

文章编号: 0258-7025(2010)05-1259-06

G-S 算法在光束近场场强控制中的应用

余 浩^{1,2,3} 黄林海^{2,3} 饶长辉^{2,3} 姜文汉^{2,3}

¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
² 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 提出了一种迭代算法, 该算法基于 G-S 算法, 利用光束角谱传播公式迭代出补偿近场光强分布所需的相位, 使光束近场的场强得到控制。在此算法的基础上, 设计一套自适应光学系统以实现光束近场场强的控制, 并通过数值模拟和实验验证了该方法的可行性。实验结果表明, 经过自适应系统校正后近场光强分布与理想光强分布的振幅相似度 ϵ 值从未校正前的 0.718 提高到 0.966, 表明系统对光束的近场场强控制有较好效果。

关键词 自适应光学; 近场场强; G-S 算法; 变形镜

中图分类号 TP273⁺.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1259

Application of G-S Algorithm to the Control of Beam Near-Field Intensity

Yu Hao^{1,2,3} Huang Linhai^{2,3} Rao Changhui^{2,3} Jiang Wenhan^{2,3}

¹ College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract A method based on the G-S algorithm is presented, using beam angular spectrum transmit formula to iterate the phase that the compensation for the near-field intensity distribution requires. The iterative algorithm used in the control of beam near-field intensity is presented. Based on this algorithm, an adaptive optics system to achieve control of beam near-field intensity is designed, and numerical simulation and experiments verify the feasibility of this method. The experimental results show that the similarity value ϵ , which is the distribution of beam near-field amplitude comparing to the ideal distribution of the amplitude, has been improved from 0.718 to 0.966 when the adaptive system working. This indicates that the system is effective in controlling the beam near-field intensity.

Key words adaptive optics; near field intensity; G-S algorithm; deformable mirror

1 引 言

在激光传输等领域, 由于在大气中传输时受到湍流和热晕等因素的影响以及有些激光器本身发射的激光束质量不高, 激光到达目标时能量集中度降低。自适应光学系统是一种有效地校正大气影响的手段之一, 常规的自适应光学系统都是对波前相位进行补偿, 而最有效的补偿为对相位和振幅的全场补偿。全场补偿可以使到达目标上的光强分布达到

衍射极限分布, 双变形镜自适应光学系统是实现全场补偿的技术之一。Roggemann 等^[1]讨论了激光发射系统中双变形镜校正出射主激光振幅和相位问题; F. Yu. Kanev 等^[2]研究了双变形镜系统对湍流闪烁校正问题。

在自适应光学技术中, 对波前相位的校正方法有基于无波前探测的波前校正技术, 典型的有基于随机并行梯度下降 (SPGD) 波前控制算法^[3,4]、遗传

收稿日期: 2009-08-20; 收到修改稿日期: 2009-09-17

作者简介: 余 浩 (1981—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: 14034505@qq.com

导师简介: 饶长辉 (1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

算法^[5]波前校正技术,还有基于波前测量和波前重构算法的波前校正技术,典型的有哈特曼传感技术、干涉测量技术、Zernike 相衬技术、G-S 测量技术^[6],但这些方法都无法对光束近场的场强进行有效的控制。李有宽等^[7]曾提出基于 Y-G 算法对光束近场场强进行控制的方法,并进行了仿真模拟,但没有在实验上实现。本文在传统的 G-S 算法基础上提出一种相位迭代算法,是利用已知激光的出射振幅分布和近场接收平面上需要达到的振幅分布,在光束传输过程中反复相位迭代得到出射场所需的相位信息,然后通过控制变形镜得到该相位,使光束的近场场强分布与所要求的理想场强分布接近,从而达到对光束近场场强的控制,并在实验上验证了该方法的可行性。

2 方法介绍

2.1 双变形镜自适应系统

双变形镜自适应系统如图 1 所示,是由变形镜 1(DM1)对入射主激光进行相位调制,使得其在变形镜 2(DM2)上的振幅分布尽可能地逼近变形镜 2 处所需要的振幅分布,变形镜 2 对激光进行相位补偿,从而使主激光的相位和振幅得到全场补偿。

