

基于变形镜激光束整形系统中的相位拟合优化方法

何杰铃^{1,2} 魏凌¹ 杨金生¹ 李喜琪¹ 何益¹ 张雨东¹

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于变形镜的激光束整形系统,具有控制灵活、适应性好、破坏阈值高等优点。为了提升变形镜作为相位调制元件的激光束整形系统性能,提出一种以最小二乘法拟合的驱动器控制电压为初始值的随机并行梯度下降算法优化驱动器控制电压的方法。通过驱动器正六边形排列的37单元变形镜对不同大小的方形与圆形平顶激光束进行整形。数值仿真结果表明,在最小二乘法的基础上引入优化算法后,远场光强的目标区域均匀性及与理论光强的相似度均获得了改善,激光束整形系统性能得到提升。

关键词 自适应光学; 光学设计; 激光束整形; 相位拟合; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.020101

Phase Fitting Optimization Method to Laser Beam Shaping System Based on Deformable Mirror

He Jieling^{1,2} Wei Ling¹ Yang Jinsheng¹ Li Xiqi¹ He Yi¹ Zhang Yudong¹

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

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

Abstract Laser beam shaping system based on deformable mirror has the advantages of control flexibility, good adaptability and high damage threshold. In order to enhance performance of the laser beam shaping system with a deformable mirror as the phase modulation element, a stochastic parallel gradient descent algorithm is proposed to further optimize control voltage, which takes the least square fitting control voltage as the initial value. Laser beam can be transformed to square and circular flat topped beam with different sizes by a 37 element deformable mirror. Numerical simulation results show that, for the far field intensity, both the uniformity of target area and the similarity to the theoretical intensity are improved, after the introduction of optimization algorithm, on the basis of the least square method. So the performance of the laser beam shaping system is also improved.

Key words optical designs; adaptive optics; laser beam shaping; phase fitting; stochastic parallel gradient descent algorithm

OCIS codes 010.1080; 140.3340; 350.5030

1 引言

激光器由于在方向性、亮度、单色性及相干性等方面具有良好的特性,被广泛应用于工业、军事、通信、医学和科学研究等诸多领域^[1]。通常情况下,激光束在空间强度上呈高斯分布。随着激光技术应用领域的扩大,高斯光束已不能满足实际应用中的一些特定需求。例如,激光惯性约束聚变中^[2],需要激光束均匀辐

收稿日期: 2015-06-10; 收到修改稿日期: 2015-07-01; 网络出版日期: 2016-01-16

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-L03-5)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120080)、科技部十二五支撑计划(2012BAI08B04)

作者简介: 何杰铃(1985—),男,博士研究生,主要从事自适应激光束整形技术方面的研究。E-mail: hjl@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张雨东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学方面的研究。

E-mail: ydzhang@ioe.ac.cn(通信联系人)

照靶球表面,以抑制瑞利-泰勒流体力学不稳定性,使靶球均匀压缩,提高激光能量转变成压缩能的效率;光学信息存储与处理中^[3],需要采用矩形光束以提高存储质量与存储空间利用率;同位素分离中^[4],需要使用特定形状的激光束以提高反应堆的工作效率及能量利用率。因此,为了扩展激光技术的应用领域,提高激光系统的效率,需要使用激光束整形技术将高斯光束转换为特定形状与能量分布的激光束。

激光束整形技术一般通过调制近场相位,从而改变焦面光强形态分布。根据相位调制元件的特性,现有激光束整形技术一般可分为基于静态光学元件的激光束整形技术与基于自适应光学的激光束整形技术。基于静态光学元件的激光束整形方法有光阑拦截^[5]、非球面透镜组^[6]、微透镜阵列^[6-8]、全息滤波器^[9-10]、衍射光学元件^[11-13]、振幅调制光栅^[14-15]等。通常情况下,由于一个相位调制元件只能整形一种形态分布的远场光强,因此基于静态光学元件的激光束整形技术适应性较差、成本较高。

