

基于动态振幅限制的衍射光学元件优化算法

王博伟¹, 修龙汪², 项涛¹, 李纲¹, 张航^{1*}¹浙江工业大学理学院, 智能光电研究所, 浙江 杭州 310023;²山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237

摘要 针对传统混合区域振幅自由度(MRAF)算法衍射效率低、非信号区域有散斑等问题,提出一种改进的MRAF算法。该算法引入球面相位作为初始相位,使用动态振幅限制,利用基于全域振幅限制的迭代方案确定最佳Z值,并使用爬山邻域算法对得到的相位进行分段式迭代优化,从而改善了非信号区域由于完全无振幅限制有散斑的问题。具体地,在全区域振幅限制阶段所提算法确保了目标光斑的匹配性并可以抑制散斑效应,而在混合区域振幅限制阶段则减小了误差。通过在三角形上进行数值仿真,对最终获得的结果进行光学实验仿真,结果表明,改进后的MRAF算法有97.77%高的衍射效率和0.09%低的均方根误差,并且峰值背景比(PBR)由0.0079提高至2.0357,相比基础的MRAF算法,对目标区域外围的散斑抑制效果更好,具有更高的应用价值。

关键词 衍射光学元件; 光束整形; 迭代算法; 衍射光学元件设计; 微纳光学

中图分类号 O439 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231123

1 引言

激光因高相干性、高亮度、高单色性和高方向性广泛应用于材料加工、通信、医疗、半导体热处理等诸多领域^[1-3]。通常情况下,激光腔发射出的激光光束分布是高斯形式的,多数情况下,这种分布形态的光束是无法正常使用的。在不同的领域,对激光的形状和能量分布有着不同的需求,如透射光学(掩模和类掩模镜)^[4-5]、折射光学(透镜和非球面元件)^[6-8]和衍射光学(传播到远场平面或近场屏幕)^[9-11]。尽管许多情况下,矩形和圆形的光束设计已经能够满足需求,但基于其他图形和更加复杂的均匀光斑构建的系统技术和方法仍然是一个重要的研究方向。衍射光学元件(DOE)是一个较为理想的选择。Gerchberg-Saxton(GS)算法是设计DOE较为常见的迭代算法,但GS算法对初始相位较为敏感,因此人们又提出了基于GS算法的优化和改进算法。

在对算法的改进方式上包括:使用不同的初始相位形态对光斑进行拟合,以提高效率并减少散斑^[12-14];对输出全息面进行零填充,以此缩小采样间隔,减小误差^[15];通过在迭代过程中引入限制参数来抑制振铃伪影^[16];通过加入增强型相位光栅来提高衍射效率等^[17];在GS算法基础上,通过取消迭代过程中对非信号区域振幅的限制,以牺牲部分衍射效率的方式来获得高

均匀度的复杂图形的混合区域振幅自由度(MRAF)算法^[18];通过控制信号区像素数,改善光斑内部的均匀性和边缘陡度的MMRAF算法^[19];在MRAF算法基础上重新定义背景零电位来消除像素涡旋提高收敛速度的OMRAF算法^[20];此外还有引入粒子群算法与模拟退火算法的混合算法^[21]。随着机械学习/深度学习方法的日益成熟,人们也开始尝试引入机械学习/深度学习算法对DOE设计方法中的像差、相位分布平滑性、成像效果进行改善^[22-23]。

在GS的诸多改进算法中,MRAF算法因为能够获得均匀度更高的光斑被用于光束整形以及复杂图形的光束整形,但由于其衍射效率往往不高^[18],并且非信号区域内出现的散斑无法控制,为了解决MRAF算法在衍射效率方面的不足以及完全无法抑制目标区域外散斑效应的问题,本文提出了一种改进的MRAF算法。引入球面相位作为初始相位,同时引入相位系数Z,利用寻优算法对Z值进行寻优处理并将其作为初始相位;进行全域振幅限制,提高初始相位与目标光斑的匹配性并保证衍射效率,再进行混合区域限制来充分调用DOE边缘死区部分减小误差;使用爬山邻域优化算法对DOE相位进行优化,获得最终的DOE相位形式。以三角形作为最终的目标光强分布形式,对比基础的MRAF算法和GS算法,证明所提算法的有效性。

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2023-07-08; 录用日期: 2023-07-11; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(62075197)

通信作者: *physzhang@zjut.edu.cn

2 设计原理

图 1 是传统 GS 算法迭代的流程,其迭代原理是:入射高斯光束的振幅与预设的初始 DOE 相位表面相乘,获得输入光场的分布形式(GS 算法通常使用随机初始相位 φ 作为初始相位);输出面的光场分布由输入

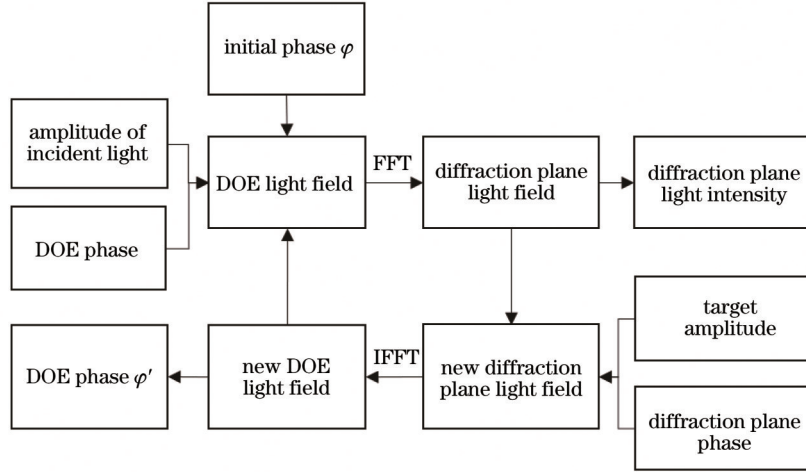


图 1 GS 算法的流程^[14]

Fig. 1 Flowchart of the GS algorithm^[14]