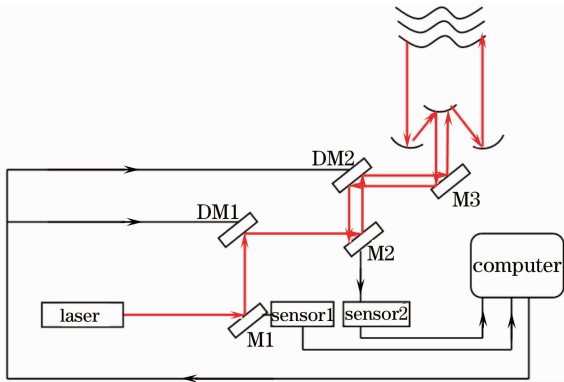


图 1 双变形镜自适应光学系统示意图

Fig. 1 Two-deformable-mirror adaptive optics system

而双变形镜自适应光学系统的关键技术之一是通过变形镜 1 对激光束的调制,使光束在变形镜 2 上的场强分布满足变形镜 2 处所需的场强分布,这就需要利用变形镜实现对光束近场场强的控制。基于 G-S 算法利用变形镜实现对光束近场场强的控制。

2.2 G-S 算法

20 世纪 70 年代初, Gerchberg 和 Saxton 提出了 G-S 算法,用来解决从两个光强分布重构相位分布的问题^[7,8]。G-S 算法是通过在物空间和频域空间之间迭代,在空域和频域中都进行修正以加强预

知的知识或实际测量得到的数据的相位反演算法^[9,10]。图 2 是传统 G-S 算法的步骤框图。

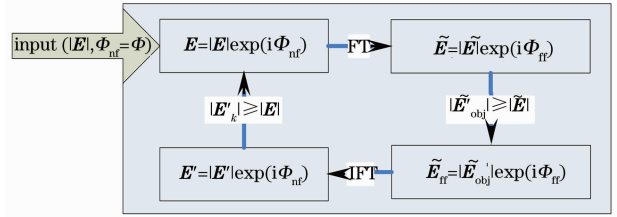


图 2 传统 G-S 算法步骤框图

Fig. 2 Block diagram of the traditional G-S algorithm

迭代过程中,传统 G-S 算法利用了两个可被测定的约束条件,即透镜入射前的振幅分布和透镜后焦面上远场振幅分布。算法开始于一个对光波(含振幅 $|E|$ 和一个任意的初始相位分布 Φ) 的快速傅里叶变换,得到远场 \tilde{E} ,保留远场 \tilde{E} 的相位 Φ_{ft} 而将远场振幅 $|\tilde{E}_0|$ 替换成实际测量的远场振幅 $|\tilde{E}_{obj}|$,得到修正后的远场 \tilde{E}_{ft} ,然后通过对远场 \tilde{E}_{ft} 进行傅里叶变换又得到近场 E' ,同样只保留相位 Φ_{nt} 而将振幅替换成 $|\tilde{E}|$,得到修正后的近场并作为第二次迭代的初始条件循环下去,以使计算得到的近场和远场的振幅分布不断地逼近实测的。当计算得到的远场振幅分布与实际测量所得到的结果达到预先设定的近似程度时,就输出迭代的相位 Φ_{nt} 。

2.3 相位迭代算法

传统的 G-S 算法是利用出射面和接收面上测得的振幅作为约束条件,迭代出两个平面上的相位。在传统 G-S 算法的基础上,提出一种基于 G-S 算法的相位迭代算法。该算法是利用已知出射场振幅和预期要达到的接收场的振幅为约束条件,计算出输出光束需要的相位,并利用自适应光学系统对光束近场场强进行控制。图 3 是该相位迭代算法的步骤框图。

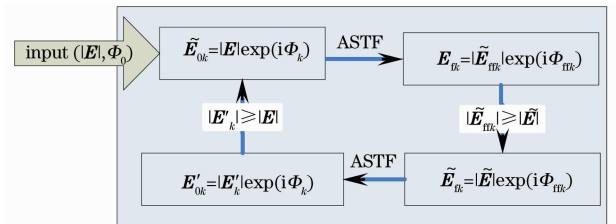


图 3 相位迭代算法步骤框图

Fig. 3 Block diagram of the phase iterative algorithm

利用光波角谱传播公式(ASTF)对光束的传播进行计算,角谱理论^[11]的基本思想是:首先对复振幅 $A(\xi, \eta)$ 做傅里叶变换,将其分解为一系列沿不同方向传播的三维简谐平面波, $A(\xi, \eta)$ 的空间频谱