基于自适应光学的激光束整形技术,变形镜作为一种常用的核心元件,其镜面面形可随时调整,从而灵活调制近场相位。因此,基于变形镜的激光束整形技术,具有控制灵活、整形面形多样化、适应性好、传输效率高、破坏阈值高等优点^[16]。Nemoto等^[17]结合稳相法(SPM)与光学几何坐标变换方法获取近场调制相位面形,并通过9驱动器变形镜拟合该面形,成功地将高斯光束转换为方形激光束。曾志革等^[18-19]结合光学几何变换法及能量守恒定律,获取激光束整形中所需的近场调制相位面形,并使用夏克-哈特曼传感器测量系统象差,通过37单元变形镜拟合面形,成功地将高斯光束转换为方形平顶激光束。Feng等^[20]结合能量守恒定律与稳相法,获得标准Monge-Ampere等式,对该等式求数值解获得近场调制相位面形,再通过双变形镜拟合面形,仿真实现高斯光束转换为方形平顶激光束。

变形镜受限于自身的拟合能力,不能完美拟合理论面形。所以,基于变形镜的激光束整形技术,通常使用最小二乘法拟合近场调制相位面形。最小二乘法拟合相位面形目标是使最小拟合误差,而激光束整形技术最终目的是获得与目标理论光强相似度高远的场光强。拟合误差最小时,激光束整形系统远场光强形态分布并不一定最优。为了提升以变形镜为相位调制元件的激光束整形系统性能,提出了一种改进的相位拟合方法。该方法在最小二乘法的基础上,引入优化算法优化驱动器控制电压,优化远场光强,提升激光束整形系统性能。

2 理论基础

通常情况下,激光束整形技术由远场目标光强反演计算近场调制相位,再通过变形镜等光学元件实现调制相位面形,达到激光束整形的目的。通过变形镜拟合面形时求取驱动器控制电压的过程可能存在局部极值,同时在激光束整形技术中,求解驱动器控制电压应以提升激光束整形系统性能为目标。故在最小二乘法的基础上引入优化算法进一步优化驱动器控制电压以提升系统性能。

2.1 激光束整形技术原理

激光束整形技术原理如图1所示, phase表示相位调制,L表示理想透镜,P表示远场焦面。复振幅为 $U_{\text{near}}(x,y)$ 的入射激光束经 phase 相位调制和 L 透镜聚焦,于 P 处获得远场激光束复振幅

$$U_{\text{far}}(u,v) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i\frac{k}{2f}(u^2 + v^2)\right] \times \iint U_{\text{near}}(x,y) \exp[i\varphi(x,y)] \exp\left[-i\frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy, \quad (1)$$

式中 (u,v) 表示远场坐标, (x,y) 表示近场坐标, λ 表示波长, f 表示透镜焦距, $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数, $\varphi(x,y)$ 表示 phase 处引入的调制相位。

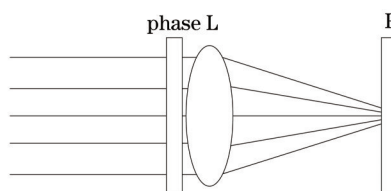


图1 激光束整形技术原理

Fig.1 Principle of laser beam shaping technology

此时远场焦面的光强分布 $I(u, v)$ 为

$$I(u, v) = |U_{\text{far}}(u, v)|^2. \quad (2)$$

结合(1)式和(2)式可知,对已确定的光学系统,若要在远场焦面获取特定形状与能量分布的光强,需要通过改变 $\varphi(x, y)$ 实现。已知远场目标光强,求取近场调制相位的常用方法有 Gerchberg-Saxton 算法^[21]、Yang-Gu 算法^[22]、几何光学坐标变换法^[18-19]、稳相法^[17, 20, 23]等。

2.2 变形镜相位调制原理

作为基于变形镜的激光束整形系统相位调制元件,变形镜通过控制驱动器电压,使驱动器产生不同大小的力,改变反射镜面面形,从而达到调制相位的目的。驱动器影响函数表示仅有一个驱动器作用时的镜面局部变形。驱动器影响函数模型主要有高斯函数模型^[24]及修正后的高斯函数模型^[25]。修正后的高斯函数模型能够更好地描述实际的变形镜面形,但是参数确定较复杂。而高斯函数模型虽然在精度上不如修正后的高斯函数模型,但参数确定较简单,也能描绘出变形镜的大部分面形特性。为了便于后续工作展开及实验分析,采用高斯函数模型。因此,通常情况下,单个驱动器影响函数为

$$f_i(x, y) = \exp\left[\ln w \left(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} / d\right)^\alpha\right], \quad (3)$$