MRAF 算法是由 Pasienski 等提出的,通过对传统 GS 算法进行改进实现。在迭代过程中,对非信号区域的振幅不加以限制,使其自由参与迭代,而目标区域的振幅形态由目标光斑光强的分布形态进行限制,使用这种方法增强对输出面目标信号区域的控制,从而获得更好的收敛性。这种方式能够更好地利用 GS 算法无法调用的 DOE 边缘死区,从而获得更低的误差,迭代过程描述为

$$E_{\text{in}}^{(1)} = |A_0| e^{iK_0}, \quad (1)$$

式中: $E_{\text{in}}^{(1)}$ 为初次的入射光场; A_0 为初始入射高斯振幅分布; K_0 为 DOE 的初始相位分布。

$$E_{\text{out}}^{(n)} = \mathcal{F} \left[E_{\text{in}}^{(n)} \right], \quad (2)$$

式中: $E_{\text{out}}^{(n)}$ 为迭代过程中第 n 次迭代的输出光场,通过对第 n 次迭代的输入光场进行傅里叶变换获得; \mathcal{F} 表示傅里叶变换。

$$G^{(n)} = \left[m \sqrt{I_t} |_{\text{SR}} + (1 - m) E_{\text{out}}^{(n)} |_{\text{NR}} \right] e^{i \arg[E_{\text{in}}^{(n)}]}, \quad (3)$$

式中: $G^{(n)}$ 表示第 n 次迭代的初始光场分布函数; I_t 为目标光强; SR 为信号区域,本次设计中信号区域即目标光斑所在三角形区域,以下简称信号区域; NR 为非信号区域; m 为参数因子,用于控制信号区域与非信号区域的功率比例,本次设计中 $m = 0.5$ 。整个输出面全部允许相位自由,而振幅自由仅在 NR 被允许,SR 的振幅由目标光斑限制。对得到的光场分布 $G^{(n)}$ 进行傅里叶逆变换,将结果作为下一次迭代的初始相位分布,公式为

面进行衍射变换获得;将得到的输出面光场分布的振幅分布替换为目标振幅,进行逆衍射变换得到新的输入面相位分布 φ' ;重复此过程,进行迭代处理,直至获得满足条件的 DOE 分布形式。在实际的计算和应用中,通常使用快速傅里叶变换替代迭代过程中的菲涅耳衍射变换或夫琅禾费衍射变换来提高计算速率。

$$E_{\text{in}}^{(n+1)} = |A_0| e^{i \arg[\mathcal{F}^{-1}[G^{(n)}]]}. \quad (4)$$

重复式(2)~(4),直到满足迭代终止条件,当满足迭代终止条件后,将获得的第 N 代输出场 $E_{\text{out}}^{(N)}$ 分布代入式(3)和式(4),计算得到 E_{in}^{N+1} ,并计算出最终的 DOE 相位分布 K_f ,公式为

$$K_f = \arg[E_{\text{in}}^{(N+1)}]. \quad (5)$$

基础的 MRAF 算法完全放弃了对非信号区域的振幅限制,以此来提高信号区域光斑的均匀度,因此获得的光斑衍射效率较低并且非信号区域存在着较为严重的散斑噪声。为了获得一个具有高衍射效率的光束,并抑制非信号区域的散斑噪声,本文提出了一种改进的 MRAF 算法。首先通过全区域振幅限制,约束信号区域与非信号区域的振幅,抑制非信号区域的散斑并使获得的光束维持在一个较高的衍射效率水平,迭代到指定代系后,取消对非信号区域的振幅限制,提高信号区域光斑内部的均匀度,减小误差。在这两种迭代模式中,全部区域都允许相位自由,通过这种方式,可以在保留初始相位与目标光斑匹配性的基础上,更大程度地调用 DOE 的边缘死区部分,一定程度上减少了算法对初始相位的依赖性。

为了提供一个与目标光斑存在着足够匹配性的初始相位形式,引入球面相位形式,

$$\varphi = Z \times (x^2 + y^2). \quad (6)$$

为了保证初始相位与目标光斑的匹配性,在初始的相位中添加了相位参数 Z ,利用迭代寻优算法在一定的搜索域内搜索最佳的 Z 值,从而确定最佳的初始

相位形式。在优化过程中加入了爬山邻域算法,通过其邻域扰动的方式提高最终获得的光斑效果。为评价最终获得的光斑效果和质量,引入衍射效率 η 和均方根误差(RMSE)两个评价指标,二者的定义为

$$\eta = \frac{\sum I_s}{\sum I}, \quad (7)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum (I - I_1)}{\sum I_1^2}}, \quad (8)$$

式中: I 为输出面实际光强; I_s 为目标区域的实际光强, s 代表平顶光束所在目标区域; I_1 为目标光强。

改进算法的 Z 值寻优流程和改进算法的迭代流程如图 2 和图 3 所示,为了保证改进算法能够获得一个较

高的衍射效率水平并抑制非信号区域的散斑噪声,使用全区域振幅限制对 Z 值进行寻优处理。赋予 Z 一个初始值 Z_1 ,使用全区域振幅限制的迭代方式计算 $Z = Z_1$ 时的衍射效率 η 后, $Z_1 = Z_1 + \Delta Z$,重复上述步骤,直到满足终止条件 $Z = Z_2$,就可以得到相位系数 Z 与衍射效率 η 在 Z_1 至 Z_2 范围内的对应关系,从而确定最佳的初始 Z 值。在改进算法的迭代流程中,代入 Z 值寻优流程确认的带有最佳 Z 值的初始相位, k 为迭代次数(初始为 0),同时设定全区域振幅限制迭代上限 k_1 ,当 $k < k_1$ 时,使用全区域振幅限制进行迭代处理,公式为

$$G^{(n)} = \sqrt{I_t} e^{i \arg[E_{\text{in}}^{(n)}]}, \quad (9)$$

当达到指定迭代次数 k_1 后,迭代模式更改为式(3)的混合区域振幅限制。每次迭代时都对获得的衍射效率 η 和 RMSE 进行计算,用于对比,为保证最终获得光斑的均匀性,迭代终止条件设置为所获得的光斑 $E_{\text{RMSE}} \leq 0.1\%$,达到终止条件后,停止迭代。