$a(f_\xi, f_\eta)$ 正是空间频率为 (f_ξ, f_η) 的平面波成分的复振幅密度; 根据 $z = 0$ 平面的频谱 $a(f_\xi, f_\eta)$, 可以求出在距离 z 处 (x, y, z) 平面上的频谱分布 $e(f_\xi, f_\eta)$; 最后通过对 $e(f_\xi, f_\eta)$ 的反傅里叶变换, 也即是传播到接收面上、经历了不同相位迟的所有平面波相叠加, 就可以综合出接收面上衍射图形的复振幅分布 $\mathbf{E}(x, y)$ 。算法开始于光束质量较差的初始光波(含振幅 $|\mathbf{E}|$ 和一个任意的初始相位分布 Φ_0), 利用光波角谱传播公式计算, 得到接收场 \mathbf{E}_{tk} , 保留接收场 \mathbf{E}_{tk} 的相位 Φ_{tk} , 而将振幅 $|\tilde{\mathbf{E}}_{tk}|$ 替换成理想的

振幅 $|\tilde{\mathbf{E}}|$, 得到修正后的接收场 $\tilde{\mathbf{E}}_{tk} = |\tilde{\mathbf{E}}| \exp(i\Phi_{tk})$, 然后利用角谱传播公式对 $\tilde{\mathbf{E}}_{tk}$ 的反向传输进行计算又得到新的入射场, 同样只保留入射场相位 Φ_k 而将振幅替换成 $|\mathbf{E}|$, 得到修正后的入射场 $\tilde{\mathbf{E}}_{0k} = |\mathbf{E}| \exp(i\Phi_k)$ 并作为下次迭代的初始条件循环下去, 以使测量得到的接收场光强分布和理想接收场的光强分布不断逼近。当测量得到的接收场光强与理想衍射得到的光强达到预先设定的近似程度时, 就输出迭代的相位 Φ_k 。第 k 次算法的迭代过程可以表示为

$$\mathbf{E}_{tk}(x, y) = |\tilde{\mathbf{E}}_{tk}(x, y)| \exp[i\Phi_{tk}(x, y)] = T_{\text{ASTF}}\{\tilde{\mathbf{E}}_{0k}(x, y)\}, \quad (1)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{tk}(x, y) = |\tilde{\mathbf{E}}(x, y)| \exp[i\Phi_{tk}(x, y)], \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}'_{0k}(x, y) = |\mathbf{E}'_k(x, y)| \exp[i\Phi_k(x, y)] = T_{\text{ASTF}}\{\tilde{\mathbf{E}}_{tk}(x, y)\}, \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{0k+1}(x, y) = |\mathbf{E}(x, y)| \exp[i\Phi_{k+1}(x, y)] = |\mathbf{E}(x, y)| \exp[i\Phi_k(x, y)], \quad (4)$$

式中 $\tilde{\mathbf{E}}'_{0k}$ 和 \mathbf{E}_{tk} 为第 k 次迭代得到的入射场和接收场; $\tilde{\mathbf{E}}_{0k+1}$ 和 $\tilde{\mathbf{E}}_{tk}$ 分别为第 k 次迭代后, 得到约束条件加强后修正的入射场和接收场, $|\mathbf{E}|$ 和 $|\tilde{\mathbf{E}}|$ 为入射场实测振幅和接收场的理想振幅; $|\tilde{\mathbf{E}}_{tk}|$ 和 Φ_{tk} 分别为第 k 次迭代计算得到的接收场的振幅和相位, $|\mathbf{E}'_k|$ 和 Φ_k 分别为第 k 次迭代计算得到的入射场的振幅和相位; x, y 为坐标分布, λ 为光波波长, T_{ASTF} 为角谱传播计算公式。

与传统 G-S 算法不同的是, 迭代算法是利用已知入射场振幅和预期要达到的接收场的振幅为约束条件, 光束通过传播进入接收场并计算得到其相位信息, 利用角谱传播公式对接收场光束进行逆传播计算得到入射场新的相位信息构成一个循环, 不断迭代重复以上过程, 使得接收场的测量振幅分布和要求的振幅分布越来越接近, 最终使得接收面的场强分布达到预期要求。