式中 (x_i, y_i) 表示第 i 个驱动器的位置, d 为驱动器间距, α 为高斯指数, w 为驱动器交连值,定义为一个驱动器工作时,相邻驱动器中心的变形量与工作驱动器中心的最大变形量的比值。所有驱动器影响函数的叠加构成变形镜复杂的面形^[24],

$$S(x, y) = \sum_{j=1}^N c_j f_j(x, y), \quad (4)$$

式中 c_j 表示第 j 个驱动器控制电压, N 表示变形镜驱动器数目。

调制相位已知的情况下,需要变形镜拟合相位面形以实现激光束整形。相位与面形的关系^[19]为

$$S(x, y) = \varphi(x, y) / 2k. \quad (5)$$

结合(4)式与(5)式,在已知需要变形镜实现的面形及驱动器影响函数的情况下,通过最小二乘法拟合可求出驱动器的控制电压。

2.3 技术方案

由(1)~(5)式可知,通常情况下,远场光强与驱动器控制电压不是二次型关系,故最小二乘法求解驱动器控制电压可能存在多个局部极值。同时在激光束整形系统中,求解驱动器控制电压应以实现最优远场光强形态为目的。所以,在最小二乘法的基础上引入优化算法进一步优化控制电压,改善激光束整形系统性能。常用优化方法^[26]有最速下降法、共轭方向法、Levenberg-Marquard 法等。随机并行梯度下降算法(SPGD)^[27]不需要计算梯度,所有维参量并行控制,因而具有实现简单、收敛速度快等特点。在选取适当初始值及参数的情况下,也可保证收敛准确性。由于最小二乘法求取的驱动器控制电压在最优值附近,以此作为初始值,能更好地保证 SPGD 算法的收敛速度及准确性。

SPGD 算法的基本原理^[27]是利用性能指标测量值的变化量 ΔJ 与扰动量 Δc 进行控制参数的梯度估计,以迭代方式在梯度下降方向进行搜索,第 k 次迭代时,控制向量为 $c^{(k)} = \{c_1, c_2, \dots, c_{37}\}$, 则

$$c^{(k+1)} = c^{(k)} + \gamma \Delta c^{(k)} \Delta J^{(k)}, \quad (6)$$

式中 $\Delta c^{(k)} = \{\Delta c_1, \Delta c_2, \dots, \Delta c_{37}\}$ 为第 k 次迭代施加的扰动向量,各 Δc_i 相互独立且同为均匀分布,即 $|\Delta c_i| = \delta$ $P(\Delta c_i = \pm\delta) = 0.5$; γ 为增益系数:取正,性能指标向极大方向优化,取负,性能指标向极小方向优化;即

$$\Delta J^{(k)} = J^{(k)} - J^{(k-1)}. \quad (7)$$

3 基于变形镜的激光束整形仿真实验

基于变形镜的激光束整形系统原理如图 2 所示。其中, L1 为准直透镜, L2 与 L3 组成缩扩束透镜系统, DM 为变形镜, P1 表示反射镜, L4 为远场透镜, FP 为焦平面。

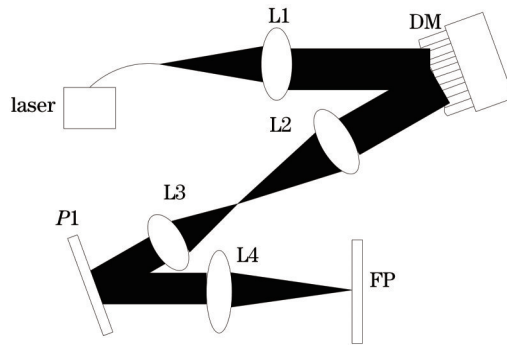


图2 基于变形镜的激光束整形系统原理图

Fig.2 Principle of laser beam shaping system based on deformable mirror

利用 Matlab 软件进行仿真实验,实验中使用的系统参数如表 1 所示。

表1 光学系统参数表

Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength λ / μm	650
Collimating lens aperture /mm	30
Gaussian beam w_0 /mm	1
Focal length f /mm	200
Incident aperture D /mm	6
Coupling coefficient w	0.12
Gaussian exponent α	2
Number of actuator N	37
DM aperture /mm	30
Magnification ratio	5:1

