

光束整形衍射光学元件的优化算法

李昕颖, 钱晓凡*, 孟妮妮

昆明理工大学激光信息处理技术与应用重点实验室, 云南 昆明 650500

摘要 针对几何映射理论不考虑衍射效应, 无法得到精确的输出光束, 且输出光束存在严重振铃效应的问题, 提出一种设计衍射光学元件的新算法。设置一个用于反映衍射效应的参量, 通过迭代的方法确定该参量的最佳取值, 再用改进的 Gerchberg-Saxton(GS)算法对初始相位进行修正, 最终得到所需衍射光学元件的相位分布。该算法与传统 GS 算法相比, 能有效抑制散斑和振铃效应, 得到均匀性更好的输出光束。

关键词 衍射; 激光束整形; Gerchberg-Saxton 算法; 几何映射理论; 散斑抑制

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1105003

Optimization Algorithm of Diffractive Optical Elements for Beam Shaping

Li Xinying, Qian Xiaofan*, Meng Nini

Key Laboratory of Laser Information Processing Technology and Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract This study proposes a new algorithm for designing diffractive optical elements to solve the issues resulting from the fact that geometric mapping theory does not involve the diffraction effect, which results in an inability to obtain a precise output beam and a serious ringing effect of the output beam. The proposed algorithm sets a parameter for reflecting the diffraction effect. The optimal value of this parameter is determined using an iterative method. The initial phase is modified using the the improved Gerchberg-Saxton (GS) algorithm, and the required phase distribution of the diffractive optical elements is finally obtained. When compared with the traditional GS algorithm, the proposed algorithm can effectively suppress the speckle and ringing effect and obtain an output beam with improved uniformity.

Key words diffraction; laser beam shaping; Gerchberg-Saxton algorithm; geometric mapping theory; speckle suppression

OCIS codes 050.1970; 050.1940; 110.6150

1 引 言

激光被广泛应用于各个领域, 激光腔发射的光束通常呈高斯分布, 而实际应用中往往需要均匀分布的激光束, 因此, 将激光束转变为具有均匀光强分布的光束具有研究价值。衍射光学元件(DOE)能够改变输入光束的相位, 得到所需要的光强分布, 并且能量利用率高。利用 DOE 对激光束进行整形是一种理想的选择。

Gerchberg-Saxton(GS)^[1]算法是一种用来设计 DOE 的常用算法, 然而用该方法进行光束整形时, 得到的光强分布通常存在严重的散斑噪声, 这是因为在迭代过程中, 通常选择随机相位作为迭代的初

始相位。相位分布的随机性和不稳定性, 导致输出面发生干涉相长或干涉相消^[2]。为解决这种相位的不确定性, 研究者们对 GS 算法进行了各种改进, Qu 等^[3]和杨美霞等^[4]采用一种精细化采样的方法来抑制散斑, 该算法能抑制部分散斑。Tao 等^[5]提出双约束 GS 算法, 即在迭代过程中, 同时约束输出平面的振幅和相位, 从而消除相邻采样点间破坏性干扰引起的散斑噪声, 但该方法得到的输出光束的能量集中度相比 GS 算法降低了 1 个数量级。Pang 等^[6-7]指出, 使用二次相位作为初始相位能够有效地消除输出图像的散斑噪声, 但要找到合适的二次相位分布是不容易的。最近, Bañas 等^[8-9]提出基于点扩展函数的几何映射方法对激光束进行整形, 得到

收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2019-07-12; 录用日期: 2019-07-24

* E-mail: qianxiaofan1@sina.com

无散斑的输出光束,但输出光束边缘存在严重的振铃效应。

本文提出一种简单有效的算法,用于抑制输出光束的散斑噪声,该算法用一种新的几何映射方法^[8]对输入光束进行预整形,得到一个初始的 DOE 相位分布。几何映射法仅仅基于几何假设,忽略了衍射效应,导致得到的相位分布并不是最优的初始相位分布。因此,本文考虑衍射效应并特意增设一个参量,通过迭代的方法确定该参量的最佳取值,再用改进的 GS 算法进一步优化这个相位分布,该算法将迭代过程中对输出光场振幅的约束限制在期望的区域内,而期望区域外的振幅不进行约束,从而增大输出光场的振幅自由度^[10]。仿真和实验结果表明本文方法能够有效抑制散斑,得到高质量的输出光斑。