通过分光镜 BS 后, 光束一部分进入 CCD1 探测其入射激光的光强畸变, 一部分进入变形镜, CCD1 和变形镜与分光镜的距离相等, 则 CCD1 中探测到的光强分布即光束达到变形镜时的光强分布; 在 CCD1 的位置上先用哈特曼传感器探测出 CCD1 处光束的相位信息, 则哈特曼传感器中探测到的光束相位信息即光束达到变形镜时的相位信息; 然后放置 CCD1 将 CCD1 探测得到的光强作为初始畸变光波; 经变形镜反射回来的光再经过分光镜, 一部分光束由反射镜反射进入 CCD2 中作为近场的接收场; 利用迭代算法计算出 CCD1 处光束所需的相位, 由哈特曼传感器探测到的相位和计算得到 CCD1 处光束所需的相位可得出变形镜所要产生的相位, 对变形镜进行控制, 使 CCD2 中光束近场场强分布达到预期要求。

3 方法仿真

为验证迭代算法的可行性, 提出了基于该算法的控制激光近场场强的自适应光学系统, 根据实验中的实际场景建立如图 4 所示的系统示意图。系统主要由 He-Ne 激光器及扩束系统、像差板(PP)、反射镜(M1)、CCD 探测器、哈特曼传感器(H-S)、PC 机、变形镜(DM)、分光镜(BS)组成。

光束从激光器出发, 扩束为孔径 4 mm 的平行光, 经过像差板, 光束传输 0.5 m 后产生光束质量较差的光束作为出射激光, 如图 4 中虚线部分所示。

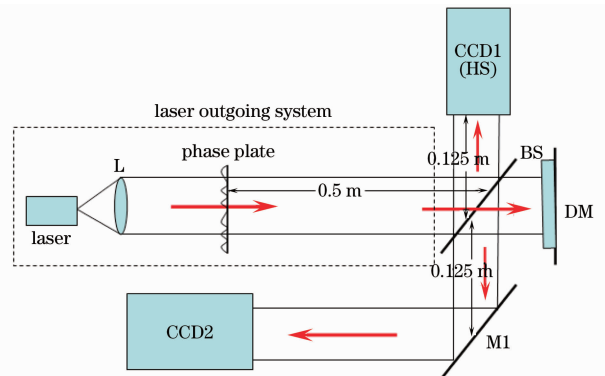


图 4 光束近场场强控制自适应系统示意图
Fig. 4 Adaptive optics system controlling near-field of laser beam intensity

仿真采用与实验时一致的参数,把一质量较好、波长为 633 nm,孔径为 4 mm 的 He-Ne 激光,经过均方根(RMS)值为 0.26λ ,峰谷(PV)值为 1.05λ 的像差板传播 0.5 m 后产生畸变的光束作为出射激光, CCD1 和变形镜与分光镜的距离为 0.125 m,变形镜有效靶面为 $7.68\text{ mm}\times 7.68\text{ mm}$ 。以 CCD1 采集到的光斑作为仿真的入射光斑,光强分布如图 5(a)所示;以 CCD2 作为接收面,接收面近场理想要求的光强分布如图 5(b)所示,为孔径 4 mm 的平行光;变形镜采用理想变形镜可产生任意面形;光束传播进入近场 CCD2 中探测其校正后近场光强分布。

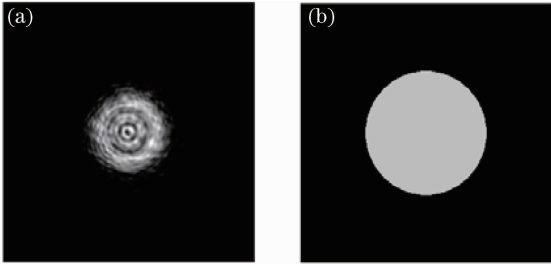


图 5 (a)入射激光光强;(b)近场理想光强分布
Fig. 5 (a) Intensity of incoming laser; (b) ideal intensity of laser in near field