变形镜选择驱动器正六边形排列的 37 单元变形镜,驱动器布局如图 3 所示,粗线圆区域表示变形镜有效区域。根据表 1 中变形镜相关参数及(3)式生成驱动器影响函数,其中心驱动器影响函数如图 4 所示。

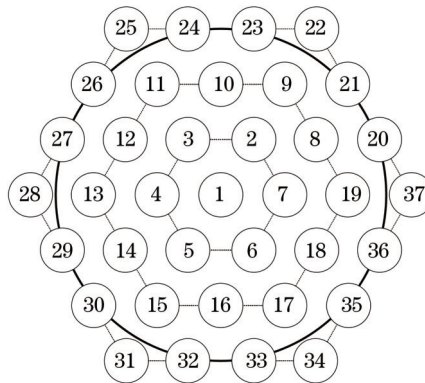


图3 37单元变形镜驱动器布局图

Fig.3 Actuators arrangement of DM37

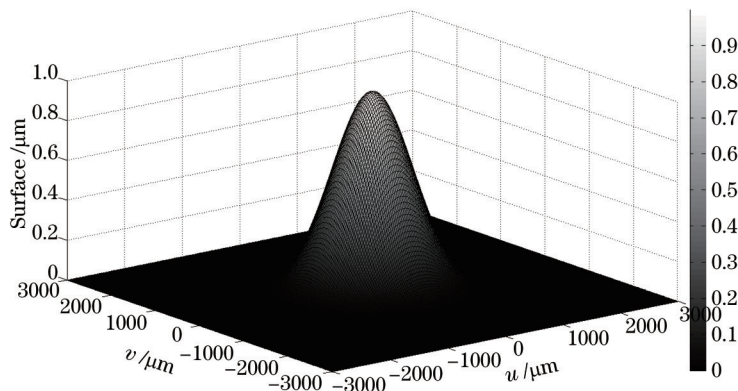


图4 37单元变形镜中心驱动器影响函数

Fig.4 Influence function of center actuator of DM37

3.1 激光束整形技术评价指标

为了对数值仿真结果进行深入分析比较,引入3个激光束整形技术性能评价指标^[19-20]:能量利用率、相关系数、光强偏离标准差。

能量利用率 η , 定义为目标区域内光强能量与输入总能量的比值, 衡量激光束整形技术的光能集中度。最小值为零, 表示目标区域没有任何光强入射; 最大值为1, 表示输入光强能量完全集中在目标区域。能量利用率在实际应用中有重要意义, 但在激光束整形系统中不能很好地衡量系统整形性能。

$$\eta = \frac{\iint_{\Sigma} I(u,v) du dv}{\iint_S I(u,v) du dv} \times 100\% \quad (8)$$

式中 Σ 与 S 分别表示目标光斑区域与整个远场区域。

相关系数 C , 定义为远场光强分布与理论光强的相关系数, 衡量远场光强形态分布与理论光强的线性相似程度。最小值为零, 表示远场光强与理论光强完全不线性相关; 最大值为1, 当且仅当远场光强与理论光强完全线性相关时取得。激光束整形系统的目标是让 C 尽可能趋于1。

$$C = \frac{E[(I - \bar{I})(I_{\text{theory}} - \bar{I}_{\text{theory}})]}{\sqrt{E[(I - \bar{I})^2]E[(I_{\text{theory}} - \bar{I}_{\text{theory}})^2]}} \quad (9)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示期望, I 与 \bar{I} 分别表示远场光强分布及其期望, I_{theory} 与 \bar{I}_{theory} 分别表示稳相法计算的理论光强分布及其期望。