2 基本原理

2.1 基于几何映射原理设计 DOE 的初始相位

光学几何映射原理最早由 Kurtz 等^[11]提出,图 1 为一维的几何映射原理图。根据几何映射原理,将输入面和输出面的光强都划分为 N 个部分,每个部分包含相同的能量,然后利用 DOE 对入射光线进行重新定向,使输入平面上每个部分的光线都指向输出平面上对应的位置。然而,通过几何映射原理求解两个平面的位置对应关系是一个比较复杂的问题,采用 $2f$ 系统(f 为焦距)能够简化这个问题的求解。

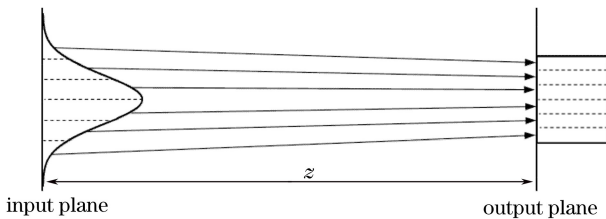


图 1 几何映射原理示意图

Fig. 1 Schematic of geometric mapping principle

z 表示输入平面和输出平面之间的距离。为方便研究,将该光学系统视为线性不变系统,一个空间脉冲在输入面位移,系统的响应函数形式不变,只是产生相应的位移^[12],即

$$L\{\delta(x' - x, y' - y)\} = h(x' - x, y' - y), \quad (1)$$

式中:算符 $L\{\}$ 表示系统; $h(x' - x, y' - y)$ 表示系统输出平面 (x', y') 点对输入平面 (x, y) 点的 δ 函数的激励响应,称为脉冲响应。

对于线性不变系统,输出函数 $g(x', y')$ 是输入函数 $o(x, y)$ 与系统脉冲响应的卷积,则输出函数与输入函数的关系可表示为

$$g(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (2)$$

在 $2f$ 系统中,输出函数为输入函数的傅里叶变换,因此系统的脉冲响应函数为

$$h(x' - x, y' - y) = \mathcal{F}\{\delta(x' - x, y' - y)\}, \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式得到

$$g(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x, y) \exp\left[\frac{-2\pi i}{\lambda f_0} \cdot (x'x + y'y)\right] dx dy, \quad (4)$$

式中, $\mathcal{F}\{\}$ 为傅里叶变换算符, λ 为入射光波长, f_0 为傅里叶透镜焦距。

则 DOE 的透过率函数 $t(x, y)$ 为

$$t(x, y) = \exp\left[\frac{-2\pi i}{\lambda f_0} (x'x + y'y)\right]. \quad (5)$$

从(5)式中发现只要知道输入面的坐标 (x, y) 及与之相对应的输出面坐标 (x', y') , 就能求解得到 DOE 的相位分布,而这种输入输出的对应关系可表示为

$$\begin{cases} x' = u(x) \\ y' = v(y) \end{cases}, \quad (6)$$

式中, $u(x)$ 和 $v(y)$ 分别表示关于 x 和 y 的映射函数,则(5)式中 DOE 的相位分布可表示为

$$\varphi(x, y) = \frac{-2\pi}{\lambda f_0} [u(x)x + v(y)y]. \quad (7)$$

在 $2f$ 光束整形系统中,(6)式的坐标对应关系由几何映射原理得到,如图 2 所示,输入平面为 DOE 所处平面,且输入平面和输出平面分别位于傅里叶透镜的前后焦平面,输出平面的矩形区域被划分为许多个小面元,每个小面元都与输入平面的某个区域相对应。

输出面和输入面的坐标映射关系由能量守恒方程^[13-14]得到,即

$$\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} I(x, y) dx dy = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} I'(x', y') dx' dy', \quad (8)$$

