其表达式为

$$\begin{aligned} \bar{I}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \overline{a_n a_m a_p a_q e^{j(\varphi_n - \varphi_m + \varphi_p - \varphi_q)}} = \frac{1}{N} [\bar{a}^4 + (N-1)(4\bar{a}\bar{a}^3 M_\varphi(1) M_\varphi(-1) + \\ &(N-2)(N-3)\bar{a}^4 M_\varphi^2(1) M_\varphi^2(-1) + (\bar{a}^2)^2 (1 + M_\varphi(2) M_\varphi(-2)) + \bar{a}^2 \bar{a}^2 (1 + (N-2) \cdot \\ &(4M_\varphi(1) M_\varphi(-1) + M_\varphi^2(1) M_\varphi(-2) + M_\varphi^2(1) M_\varphi(-2)))] \end{aligned} \quad (9)$$

为简化式(8)、(9),假设

1)光场中任意的光矢量振幅为单位振幅,于是有 $\bar{a}^4 = \bar{a}^3 = \bar{a}^2 = \bar{a} = 1$;

2)位相 φ 在区间 $(-\sqrt{3}\sigma_\varphi, \sqrt{3}\sigma_\varphi)$ 中具有一均匀概率密度函数, σ_φ 是位相 φ 的标准差,在本文中还用来说表征限制像素位相的分布范围.此时位相 φ 的特征函数为

$$M_\varphi(\omega) = \frac{\sin(\sqrt{3}\sigma_\varphi\omega)}{\sqrt{3}\sigma_\varphi\omega} \quad (10)$$

根据以上假设,结合式(5)、式(8)和式(9),可以得到散斑对比度SC的表达式为

$$SC = \sqrt{\frac{(1-1/N) \{1 + M_\varphi^2(1)(2N-4) + M_\varphi^4(1)(-4N+6) + M_\varphi^2(1)M_\varphi(2)(2N-4) + M_\varphi^2(2)\}}{1 + 2(N-1)M_\varphi^2(1) + (N-1)^2 M_\varphi^4(1)}} \quad (11)$$

图4显示了在 $N=2, 10, 100, 1000$ 的情况下,散斑对比度SC与位相分布范围 σ_φ 的关系图.在这里, φ 表征的是光场上各像素的位相, σ_φ 代表像素位相分布的范围.如果临近像素点之间位相差异是 $2n\pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$),那么它们之间的干涉是积极的,如果临近像素点之间位相差异是 $(2n+1)\pi$,那么它们之间的干涉是消极的.因此,当所有像素位相分布范围为 2π 时,那么相邻像素点的位相差将是 $0 \sim 2\pi$ 之间的任意值,发生干涉时干涉场就会在积极场和消极场之间随机分布;当所有像素位相分布范围为 0 时,即所有像素点位相一致,那么得到的干涉场就全是积极场,从而抑制了散斑现象.从图4可以看出,当波前位相分布范围限制在 $0.6\pi \sim 2\pi$ 之间时,散斑对比度随波前位相分布范围变化而震荡变化,且 N 越大,震荡越剧烈;当位相分布范围小于 0.6π 时,散斑对比度随位相分布范围减小而降低,位相分布范围减小至 0 时,散斑对比度降为 0 .

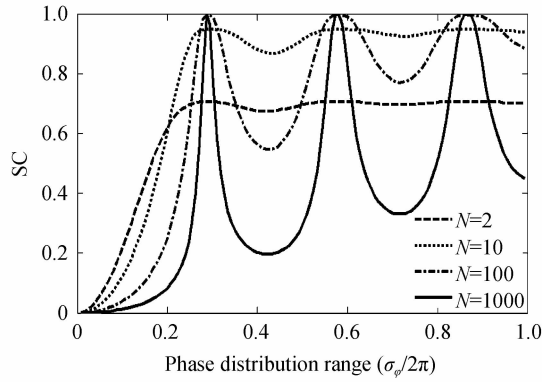

 图4 散斑对比度 SC 与位相分布范围 σ_φ 的关系

 Fig. 4 The relationship between SC and phase distribution range σ_φ

3 仿真分析

第3部分的相关分析为限制位相分布范围抑制散斑提供了理论支持,现在从仿真的角度来验证该方法的可行性与有效性.以下是理想仿真模型(ISM)和实际仿真模型(RSM)所得结果.