3 仿 真

分别使用基础的 GS 算法、MRAF 算法和改进 MRAF 算法设计 DOE,将高斯光束整形为三角形的平顶光束,其中入射的高斯光束振幅分布形态可以表示为

$$u_{\text{in}} = \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega}\right], \quad (10)$$

式中: (x, y) 是输入面的坐标。在仿真模拟计算中具体参量的选择:入射光波长 λ 为 632 nm,高斯光束的束腰半径 ω 为 960 μm ,输入输出面离散点 $M \times M$ 均为 512×512 ,输入面单元尺寸为 8 $\mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$,输入面和输出面之间的距离 F 为 350 mm,输出面单元尺寸为 54 $\mu\text{m} \times 54 \mu\text{m}$, $Z_1 = 1$, $Z_2 = 100$, $\Delta Z = 1$ 。

图 4 反映了对相位权重系数 Z 的寻优过程,可以看出初始的 Z 值对获得二次优化相位的效率的影响,衍射效率在 $Z = 40$ 时达到 0.99 并保持一定代系,在 $Z = 43$ 时衍射效率取得最大值。通过这种方式,得到了相位权重系数 Z 初步优化的相位形式,如图 5(a)所

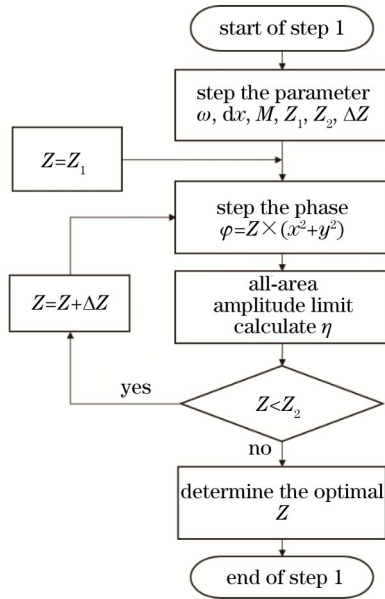


图 2 Z 值寻优流程

Fig. 2 Flowchart of the Z -value optimization

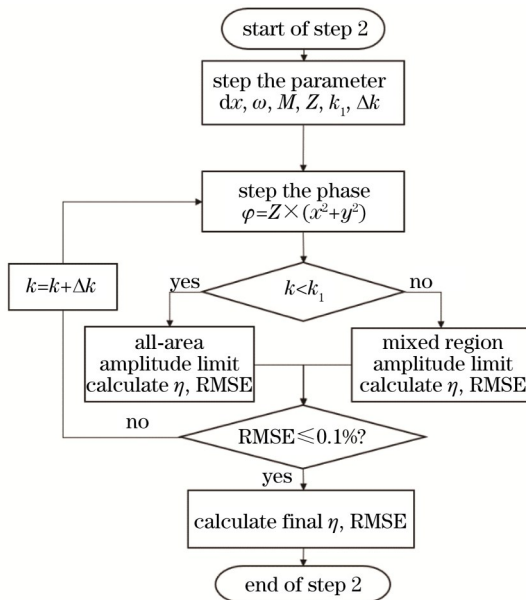


图 3 改进算法的迭代流程

Fig. 3 Iterative process of the improved algorithm

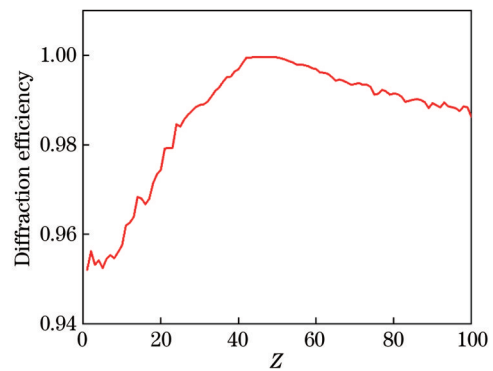


图 4 Z 值寻优曲线

Fig. 4 Curve of the Z -value optimization

示。保留一次优化相位高衍射效率的特点并对非信号区域产生的散斑噪声进行抑制,经过改进算法前半程

的全区域振幅限制,获得的二次相位形式如图 5(b)所示。

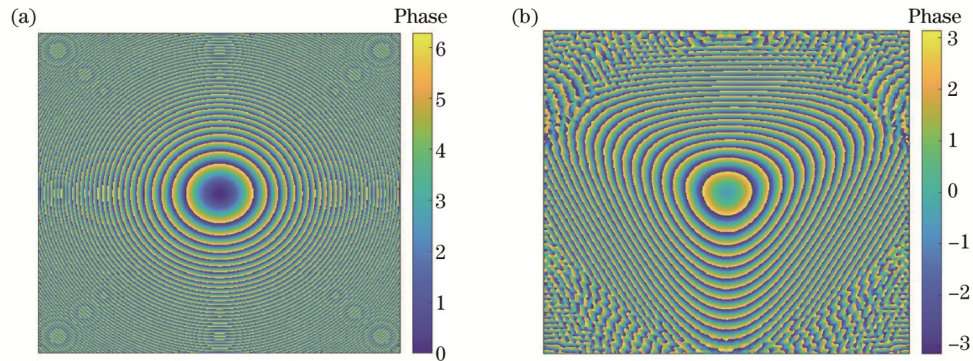


图 5 优化相位图仿真结果。(a)一次优化相位;(b)二次优化相位

Fig. 5 Simulation results of the optimized phase diagram. (a) Primary optimization phase; (b) quadratic optimization phase

为了验证所提算法的有效性,验证改进后的算法效果,将两种算法迭代至同一误差范围下($E_{\text{RMSE}} \leq 0.1\%$)比较衍射效率之间的差异,为确保对比的效果,作为对比的MRAF算法同样使用了一次优化相位作为初始相位,同时加入同样使用一次优化相位的GS算法作为参考对比。