式中, $I(x, y)$ 为输入光束的强度分布, $I'(x', y')$ 为输出平面的强度分布, L 为 DOE 的尺寸, a 为输出

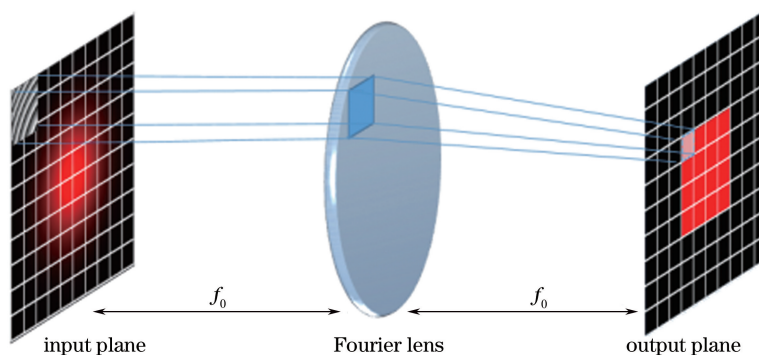


图 2 $2f$ 光束整形系统

Fig. 2 $2f$ beam shaping system

平面目标光束的尺寸。

以输出面为矩形平顶光束为例,由(6)和(8)式求出映射函数 $u(x)$ 、 $v(y)$,再将映射函数代入(7)式,求出 DOE 的相位分布为

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi a}{\lambda f_0} \left[\frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\omega}\right)x + \operatorname{erf}\left(\frac{y}{\omega}\right)y}{\operatorname{erf}\left(\frac{L}{\omega}\right)} \right], \quad (9)$$

式中, $\operatorname{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp(-s^2) ds$ 为误差函数, t, s 为积分式里的符号, ω 为高斯光束束腰半径。

图 3 为基于几何映射原理的数值模拟结果,仿

真参数如下:扩束后的入射光束束腰半径为 5 mm, 波长为 532 nm, DOE 的尺寸为 3.63 mm \times 3.63 mm,目标平顶光束尺寸为 6 mm \times 6 mm,傅里叶透镜的焦距为 300 mm,采样点数为 512 \times 512。图 3(a)为 DOE 的相位分布灰度图,相较于随机相位,该相位分布连续,没有相位突变点,便于加工。图 3(b)为输出光束,可以看出,基于几何映射原理设计的 DOE 能够有效地抑制输出光束的散斑,但输出光束边缘存在严重的振铃效应,从而降低了输出光束的均匀性,并且光束尺寸要大于图 3(c)所示的目标光束尺寸。

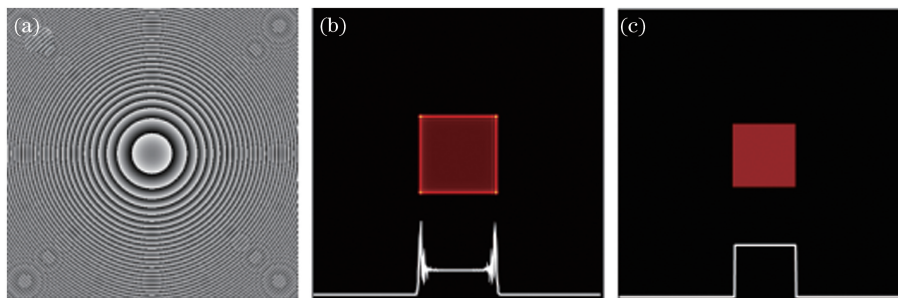


图 3 几何映射理论的数值模拟结果。(a) DOE 相位分布;(b)输出光束强度分布;(c)目标光束强度分布

Fig. 3 Numerical simulation results of geometric mapping theory. (a) Phase distribution of DOE;

(b) intensity distribution of output beam; (c) intensity distribution of target beam

2.2 改进的 GS 算法

使用上述方法推导的 DOE 相位并没有得到理想的输出光束,原因是该方法仅使用几何假设,忽略衍射效应,使相邻的映射点发生重叠和干涉,导致强度低于最初假定的强度,而靠近边缘的位置,重叠的映射点相对于中间位置较少,因此边缘的强度变得更大。为弥补几何映射法带来的设计缺陷,提出改进的 GS 算法。

首先,GS 算法是一种经典的相位恢复算法,即将已知的输入面光场和输出面光场的振幅值作为约

束条件,进行多次傅里叶变换和傅里叶逆变换,当满足给定的条件时,迭代终止,保留当前输入面的相位分布。通常情况下,输入平面和输出平面之间找不出严格的傅里叶变换对,因此 GS 算法往往采用随机相位作为迭代的初始相位,但使用随机初始相位并不能得到满意的结果。

在传统的 GS 算法中,输入平面和输出平面的振幅约束区域覆盖了整个采样平面,而改进的 GS 算法适当放宽了振幅约束条件,即对输出面振幅的约束限制在矩形光斑所在的信号区域,其他区