图5显示了在理想仿真模型中,分别将波前位相分布范围限制为 2π 、 π 以及 0 时,模拟得到的散斑图样示意图.可以明显看到,散斑被显著抑制,且当位相分布范围为 0 时,散斑消失,这与第3部分理论分析是完全相符的,表明了通过限制波前位相分布范围来抑制散斑的方法理论是正确的.

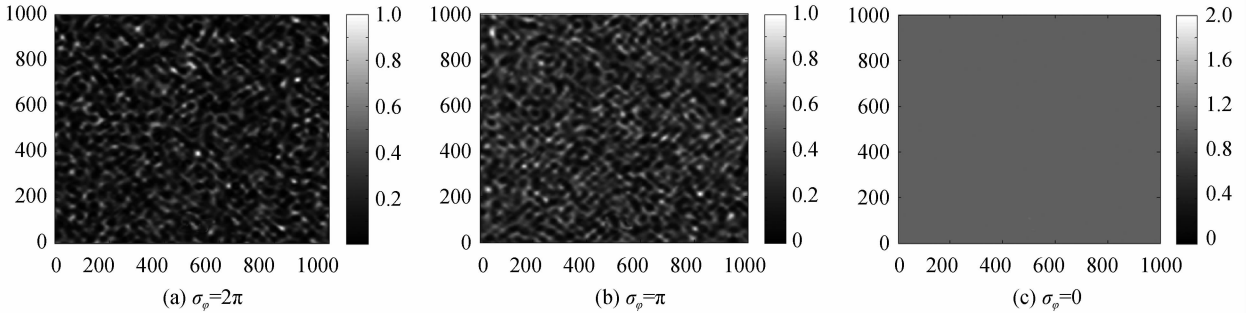


图5 ISM 中不同位相分布范围下 SC 抑制情况

Fig. 5 Calculation of the SC with different phase distribution range in ISM

理想仿真模型虽然具有普遍性,但过于简单理想,为进一步验证该方法在实际激光投影显示系统中的可行性及有效性,我们通过一个实际仿真模型来模拟相关情况,实际仿真模型如图2.激光光源通过扩束准直系统后照射在整形匀光 DOE 上,在该 DOE 的衍射面上得到一矩形均匀光斑,然后,位于整形匀光 DOE 衍射面上的位相限制 DOE 补偿均匀矩形光场的位相分布.图6显示了在实际仿真模型中,将波前位相分布范围限制为 2π 、 π 以及 0 时,模拟得到的散斑图样示意图.图6散斑图样的变化表明了在实际激光投影显示系统中,限制位相分布范围能有效抑制散斑.