光强偏离标准差 σ , 定义为远场光强偏离理论光强差值的标准差, 衡量远场光强与理论光强的相似度, 目标光强分布呈平顶时, 也可衡量目标区域均匀性。最小值为零, 当且仅当 $I = I_{\text{theory}} + c$ 时取得, c 为常数。激光束整形系统的目标是让 σ 尽可能趋于零,

$$\sigma = \sqrt{E\left\{\left[(I_{\text{theory}} - I) - E(I_{\text{theory}} - I)\right]^2\right\}} \quad (10)$$

3.2 激光束整形数值仿真

目标光强选取不同大小的方形与圆形平顶光束, 通过稳相法计算理论相位及对应的远场理论光强。分别采用最小二乘法与 SPGD 算法求取 37 单元变形镜驱动器控制电压, 拟合近场调制相位面形, 实现激光束整形。其中, 最小二乘法拟合相位以稳相法计算的理论相位为目标; SPGD 算法评价函数选择(9)式定义的相关系数; 扰动量为最小二乘法获取的驱动器控制电压最大值与最小值差值的 0.4%; 增益因子主要影响算法的收敛速度, 通过多次测试, 当增益因子取 20 时, 拥有较好的收敛速度。

当目标光强空间分布呈方形, 通过稳相法获取近场调制相位:

$$\varphi(x,y) = \beta \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{2} [x \operatorname{erf}(x) + y \operatorname{erf}(y)] + \frac{\exp(-x^2) + \exp(-y^2)}{2} - 1 \right\} \quad (11)$$

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s \exp(-t^2) dt \quad (12)$$

$$\beta = \frac{4\sqrt{\pi} w_0 L}{\lambda f} \quad (13)$$

式中 L 表示方形目标光强边长的一半。

根据(5)式和(11)式可计算出方形目标光强对应的近场调制相位面形。方形目标光强 L 分别取 100 μm 和 200 μm , 数值仿真结果如图 5 所示, 图 5(a) 表示 $L=100 \mu\text{m}$ 的仿真结果, 图 5(b) 表示 $L=200 \mu\text{m}$ 的仿真结果, 从左到右依次表示理论光强、最小二乘法拟合对应光强及 SPGD 优化后光强。

当目标光强空间分布呈圆形, 通过 SPM 法得到近场调制相位:

$$\varphi(r) = \frac{\beta\sqrt{\pi}}{2} \int_0^r \sqrt{1 - \exp(-t^2)} dt \quad (14)$$

$$\beta = \frac{4\sqrt{\pi} w_0 R}{\lambda f}, \quad (15)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, R 表示圆形目标光强半径。

根据(5)式和(14)式可计算出圆形目标光强对应的近场调制相位面形。圆形目标光强半径 R 分别取 $100 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$, 数值仿真结果如图 6 所示, 图 6(a) 表示 $R=100 \mu\text{m}$ 的仿真结果, 图 6(b) 表示 $R=200 \mu\text{m}$ 的仿真结果, 从左到右依次表示理论光强、最小二乘法对应光强及 SPGD 优化后光强。