域为自由区域。在如图 4 所示的改进 GS 算法的振幅约束示意图中,空白部分表示受约束区域,阴影部分表示自由区域, A 和 P 分别表示输入平面

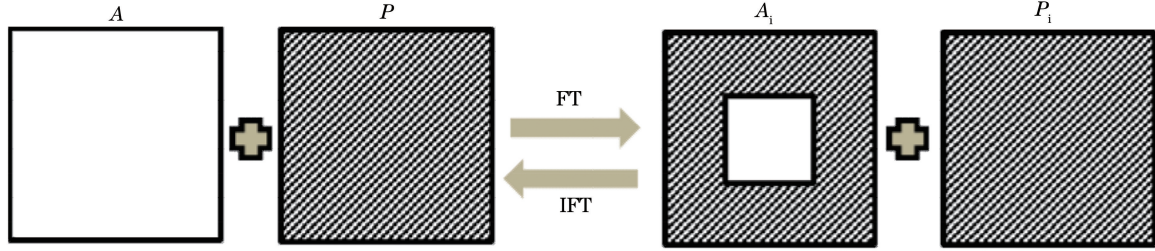


图 4 改进的 GS 算法的振幅约束示意图

Fig. 4 Amplitude constraint diagram of improved GS algorithm

输出面上的目标振幅分布可表示为

$$A_T = \begin{cases} \sqrt{I_T}, & I_T \in S, \\ \sqrt{I'}, & I' \notin S, \end{cases} \quad (10)$$

式中, I_T 为输出面上目标光强分布, I' 为输出面光强分布, S 为信号区域。

在本文算法中,使用(9)式的相位作为迭代算法的初始相位,由于推导这个相位分布时,忽略了衍射效应,故而输出光束边缘部分的光强大于中心部分的光强,并且实际光束尺寸大于所需要的目标光束尺寸。因此,需结合衍射理论来弥补几何理论所带来的缺陷,即通过迭代法进一步优化几何方法设计的初始相位。在本文迭代算法中,用一个小于 1 的参量 α 来修正(9)式的相位,使计算得到的输出光束尽可能接近目标光束。通过调整 α 的大小可以控制输出光束的尺寸和强度,如图 5 所示, α 越大,输出光束尺寸越大,光强越弱。

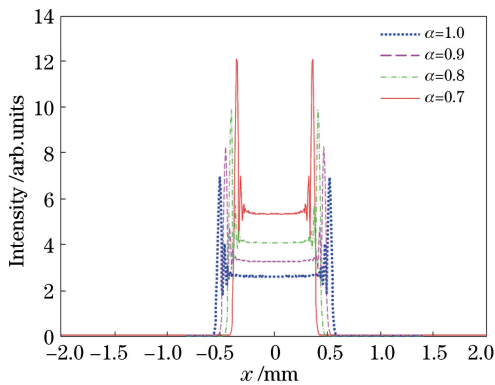


图 5 α 对输出光束尺寸和强度的影响

Fig. 5 Effect of α on output beam size and intensity

该算法设置了两层循环。内层循环使用改进的 GS 算法,用于计算当前初始相位下最优的 DOE 相位分布,如图 6(a)所示。外层循环用于寻找最优的 α 值,进而得到最优的初始相位分布,如图 6(b)所

示,算法以能量集中度 η 是否为最大值作为迭代终止条件,当 η 达到最大时,算法停止迭代,将当前输入平面的相位值作为 DOE 的相位。

示,算法以能量集中度 η 是否为最大值作为迭代终止条件,当 η 达到最大时,算法停止迭代,将当前输入平面的相位值作为 DOE 的相位。

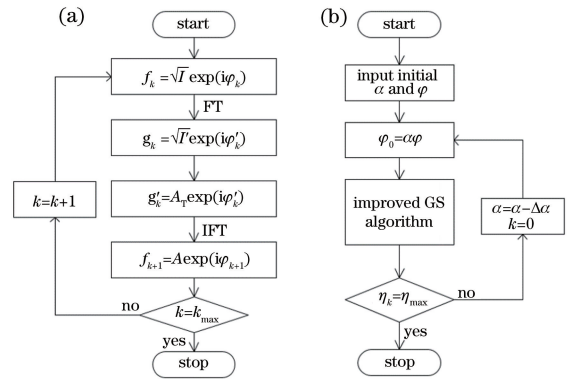


图 6 算法流程图。(a)改进的 GS 算法;(b)算法总流程

Fig. 6 Flow chart of algorithm. (a) Improved GS algorithm; (b) overall flow of the algorithm

在流程图中, k 为当前迭代次数, k_{max} 为最大迭代次数, η_{max} 为能量集中度最大值, φ'_k 为计算得到的输出面相位, φ_{k+1} 为计算得到的输入面相位, $\Delta\alpha$ 为参量 α 的变化量, A_T 为输出面目标振幅, A 为计算得到的输入面振幅, I 为输入面实际光强, I' 为计算得到的输出面光强。