定义性能评价函数衡量校正后的近场光强与理想近场光强的相似程度, ϵ 定义为近场光斑的振幅与理想近场光斑的振幅相似度,表达式为

$$\epsilon = \frac{\sum |\tilde{\mathbf{E}}_{\text{fit}}(x, y)| \cdot |\tilde{\mathbf{E}}(x, y)|}{\left(\sqrt{\sum |\tilde{\mathbf{E}}_{\text{fit}}(x, y)|^2} \cdot \sqrt{\sum |\tilde{\mathbf{E}}(x, y)|^2}\right)}, \quad (5)$$

当振幅相似度 ϵ 值接近于1时近场实测振幅越接近

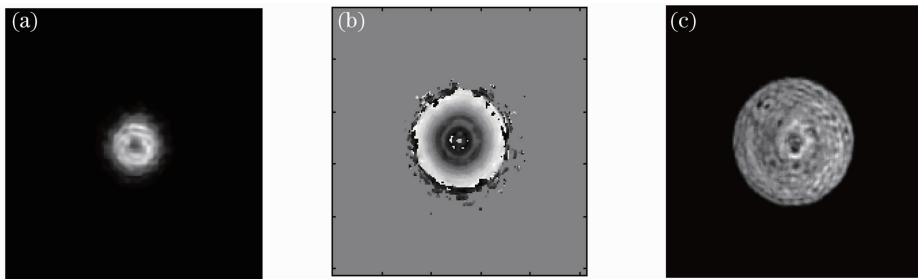


图 7 (a)未校正光束近场场强分布;(b)入射光束所需相位分布;(c)校正后光束近场场强分布
Fig. 7 (a) Intensity of laser in near field before correction. (b) required phases of the incoming laser; (c) intensity of laser in near field after correction

仿真了 CCD2 与变形镜在不同距离时,利用迭代算法控制变形镜对近场场强进行校正的效果。校正后 CCD2 上近场场强分布如图 8 所示,图 8(a)为当 CCD2 与变形镜距离 0.5 m 时校正后的场强分布,振幅相似度 ϵ 值为 0.974;图 8(b)为当 CCD2 与变形镜距离 0.8 m 时校正后的场强分布,振幅相似

需要达到的近场振幅,式中 $|\tilde{\mathbf{E}}_{\text{fit}}|$ 和 $|\tilde{\mathbf{E}}|$ 分别为迭代第 k 次的近场光束振幅和理想的近场光束振幅。

仿真时设置迭代次数为 30 次,当 CCD2 与变形镜距离为 0.625 m 时得到的振幅相似度 ϵ 值与迭代次数的关系如图 6 所示。

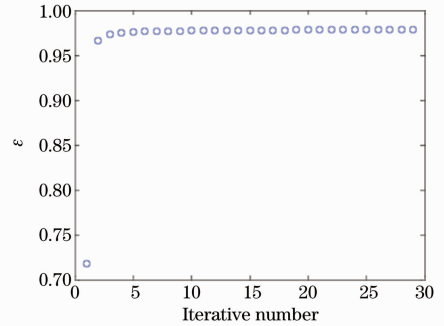


图 6 ϵ 值与迭代次数曲线

Fig. 6 ϵ curve of iterative number

由图 6 可得出迭代基本收敛,入射激光光束与理想光束的振幅相似度 ϵ 值为 0.718,迭代 30 次校正后近场光斑的振幅相似度 ϵ 值为 0.978,振幅相似度 ϵ 值越来越接近 1,仿真结果比较理想。当经过变形镜后使入射光束的相位为迭代算法输出得到的相位,那么到达近场时光束的振幅会接近预期效果。当 CCD2 与变形镜距离为 0.625 m 时,未校正时 CCD2 上光束近场的场强分布如图 7(a)所示,利用算法迭代 30 次经计算得到入射光束所需相位如图 7(b)所示,经校正后 CCD2 上光束近场的场强分布如图 7(c)所示,校正后的近场光束场强分布与理想近场光束场强分布比较接近,光束质量明显提高。

度 ϵ 值为 0.970;图 8(c)为当 CCD2 与变形镜距离 1 m 时校正后的场强分布,振幅相似度 ϵ 值为 0.955。从仿真结果可以得到对不同距离近场场强的控制,该方法都有明显的效果,但有所差异,这与 CCD2 与变形镜的距离和算法的性能有关,需要在以后的仿真与实验中进行更深入的研究。