图 6 是本次实验的光路原理。获得目标输出光斑的方式是:对入射的激光进行扩束后,使用偏振镜使其偏振方向为水平方向;光束经过分束镜后落在 SLM 已经加载的相位液晶区域上,经过分束镜反射后,再经透镜最终聚焦在 CCD 的屏幕上,进行观察。图 7 是使用所提改进算法进行迭代得到的结果,改进算法的前半程进行了进一步的寻优,使得到的二次优化相位保持了一个很高的衍射效率,在迭代至 500 次后,算法的迭代模式更改为 MRAF 模式,取消对非信号区域的振幅限制,对 DOE 边缘死区部分进行进一步的调用,使误差得到了进一步减小。图 8 是 MRAF 算法的迭代结果,可以看出同样使用一次优化相位作为初始相位的

MRAF 算法在迭代过程中,误差和衍射效率都能够得到稳定的收敛,但最终的衍射效率水平并不高。图 9 是 GS 算法迭代得到的结果,可以看出,相比 MRAF 算法和所提改进算法,GS 算法无法通过使用一次优化相位获得一个满足迭代终止条件的结果,其 RMSE 相比另外两种算法高出许多,这也很好地证明了所提改进算法对此类图形的光束整形效果要优于基础的 GS 和 MRAF 算法。最终 MRAF 算法与改进算法的 RMSE 均降低至 0.09%,而 GS 算法则无法满足迭代终止条件。可以看出,改进算法的衍射效率虽然后续略有降低但仍保持在 97.77%,高于基础 MRAF 算法的 87.48%。图 10 为 3 种算法最终获得的 DOE 相位分布、输出面目标光斑形态、输出面的相位分布。通过对比 MRAF 算法与改进算法的输出面光斑,从图 10(b)与图 10(e)可以发现,改进算法保证了最终光斑内部均匀并且外围的非信号区域没有产生额外的散斑,这是因为改进算法在一定程度上能够进行全区域振幅限制从而抑制散斑。

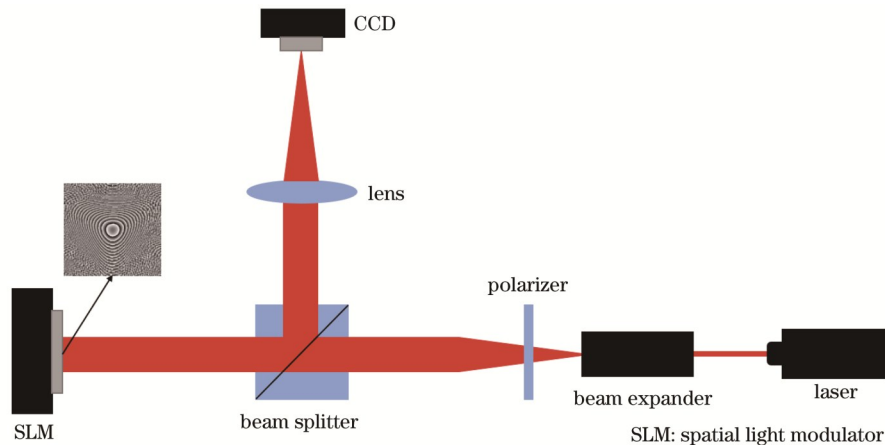


图 6 实验光路原理

Fig. 6 Schematic of the experimental light path

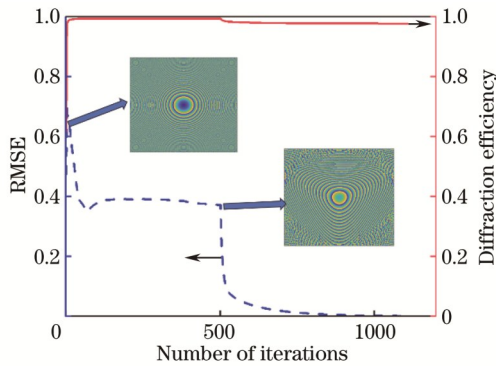


图 7 改进算法的迭代结果

Fig. 7 Iteration result of the improved algorithm

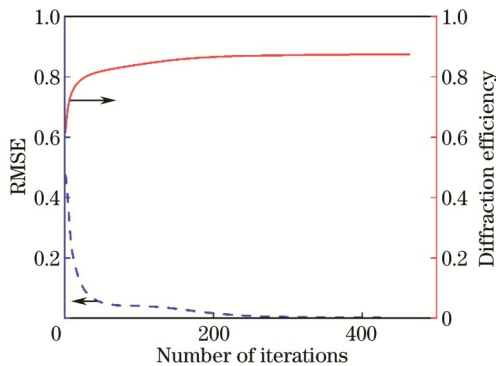


图 8 MRAF算法的迭代结果

Fig. 8 Iterative result of the MRAF algorithm

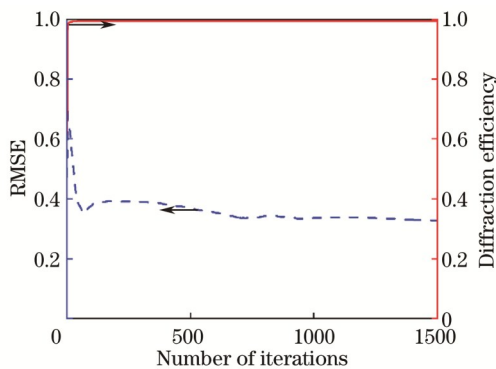


图 9 GS算法的迭代结果

Fig. 9 Iteration result of the GS algorithm

表 1 为 3 种算法获得的衍射效率、均方根误差及获得最终结果对应的迭代次数,对比 3 种算法的迭代次数可以看出,传统的 GS 算法即使迭代次数达到 1500 仍然无法满足预设的迭代终止条件, MRAF 算法在迭代至 460 代左右就可以满足要求,改进算法共迭代 1100 代左右才得到满足条件的结果。这是因为改进算法需要依靠前半程全区域振幅限制迭代方式为其提供二次优化相位,并且由于改进算法迭代时更多地调用死区部分,因此在整体的收敛速度上表现出了一定的劣势。从获得的模拟效果的衍射效率来看,相比文献[18]中的矩形光斑的 45% 和文献[20]中矩形疏水