该算法具体步骤如下:

- 1) 将 DOE 的初始相位 φ 设置为(9)式中的相位,并设 α 的初始值为 1。
- 2) 设置进入迭代算法的初始相位 $\varphi_0 = \alpha\varphi$ 。
- 3) 设置入射光场复振幅为 $f_k = \sqrt{I} \exp(i\varphi_k)$, 用傅里叶变换得到输出面复振幅 g_k 。
- 4) 保持输出光场的相位不变,将输出光场振幅替换为(10)式的振幅 A_T ,得到新的输出光场 g'_k 。
- 5) 对输出光场 g'_k 进行傅里叶逆变换,得到新的输入光场 f_{k+1} 。若迭代次数达到最大,则执行步骤 6); 否则迭代次数增加 1,以前一次迭代的相位作

为当前迭代的初始相位,返回步骤 3)。

6) 若能量集中度 η_k 达到最大值(在该算法中判断 η_k 达到最大的条件是 η_k 同时大于 95%、 η_{k-1} 和 η_{k+1}),则以步骤 5)得到的相位作为 DOE 的最终相位,结束循环。否则将迭代次数置 0, $\alpha = \alpha - \Delta\alpha$, 返回步骤 2),开始新一轮迭代。

为评价平顶光束的质量,用均方根误差 R_{MSE} ^[15] 和能量集中度 η ^[16] 作评价指标,其中

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{S+N'} (I' - I_t)^2}{\sum_{S+N'} I_t^2}}, \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\sum_S I'}{\sum_{S+N'} I'}, \quad (12)$$

式中, S 和 N' 分别代表输出光束信号区域和非信号区域。 η 值用于反映 DOE 的能量转换效率, R_{MSE} 用于反映实际输出强度与理想输出强度的逼近程度。

在用于光束整形的 DOE 设计中,还经常利用顶部不均匀性^[17] σ 来反映信号区域光束的平滑程度,

$$\sigma = \frac{1}{N' - 1} \sqrt{\sum_S \left(\frac{I' - \bar{I}}{\bar{I}} \right)^2}, \quad (13)$$

式中, \bar{I} 为信号区域内光强的平均值。

3 设计结果

为说明本文方法的有效性,对实验进行数值仿真,仿真参数与第 2 节的参数一致,其中初始缩放参量 $\alpha = 1$, $\Delta\alpha = 0.005$,最大迭代次数 $k_{\text{max}} = 200$ 。输

出光束在不同 α 值时, η 和 R_{MSE} 的变化曲线如图 7 所示,随着参量 α 的逐渐减小, η 逐渐逼近一个最大值,而 R_{MSE} 逐渐逼近一个最小值,若继续减小 α , η 开始下降, R_{MSE} 则开始上升。值得注意的是,当 α 为 0.575 时, η 和 R_{MSE} 均达到最优。因此,当迭代算法使用的初始相位为 0.575φ 时,输出光束的质量达到最佳,同时也说明 GS 算法对初始相位分布十分敏感,选择合适的初始相位对于 DOE 的设计十分关键。

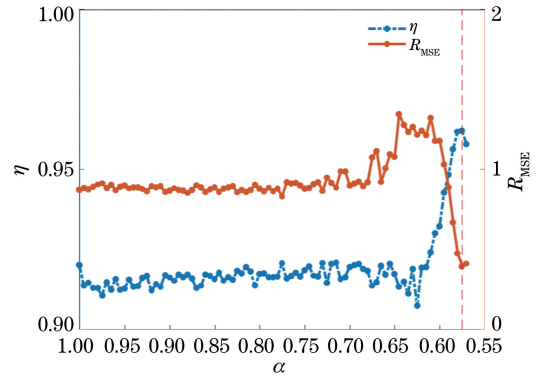


图 7 输出光束在不同 α 值时的性能

Fig. 7 Performance of output beam at different α values

分别用传统的 GS 算法和本文算法设计 DOE,其中,GS 算法使用随机相位作为初始相位分布。图 8(a)和图 8(b)分别为两种算法设计的 DOE 相位分布,图 8(c)和图 8(d)为两种方法设计的 DOE 对光束整形的效果。可以清楚地看到,使用本文算法设计的 DOE 能够有效地抑制输出光束的散斑,相较于使用随机初始相位的 GS 算法设计的 DOE,输出光束的均匀性有了较大的改善。