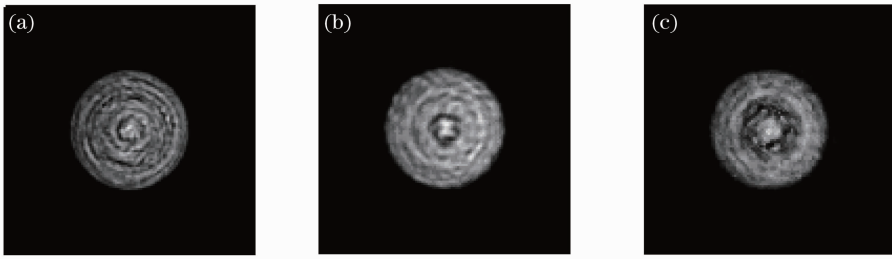


图 8 不同位置的近场场强校正效果

Fig. 8 Intensity of laser in near field after correction on the different positions

从仿真结果可以看到,迭代算法可以有效地利用自适应光学系统对激光光束近场强度进行控制,但是与理想结果还存在误差。分析造成误差的主要原因有:1)出射激光束光束质量较差,并不一定能校正成理想需要的光束;2)仿真过程中接收面只能接收到部分光波信息,测量与计算得到的光波信息与实际的信息存在误差;3)激光传播过程中产生的衍射效应是自适应光学系统很难校正的;4)仿真中变形镜靶面按实际大小产生面形,并没有对整个波面进行相位校正,这是产生误差的主要原因之一。

6.6 mm×4.73 mm。

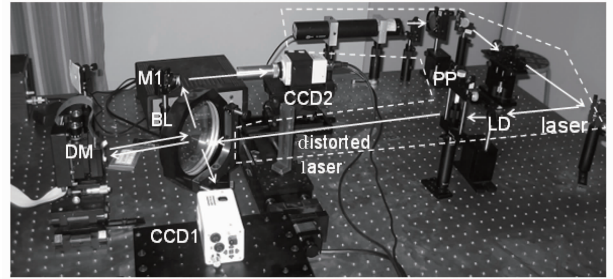


图 9 光束近场场强控制自适应系统

Fig. 9 Adaptive optics system controlling near-field intensity of laser beam

4 实验验证

根据仿真分析的结果,搭建了如图 9 所示的光学系统,实现了 G-S 算法在光束近场场强控制中应用的实验。实验中各项参数为,激光波长为 633 nm,光束经过 32 边形的光阑(LD)出射直径为 4 mm,经过 RMS 值为 0.26λ 、PV 值为 1.05λ 的像差板(PP)传播 0.5 m 后达到分光镜(BL)产生的畸变光束作为出射激光;分光镜与变形镜(DM)的距离为 0.125 m,变形镜是单元数为 512×512 的相位型液晶空间光调制器、靶面大小为 $7.68\text{ mm}\times 7.68\text{ mm}$; CCD1 距离分光镜为 0.125 m 探测畸变光束光强分布, CCD2 距离变形镜为 0.625 m 探测校正过程中的近场光强分布, CCD 探测器靶面大小为

实验中先用子孔径数为 36×36 、有效口径为 4.5 mm 的哈特曼传感器放置在 CCD1 位置探测畸变光束的波前信息,然后利用迭代算法计算出畸变光束所需的像差分布,可以得到变形镜所需产生的像差分布。 CCD1 探测到畸变光束的光强分布如图 10(a)所示;若没有经过校正 CCD2 探测到的近场光强分布如图 10(b)所示;经过自适应系统校正后 CCD2 探测到的近场光强分布如图 10(c)所示;理想的近场光强分布如图 10(d)所示。 CCD1 上探测到的入射光斑的振幅与理想近场光斑的振幅相似度 ϵ 值为 0.718; CCD2 上探测到校正前光斑振幅相似度 ϵ 值为 0.634,校正后光斑振幅相似度 ϵ 值为 0.966,近场光强的光束质量得到改善。