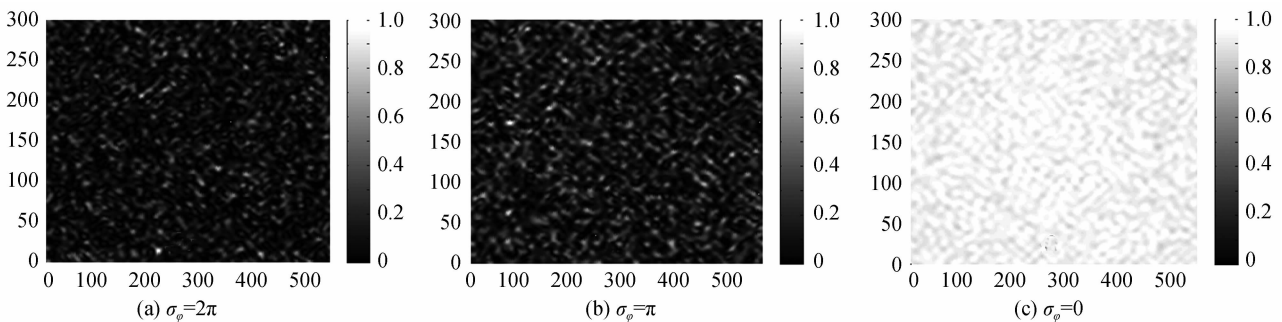


图6 RSM 中不同位相分布范围下 SC 抑制情况

Fig. 6 Calculation of the SC with different phase distribution range in RSM

表 1 显示了不同位相分布范围下得到的散斑图样对比度数值,图 7 是表 1 中仿真得到的 SC 数据与位相分布范围 σ_φ 的关系图.从图 7 可以看出,当波前位相分布范围限制为 $0.6\pi\sim 2\pi$ 之间时,散斑对比度随波前位相分布范围的变化而震荡变化,但当把波前位相分布范围限制在 0.6π 以下时,散斑对比度会随波前位相分布范围减小而迅速下降,当位相分布范围降至 0 时,理想仿真模型中的散斑对比度从 66.44% 降到 0,实际仿真模型得到的散斑图样对比度从 92.78% 降低到 2.09%.模拟仿真结果表明,波前位相分布限制方法是可以很好地抑制散斑的.

表 1 ISM 和 RSM 下不同位相分布范围得到的散斑图样对比度

Table 1 Speckle Contrast of the ideal simulation model and the real simulation model in different phase ranges

Phase range	2π	1.9π	1.8π	1.7π	1.6π	1.5π	1.4π	1.3π	1.2π	1.1π	
ISM / %	66.44	76.05	97.36	97.63	69.00	50.93	48.65	60.12	93.15	86.56	
RSM / %	92.78	95.99	98.46	97.8	92.99	85.32	85.17	93.47	99.98	98.26	
Phase range	π	0.9π	0.8π	0.7π	0.6π	0.5π	0.4π	0.3π	0.2π	0.1π	0
ISM / %	45.18	32.54	31.93	42.55	94.17	40.64	13.68	5.81	2.4	0.78	0
RSM / %	80.22	66.38	66.1	79.66	99.77	76.95	32.76	14.47	6.26	2.81	2.09

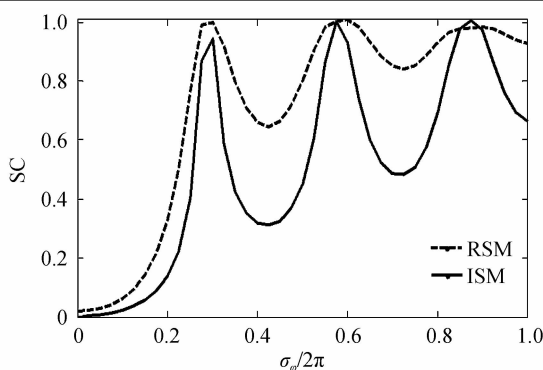


图 7 ISM 与 RSM 的 SC 与位相分布范围的关系曲线

Fig. 7 The relationship curves of the SC versus phase distribution range in ISM and RSM

虽然仿真结果总体上与第三部分分析符合很好,但从图 7 也可以看出实际仿真模型 SC 变化曲线与理想仿真模型 SC 变化曲线在变化规律上存在较大差异,两者在位相分布范围 σ_φ 为 $0.6\pi\sim 2\pi$ 之间时,实际仿真模型 SC 震荡变化曲线要平缓很多,同时在相同的位相分布范围下,实际仿真模型的 SC 值较理想仿真模型要大.导致这种差异有两方面因素,其一是理想仿真模型与实际仿真模型的采样点数量不同,从图 5 和图 6 可以看出这点.理想仿真模型输入光场采样点为 1024×1024 ,而实际仿真模型中,虽然整形 DOE 输出窗口采样点为 1024×1024 ,但落在矩形光场的采样点数量只有 300×544 ,这从图 3(b)可以看出.采样点数量的不同会导致光矢量数量 N 的不同,采样点越小, N 也就越小.从图 4 可以看出, N 越小,在位相分布范围为 $0.6\pi\sim 2\pi$ 之间时,SC 曲线变化就越平缓;其二是在理想仿真模型中,是将位相分布限制 DOE 入射光场看作是强度为 100% 均匀分布的理想光场,而实际仿真模型中,由于设计及位相台阶化的原因,整形匀光 DOE 在衍射面上得到的光场强度 ANSI 均匀性为 89.54%,这势必会导致在相同的位相分布范围内,实际仿真模型得到的 SC 值较大,这同样使实际仿真模型的变化曲线较理想仿真模型平缓.此两方面因素导致了理想模型和实际仿真模型获得的数据变化规律上的较大差异.