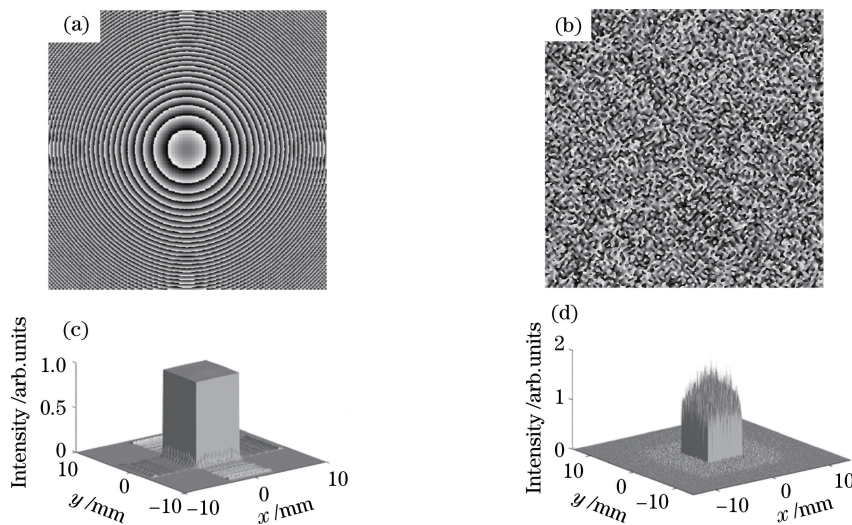


图 8 DOE 设计结果。(a)(c)本文算法设计的相位和光束整形结果;(b)(d)传统 GS 算法设计的相位和光束整形结果

Fig. 8 Design results of DOE. (a)(c) Phase and beam shaping results of the proposed algorithm; (b)(d) phase and beam shaping results of the traditional GS algorithm

表 1 为 GS 算法和本文算法的比较结果,可以看出,本文算法的 η 、 R_{MSE} 和 σ 均优于 GS 算法,其中,顶部不均匀性 σ 的改善最明显,从 GS 算法的 16.05%降低到本文算法的 0.39%。图 8 和表 1 说明本文算法可以有效抑制激光散斑,并且能大大提高 DOE 的光束整形质量。

表 1 本文算法和 GS 算法模拟结果的对比

Table 1 Comparison of simulation results of proposed algorithm and GS algorithm algorithm %

Algorithm	R_{MSE}	η	σ
GS algorithm	72.05	94.49	16.05
Proposed algorithm	36.18	96.20	0.39

本文方法用于将高斯光束整形为矩形平顶光束,除此之外,它还可适用于其他一些简单形状的光束整形,例如圆形平顶光、环形光等。图 9 为输出光束分别为圆形平顶光和环形光的数值模拟结果,同

样能得到较好的仿真结果。遗憾的是,本文方法并不适用于复杂形状的光束整形,主要原因是难以通过能量守恒方程(8)式得到输入面和输出面之间坐标映射关系的解析解。

4 实验结果

为进一步验证本文方法的有效性,进行了光路如图 10 所示的实验。首先对 532 nm 的激光束的半径和偏振方向进行调整,然后依次将 GS 算法和本文算法计算到的 DOE 相位分布加载到空间光调制器(SLM)上,最后调整傅里叶透镜的位置,使 SLM 位于傅里叶透镜的前焦面处,在透镜后焦面处放置 CCD,记录重建光场的强度分布。在该实验中,使用 HOLOEYE LETO SLM 对光波进行相位调制,SLM 的分辨率为 1920×1080 ,像素尺寸为 $6.4 \mu\text{m} \times 6.4 \mu\text{m}$,相位调制范围为 $0 \sim 2\pi$,加载到 SLM 的相位采用 256 个灰度级。