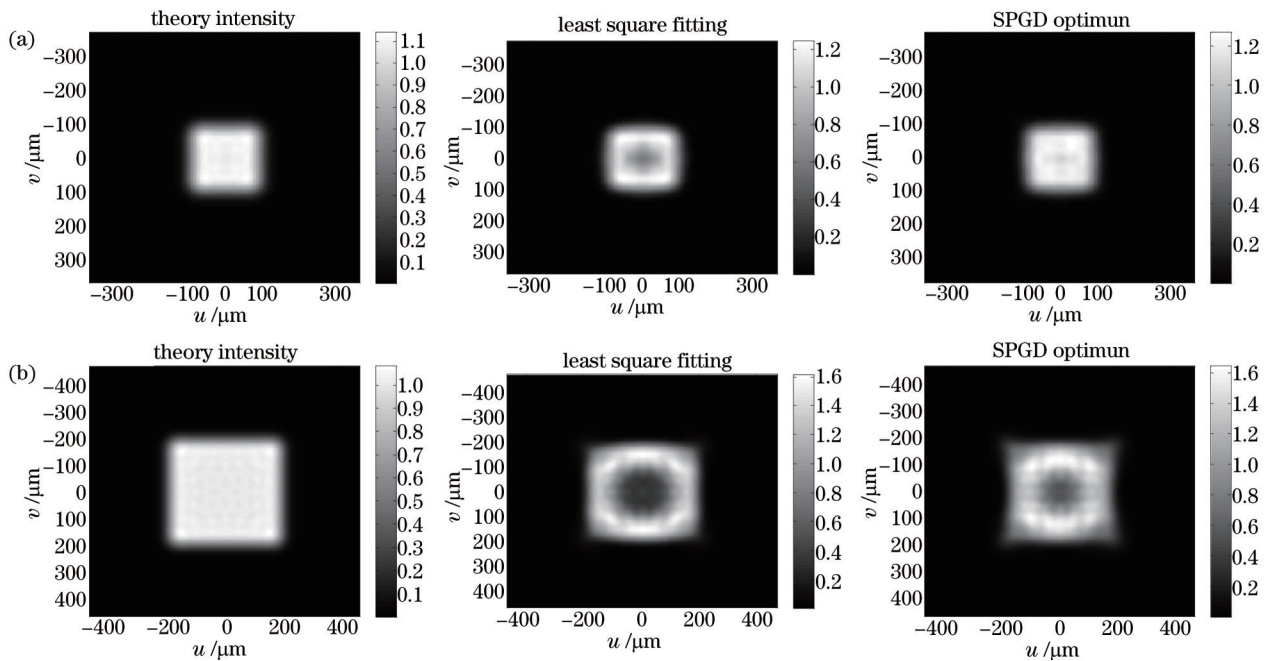


图 5 方形目标光强数值仿真结果

Fig.5 Numerical simulation of square beam

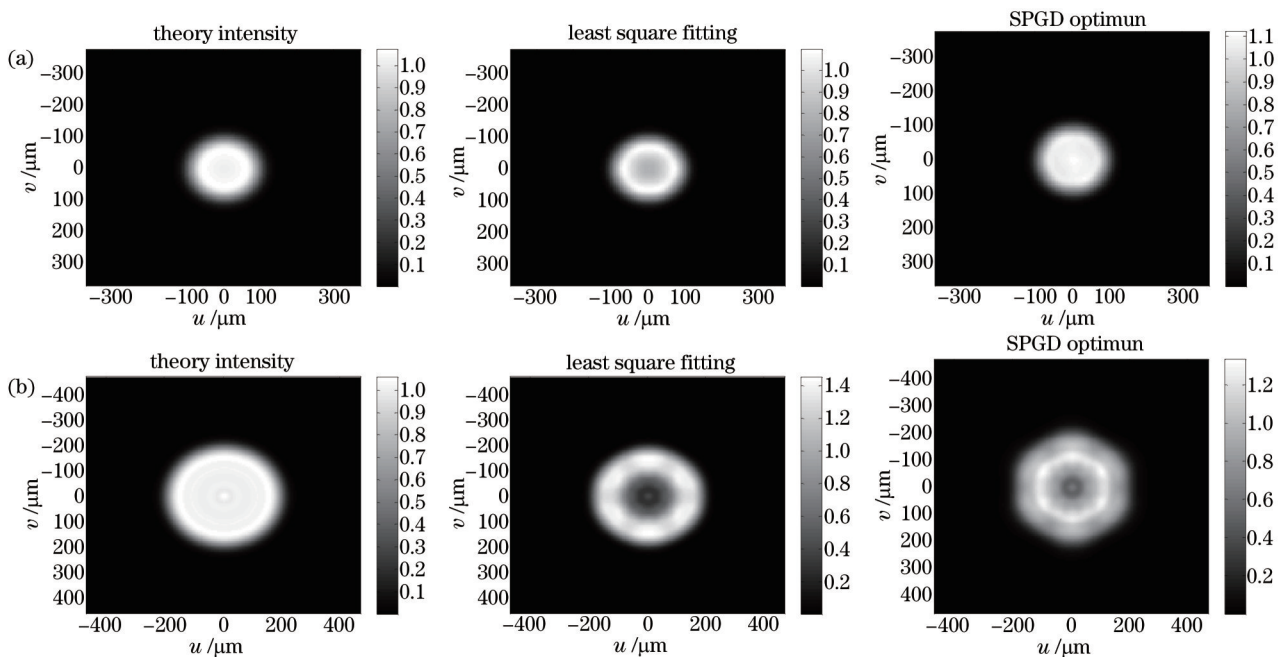


图 6 圆形目标光强数值仿真结果

Fig.6 Numerical simulation of circular beam

3.3 数值仿真结果分析

通过驱动器正六边形排列的 37 单元变形镜, 采用最小二乘法与 SPGD 优化算法拟合 $L=100, 200 \mu\text{m}$ 的

方形光强与 $R=100, 200 \mu\text{m}$ 的圆形光强分别对应的近场调制相位。拟合后残余面形的峰谷值(PV)与均方根误差(RMS)对比结果,及SPGD算法拟合近场调制相位的迭代次数如表2所示。

表2 拟合后残余面形

Table 2 Residual of fitting surface

	$L=100 \mu\text{m}$	$L=200 \mu\text{m}$	$R=100 \mu\text{m}$	$R=200 \mu\text{m}$
PV (fitting) / μm	0.1082	0.2206	0.0819	0.1688
PV (SPGD) / μm	0.1066	0.2213	0.0862	0.1723
RMS (fitting) / μm	0.0123	0.0259	0.0104	0.0212
RMS (SPGD) / μm	0.0125	0.0281	0.0105	0.0254
Number of iteration	1542	2769	1968	1689

从表2可知,两种方法拟合后残余面形的PV值互有高低。但是,SPGD优化算法的拟合残余面形的RMS值都大于最小二乘拟合方法的结果。说明优化后的拟合面形并未获得最小的拟合误差。而此时的远场光强整形结果,如表3所示。

表3 激光束整形系统性能指标

Table 3 Capabilities of laser beam shaping system

	$L=100 \mu\text{m}$	$L=200 \mu\text{m}$	$R=100 \mu\text{m}$	$R=200 \mu\text{m}$
C (fitting)	0.8362	0.5360	0.9680	0.8417
C (SPGD)	0.9912	0.7639	0.9983	0.9261
η (fitting)	89.21%	94.54%	86.99%	95.67%
η (SPGD)	91.64%	95.65%	88.6%	90.31%
σ (Fitting)	0.1431	0.3366	0.0883	0.2651