圆光斑的 24%,改进算法在保证低误差水平的同时,获得的光斑的衍射效率要优于这二者。

表 1 3 种算法的仿真结果

Table 1 Simulation results of three algorithms

Algorithm	Diffraction efficiency / %	RMSE / %	Number of iterations
Improve algorithm	97.77	0.09	1108
MRAF algorithm	87.48	0.09	463
GS algorithm	99.47	32.78	1500

4 实 验

为验证所提改进算法的效果,设计了光学实验,其中采用了纯相位型空间光调制器(SLM),SLM是一种动态的相位调制光学器件,可以通过软件控制将得到的 DOE 相位分布图装载到 SLM 的液晶光学表面,从而实现与实体衍射元件相位分布相同的调制效果,并且可以直接将新的相位形式装载至液晶光学表面。SLM 能够进行动态的相位调制,具有体积小、分辨率高、使用方式简便的特点,因此也广泛应用于光束整形^[24]、全息成像^[25]等领域,此外根据光辐射压原理还可以通过 SLM 构建全息光镊^[17,23,26]。

实验所使用的光路如图 11 所示,所使用的激光器为固体激光器,波长为 632 nm。使用的 SLM 为反射式空间光相位调制器,型号为 HOLOEYE PLUTO VIS,像元大小为 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$,分辨率为 1920×1080 。

图 12 是所使用的激光器的高斯光束能量分布,激光经扩束器得到扩束后,使用偏振片使入射到 SLM 上的激光偏振方向为水平方向,从而使 SLM 处于纯相位调制模式。经 SLM 反射后,反射光经分束镜再通过透镜重新聚焦至 CCD/光束质量分析器。

为了避免零级衍射对实验效果的影响,在 SLM 上加载相位时加入了闪耀光栅,对零级衍射进行了偏移处理。为了对比实验获得的光斑效果,引入散斑对比度 S_c 作评价函数,即

$$S_c = \sigma / \langle I \rangle, \quad (11)$$

式中: σ 为输出面信号区内光斑强度的标准差; $\langle I \rangle$ 为信号区光强平均值。计算中,规定对于输出平面同一位置构建 50×50 像素数的矩形区域作为计算参考区域,即图 13(a)和图 13(b)中矩形框选区域。通过计算得到, MRAF 算法获得的平顶光束散斑对比度为 0.0868,改进算法得到的光斑内部散斑对比度为 0.0841,考虑到入射高斯光束的光束质量和实验过程中各种因素产生的影响,可以认为两种算法获得的目标光斑内部的均匀度趋于一致,GS 算法获得的结果并不满足内部均匀度的要求,因此此处不作对比。