4 结论

本文根据散斑产生的本质特性,将散斑视为波前的干涉叠加,提出利用衍射光学元件限制波前的位相分布范围,从而抑制投影图样中散斑的方法.通过理论分析发现,当位相分布范围 σ_φ 在 $0.6\pi\sim 2\pi$ 之间时,散斑对比度随 σ_φ 的变化而震荡变化,当把 σ_φ 限制在 0.6π 以下时,散斑对比度会随 σ_φ 的减小而迅速下降.仿真模型验证了该方法的正确性与可行性,仿真结果表明,位相分布范围从 2π 变到 0,理想仿真模型中散斑图样对比度从 66.44% 降到 0;实际仿真模型中散斑图样对比度从 92.78% 降低到 2.09%.该方法不需要复杂冗余的机械运动装置,稳定性高,且运用的 DOE 具有体积小、重量轻的优点,有利于激光投影系统的小型化,为全息投影显示散斑抑制提供了参考.

参考文献

- [1] CHELLAPPAN K V, ERDEN E, UREY H. Laser-based display; a review[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(25): 79-98.
- [2] YUAN Xi, MA Rui-xin, SHAN Mei-ling, *et al.* High color rendering white-light-emitting diodes based on Cu-doped ZnInS and ZnCdS quantum dots[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(1): 1258-1265.
袁曦,马瑞新,单美玲,等. 基于 Cu 掺杂 ZnInS 和 ZnCdS 量子点的高显色性白光 LED[J]. *发光学报*, 2015, **36**(1): 1258-1265.
- [3] ZHANG Wei, YANG Bo, ZHUANG Song-lin. Reduction of the optical noise in micro laser projector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 870-876.
张薇,杨波,庄松林. 微型激光光学引擎中光学噪音的抑制[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 870-876.
- [4] 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.
- [5] 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*, 2010, **27**(8): 1812-1817.
- [6] SUN Ming-jie, YU Kang-long, MENG Zhao-kui. Speckle suppression method with vibrating pipe[J]. *Chinese Journal of 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.
- [7] CUI Z, WANG A, WANG Z, *et al.* Speckle suppression by controlling the coherence in laser based projection systems[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, **11**(4): 330-335.
- [8] TRAN T, CHEN X Y, SVENSEN Ø, *et al.* Speckle reduction in laser projection using a dynamic deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(9): 11152-11166.
- [9] YU N E, CHOI J W, KANG H, *et al.* Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(3): 3547-3556.
- [10] WANG L, TSCHUDI T, BOEDDINGHAUS M, *et al.* Speckle reduction in laser projections with ultrasonic waves[J]. *Optics Engineering*, 2000, **39**(6): 1659-1664.
- [11] REDDING B, CHOMA M A, CAO H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. *Nature Photon*, 2012, **6**(3): 355-359.
- [12] ZHENG G, WANG B, FANG T, *et al.* Laser digital cinema projector[J]. *Journal of Display Technology*, 2008, **4**(3): 314-317.
- [13] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letter*, 2007, **32**(16): 2309-2311.
- [14] HUANG Hui-ling, CHEN Zi-yang, SUN Cun-zhi, *et al.* Focusing laser beams through opaque scattering media[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(6): 0602004.
黄惠玲,陈子阳,孙存志,等. 激光光束经过不透明散射介质的聚焦[J]. *中国激光*, 2015, **42**(6): 0602004.
- [15] ZHANG Wei, LIANG Chuan-yang, 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.
- [16] GOODMAN J W. Speckle phenomena in optics; theory and applications [M]. Roberts & Company, 2007:14-50.