σ (SPGD)	0.0735	0.2995	0.0254	0.1392

由表3可知,在远场光强评价指标中,当圆形目标光强 $R=200 \mu\text{m}$ 时,最小二乘法获取的远场光强能量利用率高于SPGD算法的能量利用率,这是因为采用最小二乘法通过变形镜拟合相位后,对应远场光强空间分布减小,使得能量更加集中,但这是以降低与理论光强的相似度为代价的,并不符合激光束整形系统的性能需求。针对4组目标光强,对比最小二乘法与SPGD算法仿真结果,可知相关系数与光强偏离标准差都得到了改善。表2与表3说明以相关系数与光强偏离标准差作为激光束整形系统性能评价指标,当通过37单元变形镜采用最小二乘法获取最小拟合相位误差,激光束整形系统的性能并未达到最优。而采用SPGD优化算法后,虽然拟合相位误差变大,但是激光束整形系统的性能得到了提升。验证了最小拟合误差时的面形对应的远场光强不是最优的,在采用优化算法优化驱动器控制电压后,提升了激光束整形系统的性能。

4 结 论

为了提升变形镜为相位调制元件的激光束整形系统性能,在最小二乘法计算控制电压的基础上,引入SPGD算法进一步优化控制电压。对不同大小的方形与圆形目标光强,通过驱动器正六边形排列的37单元变形镜实现激光束整形。数值仿真结果表明,驱动器控制电压优化之后,远场光强与理论光强的相似性、目标区域均匀性均获得了改善,激光束整形系统的性能得到了提升。同时验证了最小拟合误差时的面形不对应最优的基于变形镜的激光束整形系统性能。

参 考 文 献

- 1 Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005.
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 2 Xie Yongjie, Liu Jingru, Zhao Xueqing. Laser beam smoothing and uniform illumination in ICF[J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 454-459.
谢永杰, 刘晶儒, 赵雪庆. ICF中光束平滑及靶面辐照均匀性技术评述[J]. 激光技术, 2001, 25(6): 454-459.
- 3 E P Walker. Superresolution Applied to Optical Data Storage Systems[OL]. <http://hdl.handle.net/10150/289046>.
- 4 F M Dickey, S C Holswade, D L Shealy. Laser Beam Shaping Applications[M]. New York: CRC Press, 2006: 182-208.