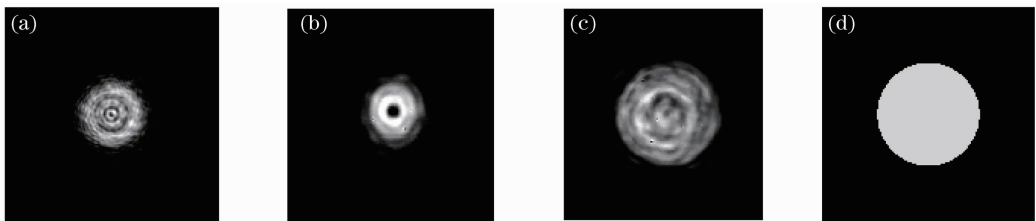


图 10 (a)光束在 CCD1 上的场强分布;(b)光束未经过校正到达 CCD2 上的场强分布; (c)光束经过校正后到达 CCD2 上的场强分布;(d) CCD2 上的理想光强分布

Fig. 10 (a) Intensity of the laser beam in the CCD1;(b) intensity of the laser beam in the CCD2 before correction; (c) intensity of the laser beam in the CCD2 after correction; (d) ideal intensity of the laser beam in the CCD2

从实验结果可以看到,系统校正后光束近场场强得到了改善,但是与仿真结果相比仍然存在差距。分析并归结造成误差的主要原因有:1)哈特曼传感器探测得到的相位信息存在误差,使变形镜产生的像差也有误差,同时变形镜本身面形也会引入像差;2)实验光路并不十分精准,也会引入倾斜等误差;3)G-S算法对噪声比较敏感,实际光路中的各种噪声扰动会使计算产生误差。

在光束控制中有时需要对相位进行控制,可以在近场位置再放置一个变形镜对场强控制后的光束进行相位校正,这样利用双变形镜可以对激光束的振幅和相位进行全场校正。

5 结 论

基于G-S算法的理论提出了一套对激光束近场场强进行控制的算法并建立了实际的自适应光学系统。仿真的结果表明,通过相位的多次迭代可使近场光束的质量得到较大的改善,校正后的场强分布基本达到理想要求,并利用实验验证了这种方法的可行性。实验仅对静态像差产生的波前畸变进行了研究,而实际激光器的波前畸变是动态的,其控制技术需要更深入的研究;同时利用双变形镜实现光束振幅和相位的全场控制,也需要进行深入研究。

参 考 文 献

- 1 M. C. Roggemann, D. J. Lee. A two deformable mirror concept for correcting scintillation effects in laser projection[C]. *SPIE*, 1998, **3381**: 66
- 2 F. Yu. Kanev, V. P. Lukin. Amplitude-phase beam control in a two-mirror adaptive system [J]. *J. Atmos. Opt.*, 1991,

- 4: 1273~1279
- 3 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Experimental explorations of the laser beam cleanup system based on stochastic parallel-gradient-descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 613~618
梁永辉,王三宏,龙学军等. 随机并行梯度下降光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 613~618
- 4 Chen Bo, Li Min, Li Xinyang *et al.*. Close-loop experiment of adaptive optics system based on linear phase retrieval technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1633~1637
陈波,李敏,李新阳等. 基于线性相位反演技术的自适应光学闭环实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1633~1637
- 5 Yang Ping, Xu Bing, Jiang Wenhan *et al.*. Study of a genetic algorithm used in an adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1628~1632
杨平,许冰,姜文汉等. 遗传算法在自适应光学系统中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1628~1632
- 6 Huang Linhai, Ning Yu, Yang Huafeng *et al.*. Multi-frame algorithm with deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1443~1448
黄林海,宁禹,杨华峰等. 基于变形镜面形的多帧相位反演算法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1443~1448
- 7 Li Youkuan, Chen Dongquan, Du Xiangwan. Simulation of full field correction with two-deformable-mirror adaptive optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6): 665~669
李有宽,陈栋泉,杜祥琬. 双变形镜自适应光学全场补偿模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(6): 665~669
- 8 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun *et al.*. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1996
周仁忠,陶吉祥,赵达尊等. 自适应光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1996
- 9 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237~246
- 10 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- 11 Xie Jinghui, Liao Ningfang, Cao Liangcai. Fundamentals of Fourier Optics and Contemporary Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007
谢敬辉,廖宁放,曹良才. 傅里叶光学与现代光学基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2007