为了描述非信号区的散斑噪声程度,引入峰值背景比(PBR)作为评价函数,即

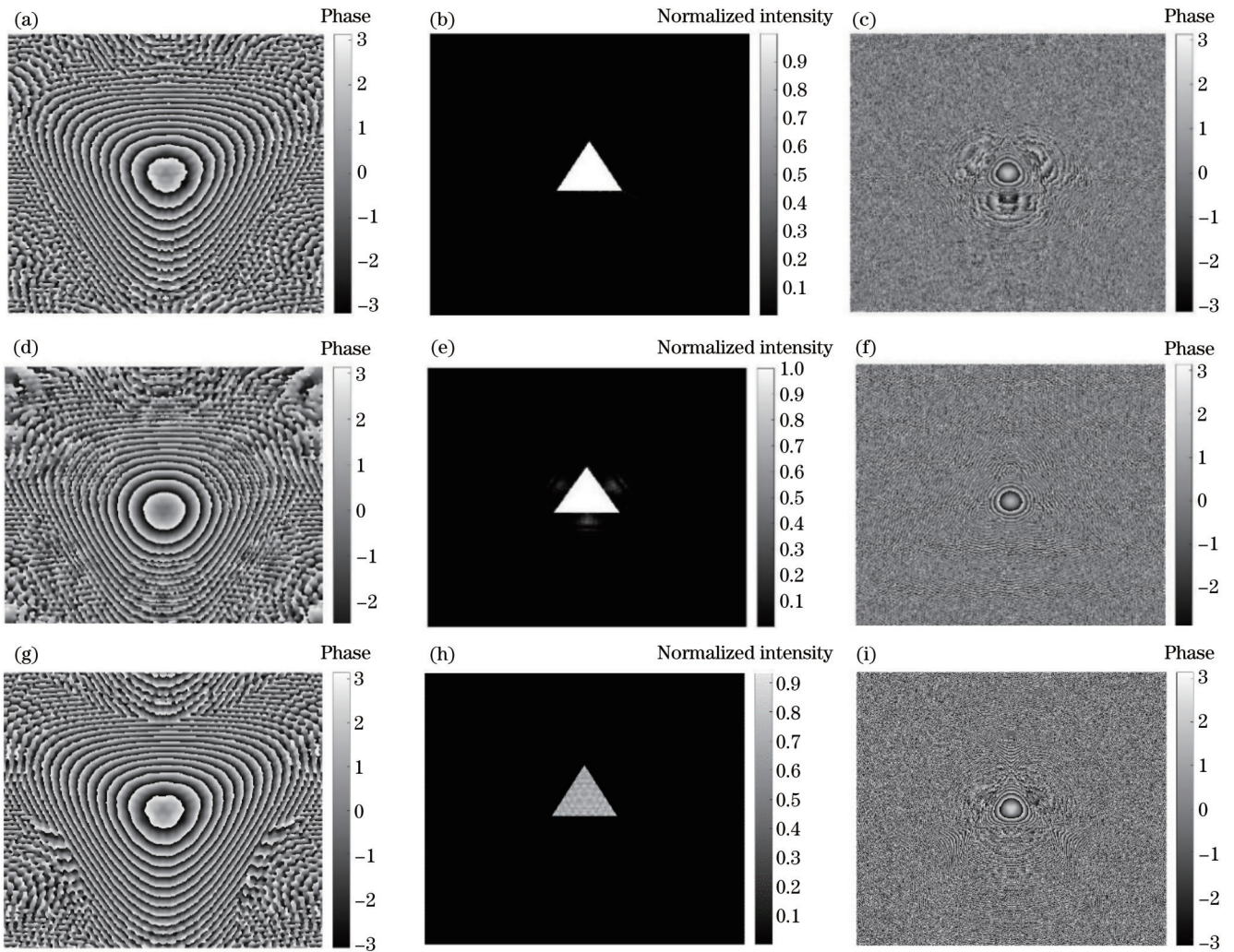


图 10 三角形平顶光束的仿真结果。(a)改进算法的相位图;(b)改进算法的输出面光强分布图;(c)改进算法的输出面相位分布图;(d)MRAF算法的相位图;(e)MRAF算法的输出面光强分布图;(f)MRAF算法的输出面相位分布图;(g)GS算法的相位图;(h)GS算法的输出面光强分布图;(i)GS算法的输出面相位分布图

Fig. 10 Simulation results of the triangular flat-top beam. (a) Phase obtained by the improved method; (b) intensity distribution of the output surface obtained by the improved method; (c) phase of the output surface obtained by the improved method; (d) phase obtained by the MRAF algorithm; (e) intensity distribution of the output surface obtained by the MRAF algorithm; (f) phase of output surface obtained by the MRAF algorithm; (g) phase obtained by the GS algorithm; (h) intensity distribution of the output surface obtained by the GS algorithm; (i) phase of the output surface obtained by the GS algorithm

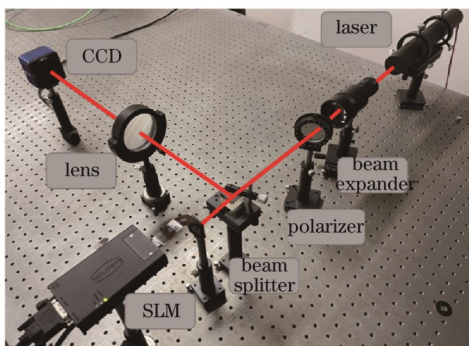


图 11 实验光路

Fig. 11 Experimental optical path

$$R_{\text{PBR}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{BG}}}{I_{\text{BG}}}, \quad (12)$$

式中： I_{max} 为信号区光强峰值，从图 13(a)和图 13(b)选取同一中心位置构建全等的三角形区域即白色三角形区域作为信号区域； I_{BG} 为非信号区(背景区域)光强峰值，通过对得到的实验结果图 13(a)和图 13(b)进行计算，可以得到MRAF算法的 $R_{\text{PBR}} = 0.0079$ ，改进算法的 $R_{\text{PBR}} = 2.0357$ 。可以看出，改进算法在保证光斑内部同等均匀度的情况下对非信号区域的噪声有着较为明显的抑制效果。

对比图 13(c)和图 13(d)可以更为清晰地看出：基础的MRAF算法在非信号区域产生了一定规律的散斑噪声且形态和分布都与仿真模拟的结果相吻合；改进算法有效地抑制了非信号区域的散斑；两种算法都在非信号区域产生了一定的散斑噪声，这是因为两种

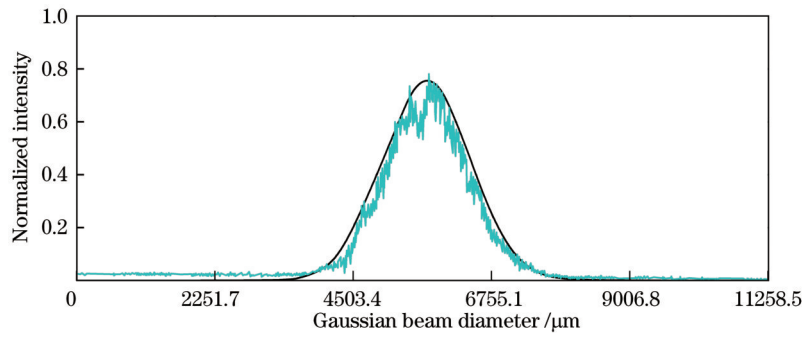


图 12 测得的高斯光束强度分布

Fig. 12 Measured intensity distribution of the Gaussian beam

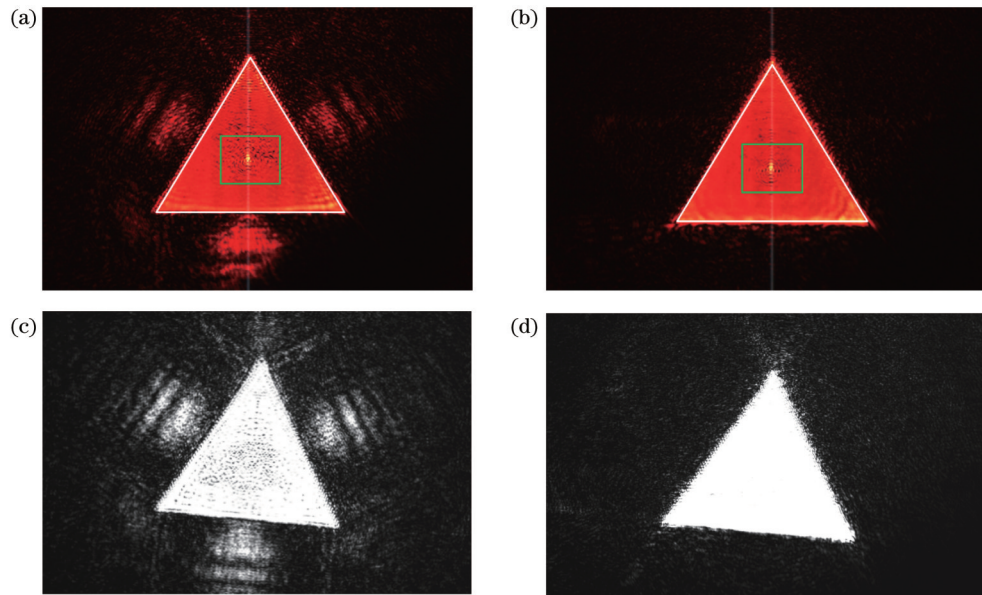


图 13 光学实验结果。(a) CCD 相机中 MRAF 算法的结果; (b) CCD 相机中改进算法的结果; (c) 光束质量分析器中 MRAF 算法的结果; (d) 光束质量分析器中改进算法的结果