- 5 F M Dickey, S C Holswade. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2000.
- 6 X Jiang, S Zhou, Z Lin. Improved uniformity of target illumination by combining a lens array and the techniques of spectral dispersion[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(2): 023109.
- 7 Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102005.
刘志辉, 杨欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光束匀化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102005.
- 8 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Yin Shaoyun, *et al.*. Design of semiconductor laser shaping system based on hyperbola substrate microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602016.
殷智勇, 汪越峰, 尹韶云, 等. 基于双曲面基底微透镜阵列的半导体激光器整形系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602016.
- 9 M T Eismann, A M Tai, J N Cederquist. Iterative design of a holographic beam-former[J]. Appl Opt, 1989, 28(13): 2641-2650.
- 10 C C Aleksoff, K K Ellis, B D Neagle. Holographic conversion of a Gaussian beam to a near-field uniform beam[J]. Opt Eng, 1991, 30(5): 537-543.
- 11 F M Dickey, S C Holswade. Gaussian laser beam profile shaping[J]. Opt Eng, 1996, 35(11): 3285-3295.
- 12 J S Liu, M R Taghizadeh. Iterative algorithm for the design of diffractive phase elements for laser beam shaping[J]. Opt Lett, 2002, 27(16): 1463-1465.
- 13 Y Zhao, Y Li, Q Zhou. Vector iterative algorithm for the design of diffractive optical elements applied to uniform illumination [J]. Opt Lett, 2004, 29(7): 664-666.
- 14 E G Loewen, E Popov. Diffraction Grating and Applications[M]. New York: Marcel Dekker, 1997.
- 15 Nie Shuzhen, Yu Jin, Yu Gang, *et al.*. Study on the shaped laser beam with linear spot array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s205001.
聂树真, 余锦, 虞钢, 等. 线状点阵分布整形光束研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s205001.
- 16 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Investigation of fitting capability of active mirror for controlling ICF's focal profile [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(1): 1-5.
曾志革, 凌宁, 姜文汉. 用于ICF焦斑形态控制的能动反射镜拟合波面能力研究[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(1): 1-5.
- 17 K Nemoto, T Fujii, N Goto, *et al.*. Transformation of a laser beam intensity profile by a deformable mirror[J]. Opt Lett, 1996, 21(3): 168-170.
- 18 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Controlling focal profile of He-Ne laser beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(4): 581-586.
曾志革, 凌宁, 姜文汉. He-Ne激光束的焦斑形态控制[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 581-586.
- 19 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. The investigation of controlling laser focal profile by deformable mirror and wave-front sensor[J]. Journal of Modern Optics, 1999, 46(2): 341-348.
- 20 Z Feng, L Huang, M Gong. Focal-plane irradiance tailoring using the concept of Woofer-Tweeter deformable mirrors[J]. Opt Express, 2014, 22(8): 8871-8879.
- 21 A Rundquist, A Efimov, D H Reitze. Pulse shaping with the Gerchberg-Saxton algorithm[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(10): 2468-2478.
- 22 Guozhen Yang, Bizhen Dong, Benyuan Gu, *et al.*. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison[J]. Applied Optics, 1994, 33(2): 209-218.
- 23 L A Romero, F M Dickey. Lossless laser beam shaping[J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(4): 751-760.
- 24 W H Jiang, N Ling, X J Rao, *et al.*. Fitting capability of deformable mirror[C]. SPIE, 1991, 1542: 130-137.
- 25 L H Huang, C H Rao, W H Jiang. Modified Gaussian influence function of deformable mirror actuators[J]. Opt Express, 2008, 16(1): 108-114.
- 26 Wu Fuchao. Mathematical Methods in Computer Vision[M]. Beijing: Science Press, 2008.
吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社. 2008
- 27 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1355-1360.
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1355-1360.

栏目编辑: 张雁