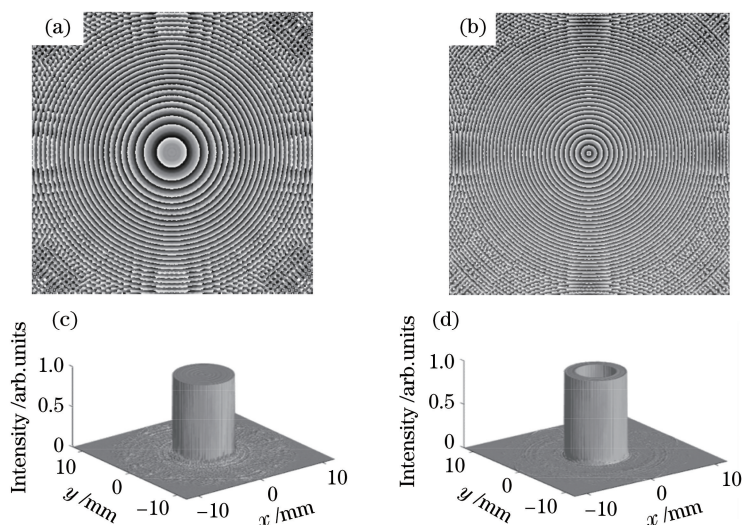


图 9 DOE 设计结果。(a)(c)圆平顶光的 DOE 相位和光束整形结果;(b)(d)环形光的 DOE 相位和光束整形结果

Fig. 9 Design results of DOE. (a)(c) DOE phase and beam shaping results of circular flat-topped light; (b)(d) DOE phase and beam shaping results of circular light

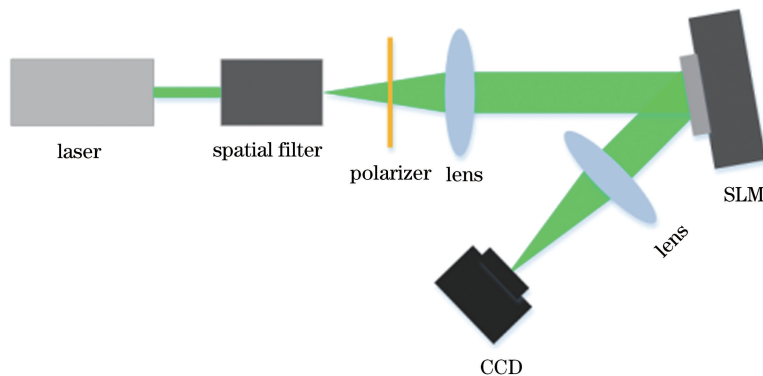


图 10 激光束整形光路图

Fig. 10 Optical path of laser beam shaping

为进行对比,分别用 GS 算法和本文算法进行光束整形实验,得到的光强分布如图 11 所示,图 11(a)(c)和(b)(d)分别为使用随机初始相位的 GS

算法和本文算法的光束整形结果,两组实验采用相同的参数。(11)~(13)式计算出的 η 、 R_{MSE} 和 σ 在表 2 中给出。

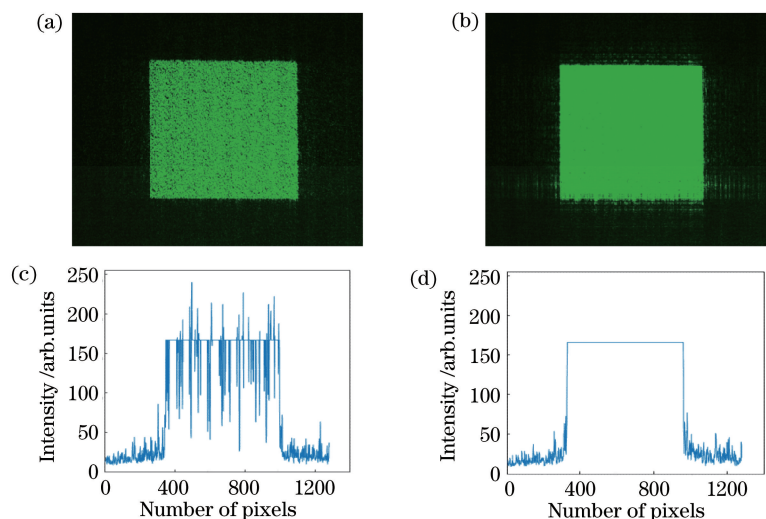


图 11 实验结果。(a)(c) GS 算法的光束整形结果和光强剖面;(b)(d)本文算法的光束整形结果和光强剖面

Fig. 11 Experimental results. (a)(c) Beam shaping results and intensity profiles of GS algorithm;

(b)(d) beam shaping results and intensity profiles of the proposed algorithm

表 2 本文算法和 GS 算法的实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results of proposed algorithm and GS algorithm %

Algorithm	R_{MSE}	η	σ
GS algorithm	77.11	71.38	23.45
Proposed algorithm	49.82	75.14	6.36