Fig. 13 Results of the optical experiment. (a) Result of the MRAF algorithm in CCD; (b) result of the improved algorithm in CCD; (c) result of the MRAF algorithm in beam quality analyzer; (d) result of the improved algorithm in beam quality analyzer

算法都取消了对非信号区振幅的限制。对比图 13 (a)、(c)与图 13(b)、(d)可以看出:虽然证明了改进算法的有效性,但由于入射高斯光束并非理想光束并且 SLM 器件的填充因子有限,无法对入射的高斯光束实现完美的调制;此外整个光路中也存在一定的误差影响,这使得改进算法处理的图中存在一定的轻微散斑,但获得的效果仍然优于基础的 MRAF 算法。通过对比图 13(c)和图 13(d)可以看出,在亮度方面,改进算法相比 MRAF 算法有些许提升(理论模拟差值为 10.29%)。

5 结 论

在 MRAF 算法的基础上,引入球面相位作为初始相位,利用相位权重系数 Z 对初始相位进行一次优化,在迭代模式中使用了动态振幅限制,通过全区域振幅限制对相位进行二次优化,最后通过 MRAF 结合爬山

邻域算法得到最终的 DOE 相位分布形式。改进算法获得的三角形平顶光束在仿真模拟和实验中的效果均优于基础的 MRAF 算法。仿真结果中:GS 算法虽然衍射效率始终保持一个极高的水平,但误差却并没有下降的趋势,最终通过 1500 次迭代,均方根误差仍然保持在 32.78%,无法满足终止迭代的条件;改进算法获得的衍射效率为 97.77%,均方根误差为 0.09%,并且对非信号区的散斑效应有一定的抑制效果。实验结果中:构建同样的三角形光斑,MRAF 算法会在非信号区域产生一定规律的散斑噪声;改进算法获得的三角形光斑表现出了较好的对非信号区域散斑的抑制效果。在满足均匀性条件 $E_{\text{RMSE}} \leq 0.1\%$ 的同时,改进算法的 PBR 为 2.0357,基础的 MRAF 算法的 PBR 为 0.0079,在效率方面,改进算法获得的理论衍射效率为 97.77%,高于基础的 MRAF 算法的 87.48%。相比文献[18]构建的矩形光斑,其衍射效率仅为 45%,远低于

于改进算法的 97.77%，但二者的光斑内部均匀度基本一致。此外，改进算法在图形与初始相位的匹配难度上也有所提升。

参 考 文 献

- [1] Zhao T Z, Yu J, Li C Y, et al. Beam shaping and compensation for high-gain Nd: glass amplification[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(2): 109-115.
- [2] Wang D, Zhang J, Wang H, et al. Variable shape or variable diameter flat-top beam tailored by using an adaptive weight FFT-based iterative algorithm and a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 5044-5050.
- [3] Chen C Y, Deng Q L, Wu P J, et al. Speckle reduction by combination of digital filter and optical suppression in a modified Gerchberg-Saxton algorithm computer-generated hologram[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): G163-G168.
- [4] Hu X Y, Zhao Q, Yu P P, et al. Dynamic shaping of orbital-angular-momentum beams for information encoding[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1796-1808.
- [5] Shao T, Tang F, Sun L X, et al. Fabrication of antireflective nanostructures on a transmission grating surface using a one-step self-masking method[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(2): 180.
- [6] Li W F, Qi F, Wang Y L, et al. Refractive aspherical lens for terahertz imaging[J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 14-17.
- [7] Hu X X, Wang X L, Liu S L, et al. Research on long-distance, wide field-of-view and large depth-of-field terahertz imaging based on aspheric lens[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107381.
- [8] Khatri N, Berwal S, Manjunath K, et al. Research on development of aspheric diffractive optical element for mid-infrared imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 129: 104582.
- [9] Hu Z Y, Jiang T, Tian Z N, et al. Broad-bandwidth micro-diffractive optical elements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(3): 2100537.
- [10] Le Z C, Liu Z S, Qiu Y J, et al. Fabrication of ultrathin flexible diffractive optical elements (DOEs) and application for laser speckle suppression[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 159: 107223.
- [11] Doskolovich L L, Mingazov A A, Bykov E V, et al. Hybrid design of diffractive optical elements for optical beam shaping[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31875-31890.
- [12] 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.
- [13] 刘文静, 庞辉, 曹阿秀, 等. 低散斑环形光束整形器件的设计及实验[J]. *光子学报*, 2020, 49(2): 0222001.
- [14] Liu W J, Pang H, Cao A X, et al. Design and experiments of annular beam shaping device with low speckle noise[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0222001.
- [15] 修龙汪, 李文青, 杨鹏, 等. 基于双曲初始相位的 GS 改进算法[J]. *光子学报*, 2022, 51(4): 0405001.
- [16] Xiu L W, Li W Q, Yang P, et al. Improved GS algorithm based on hyperbolic initial phase[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(4): 0405001.
- [17] 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.
- [18] Tian S Z, Chen L Z, Zhang H. Optimized Fresnel phase hologram for ringing artifacts removal in lensless holographic projection[J]. *Applied Optics*, 2021, 61(5): B17-B24.
- [19] 张玉莹, 赵帅, 郑昕. 基于改进 GS 算法设计 DOE 制备紫外波段微米级均匀光斑[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0714004.
- [20] Zhang Y Y, Zhao S, Zheng X. Design of DOE based on modified GS algorithm for preparation of micron-scale uniform light spot in ultraviolet band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0714004.
- [21] Pasienski M, Demarco B. A high-accuracy algorithm for designing arbitrary holographic atom traps[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2176-2190.
- [22] Alsaka D Y, Arpali Ç, Arpali S A. A comparison of iterative Fourier transform algorithms for image quality estimation[J]. *Optical Review*, 2018, 25(5): 625-637.
- [23] Gaunt A L, Hadzibabic Z. Robust digital holography for ultracold atom trapping[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 721.
- [24] Su P, Cai C, Song Y M, et al. A hybrid diffractive optical element design algorithm combining particle swarm optimization and a simulated annealing algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16): 5485.
- [25] Ryu D, Jo Y, Yoo J, et al. Deep learning-based optical field screening for robust optical diffraction tomography[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 15239.
- [26] 邵加强, 苏宙平. 基于机器学习设计连续相位分布的衍射光学元件[J]. *光学学报*, 2023, 43(3): 0323001.
- [27] Shao J Q, Su Z P. Design of diffractive optical elements with continuous phase distribution based on machine learning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(3): 0323001.
- [28] Stilgoe A B, Kashchuk A V, Preece D, et al. An interpretation and guide to single-pass beam shaping methods using SLMs and DMDs[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 065609.
- [29] 温欢, 孟增明. 基于全息成像技术构建任意的二维光晶格阵列[J]. *量子光学学报*, 2020, 26(1): 27-32.
- [30] Wen H, Meng Z M. Generation of arbitrary two dimension arrays of optical lattices based on holographic imaging technology[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2020, 26(1): 27-32.
- [31] Catalá -Castro F, Martín-Badosa E. Positioning accuracy in holographic optical traps[J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 559.

Optimization Algorithm for Diffractive Optical Elements Based on Dynamic Amplitude Restriction

Wang Bowei¹, Xiu Longwang², Xiang Tao¹, Li Gang¹, Zhang Hang^{1*}

¹*Institute of Intelligent Optoelectronic Technology, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

²*Key Laboratory of Laser and Infrared System Integration Technology, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China*

Abstract

Objective Due to their exceptional properties, such as high coherence, brightness, monochromaticity, and directivity, lasers find extensive use in various fields, including material processing, communication, medical treatment, and semiconductor heat treatment. However, the typical output of a laser cavity emits a Gaussian distributed beam, which is mostly unsuitable for practical use. Therefore, it is necessary to shape the output Gaussian beam to fulfill specific requirements regarding shape and energy distribution. Herein, a novel algorithm is proposed, building upon the mixed-region amplitude freedom (MRAF) algorithm. The objective is to achieve a highly uniform and efficiently diffracted spot. Unlike the static mode of amplitude limitation seen in traditional Gerchberg-Saxton(GS) and MRAF algorithms, the proposed algorithm employs a dynamic amplitude limitation mode. This dynamic mode effectively preserves the initial phase matching with the target spot while effectively utilizing the dead zone of the diffractive optical element (DOE) edge. As a result, a high diffraction efficiency and high uniformity spots are obtained, and the speckle noise in the non-signal area is well suppressed.

Methods The traditional GS algorithm has proven effective in obtaining satisfactory results for circular/annular and rectangular flat-top beams. However, when applied to the triangular light spot proposed in this paper, it does not yield ideal outcomes. The reason behind this discrepancy is that the triangular light spot and spherical initial phase do not align perfectly, resulting in residual dead zones at the edge of the DOE. Consequently, remarkable errors are observed. On the other hand, using only the MRAF algorithm would severely damage the alignment between the initial phase and the target light spot, resulting in low efficiency. To overcome these limitations, this paper introduces a dynamic amplitude limiting mode that enables iterative optimization of the target light spot. To initiate the optimization process, the phase coefficient Z is optimized through amplitude limiting across the entire region. This optimization helps determine an optimal initial Z value within a certain range, thereby obtaining an optimal initial phase form (Fig. 4). Subsequently, segmented iterative optimization is performed using the hill-climbing neighborhood algorithm (Fig. 7). The traditional GS algorithm, the MRAF algorithm, and the improved algorithm proposed in this paper are compared to analyze the difference in effects.

Results and Discussions After conducting simulations to compare the effects of the traditional GS algorithm, the MRAF algorithm, and the improved algorithm proposed in this paper, it was found that the traditional GS algorithm failed to meet the constraint condition with an error level of 32.78%, far from the desired constraint of $RMSE \leq 0.1\%$. Both the MRAF algorithm and the improved algorithm displayed a light spot error of 0.09%. At this time, the uniformity inside the triangular light spot constructed by the two was consistent. However, the diffraction efficiency of the improved algorithm proposed in this paper is 97.77%, which is higher than the diffraction efficiency of the MRAF algorithm (87.48%). Moreover, the peak background ratio (PBR) of the improved algorithm is 2.0357, a value larger than that of the MRAF algorithm (0.0079). As shown in Fig. 13, the improved algorithm exhibits a strong suppression effect on speckles in non-signal areas, demonstrating that the improved algorithm incorporates desirable aspects from both the GS and MRAF algorithms to a certain extent.

Conclusions By using the improved MRAF algorithm to shape the triangular light spot and obtain the DOE phase distribution, the paper demonstrated its effectiveness through simulation and experimental analysis. The light spot obtained by the improved algorithm exhibited enhanced diffraction efficiency and better control of speckles in non-signal areas compared with the MRAF algorithm, while ensuring low errors. The experimental results confirmed the validity of the improved algorithm, aligning well with the simulation results. This substantiated the reliability of the simulation analysis methods used in this paper. In subsequent research work, this paper aims to improve the convergence speed of the algorithm and explore the incorporation of other methods to further enhance the final results. The method proposed in this paper provides a reference for designing DOE for complex flat-top beams with high diffraction efficiency and low error.

Key words diffractive optical element; beam shaping; iterative algorithm; diffractive optical element design; micro-nano optics