实验数据表明,两种算法都能将入射光束整形为矩形平顶光束,但使用本文算法设计的 DOE 得到的输出光束明显优于 GS 算法,相较于 GS 算法, R_{MSE} 降低了 27.29%, σ 降低了 17.09%, η 提升了 3.76%。从图 11 不难发现,随机初始相位的 GS 算法得到的光束受到散斑噪声的严重污染,导致信号区域的光强波动很大。使用本文算法能有效降低输出光束的散斑,得到均匀性较好的平顶光束,显著提高了输出光束的质量。

虽然通过实验证明了本文算法的有效性,但实验结果与数值计算的结果仍然存在一定的差异,其中 η 和 R_{MSE} 与数值计算结果相差较大,这是由于硅基液晶(LCOS)这类像素结构的 SLM,具有有限的填充因子^[18-19],因此重构平面出现高级次衍射光和零级光。由于输出光束受到高级次衍射光和零级光的干扰,整个二维平面的非信号区域被叠加额外的光强,因此 η 和 R_{MSE} 与数值模拟结果有一定的差距。除此之外,由于空间光调制器固有的非线性相位响应与静态误差会降低器件波前控制的精度,加

之实验仪器和实验操作过程均存在误差,所以输出光束仍有局部不均匀、光斑边缘存在毛刺的现象。

5 结 论

提出一种设计衍射光学元件的新算法,该算法能够有效降低光束整形问题中输出光束的散斑噪声,得到高质量的均匀输出光束。该算法结合了几何理论和衍射理论,采用几何映射的方法得到衍射光学元件的初始相位分布,通过迭代的方法在输入平面和输出平面之间反复衍射,从而找到最优的初始相位。本文算法在迭代过程中仅对输出光场信号区域的振幅进行约束,以增大迭代算法的振幅自由度。本文方法适用于对光束均匀性要求较高的场合,缺点是迭代次数较多,需要耗费一定的时间,下一步拟计划通过理论计算直接确定参量 α 的最佳值,以减少迭代次数。

参 考 文 献

- [1] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [2] Chang C L, Xia J, Yang L, *et al.* Speckle-suppressed phase-only holographic three-dimensional display based on double-constraint Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(23): 6994-7001.

- [3] Qu W D, Gu H R, Tan Q F, *et al.* Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6521-6525.
- [4] Yang M X, Kong Z, Tan Q F, *et al.* Precise design of diffraction optical elements based on annular beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0305002.
杨美霞, 孔哲, 谭峭峰, 等. 基于环形光束整形的衍射光学元件的精确设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0305002.
- [5] Tao S H, Yu W X. Beam shaping of complex amplitude with separate constraints on the output beam[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1052-1062.
- [6] Pang H, Wang J Z, Cao A X, *et al.* High-accuracy method for holographic image projection with suppressed speckle noise[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22766-22776.
- [7] Pang H, Liu W J, Cao A X, *et al.* Speckle-reduced holographic beam shaping with modified Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 44-51.
- [8] Bañas A, Separa S D, Engay E, *et al.* Point spread function shaping using geometric analysis[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 522-527.
- [9] Bañas A, Engay E, Bunea A I, *et al.* Three-dimensional light sculpting using a geometric analysis[J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 210-215.
- [10] Wyrowski F. Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(6): 961-969.
- [11] Kurtz C N, Hoadley H O, DePalma J J. Design and synthesis of random phase diffusers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1973, 63(9): 1080-1092.
- [12] Lü N G. Fourier optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 47-52.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 47-52.
- [13] Roberts N C. Beam shaping by holographic filters[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(1): 31-32.
- [14] Dong M F. Algorithms and experiments of computer optical elements [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004.
董梅峰. 计算机光学元件的算法及实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [15] Lü Y F, Dong Y, Li S T, *et al.* Modified algorithm for designing of diffractive optical element to decrease the phase singular spots[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0505001.
吕彦飞, 董渊, 李述涛, 等. 一种用于减少相位突变点的衍射光学元件改进设计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0505001.
- [16] Yu X C, Hu J S, Wang L B. New methods for improving the quality of laser beam shaping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0116002.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0116002.
- [17] Tan Q F, Yu G, Li S X. Binary optics in laser beam transformation and the applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 22-26.
谭峭峰, 虞钢, 李少霞. 激光束二元光学变换及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 22-26.
- [18] Cheng Y, Huang D J, Fan W. Beam shaping capability of amplitude spatial light modulator by electrical addressing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0405001.
程煜, 黄大杰, 范薇. 电寻址振幅型空间光调制器的光束整形能力[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0405001.
- [19] Shen C, Zhang C, Liu K F, *et al.* Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.