

衍射误差对相位校正效果的影响

蒋鹏志 邹永超 马浩统 杜少军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 自适应光学系统的光路通常包含很多光学器件,而各光学器件存在加工误差、装调误差和非均匀热变形等,这些因素会对光束质量产生影响,因此系统内光路相位畸变的校正对获得好的光束质量至关重要。然而系统光路较长时,激光在传输过程中的衍射效应会对内光路相位畸变的校正效果产生重要影响。模拟了离焦和像散等实际应用中存在的主要畸变在不同衍射(以菲涅耳数表征)和像差大小下的校正效果。研究表明:校正效果随着衍射的增强而变差,校正效果良好的菲涅耳数范围为 $N_f > 11$;随着像差的增大相位校正效果变差。

关键词 自适应光学; 相位校正; 菲涅耳数; 相位畸变

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100417

Influence of Diffraction Error on Optical Aberration Correction

Jiang Pengzhi Zou Yongchao Ma Haotong Du Shaojun

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The adaptive optics (AO) systems contain a lot of optical components, but aberrations such as the mismachining tolerance and heat distortion induced by these elements will have negative influence on the laser beam quality. The correction of the aberration is of great importance. However, the diffraction effect of the laser beam propagation in the AO system limits the corrective efficiency of the inner aberration. The corrective efficiency of the defocusing and astigmatism under different Fresnel numbers and different sizes of aberration is analyzed and simulated. The result indicates that the corrective efficiency decreases with the decrease of Fresnel numbers, and in order to achieve good correction effect, Fresnel numbers of the phase conjugate correction N_f is more than 11. The corrective efficiency decreases with the increase of sizes of aberration.

Key words adaptive optics; phase correct; Fresnel number; phase aberration

OCIS codes 010.0010; 140.0140; 140.3290

1 引 言

在空间光通信、激光传输等领域,由于激光在大气中传输时受到湍流和热晕等因素的影响,光束质量会变差^[1~5]。因补偿激光大气传输中湍流、热晕等造成的畸变的需要,自适应光学系统的光路通常比较复杂,光学元件较多。而复杂的系统光路会在以下两个方面影响光束质量:一方面由于工艺水平的限制各光学器件加工误差、装调误差等不可避免地会使激光产生畸变^[6,7];另一方面对于高能激光系统,由于光学系统中各光学元件不同程度地吸收部分激光能量,这些光学元件会产生温升、应力和变形^[7]。当发射激光光强分布不均匀时,光学元件将产生非均匀的热变形,特别是光学元件较多时,这些

叠加的非均匀热变形将严重影响光束质量。

为了校正自适应系统内光路的光学元件等对光束质量的影响,传统自适应系统内光路相位畸变的校正方法是:在发射端发射一束信标激光反向通过内光路,波前传感器探测发射端信标激光入射波前位相、波前控制器控制变形镜使发射激光校正后在发射端波面变为平面,最终达到校正系统内光路相位畸变的目的。然而研究中发现光在传输中的衍射效应对自适应系统内光路相位畸变的校正效果有着重要影响。

本文将光在传输中的衍射效应作为影响自适应系统内光路相位畸变校正效果不理想的因素之一进行研究。针对此问题建立仿真模型,研究在系统内光

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-04-03

作者简介: 蒋鹏志(1987—),男,硕士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail:jiangpengzhi1@163.com

导师简介: 杜少军(1972—),男,研究员,主要从事高能激光传输方面的研究。E-mail:d_sj@tom.com

路存在离焦和像散这些实际应用中的主要像差的情况下,考察衍射效应(以菲涅耳数表征)和像差大小对校正效果的影响,并最终得到校正效果良好的菲涅耳数范围,为自适应系统内光路相位校正效果影响因素的分析、分层校正等方法的提出提供了重要依据。

2 相位校正仿真模型

2.1 仿真模型的建立

为了简化问题便于分析,本文认为发射激光波面为理想平面。其对应的仿真模型如图 1 所示。仿真模型工作原理:一束信标光经过畸变相位屏后传

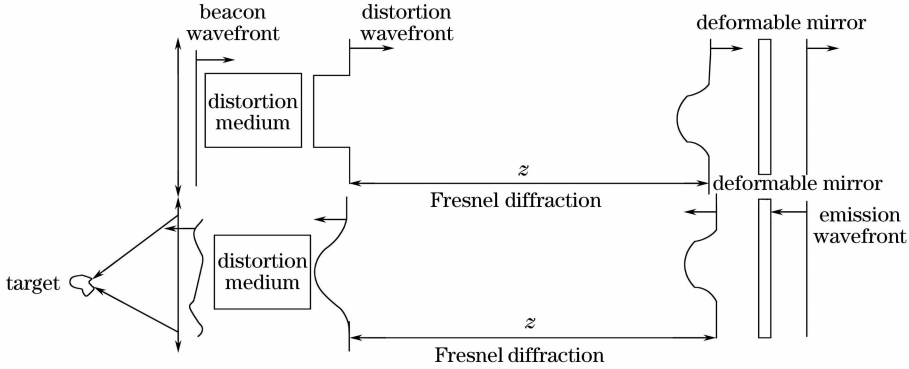


图 1 相位校正仿真模型图

Fig. 1 Simulative configuration of phase correction

2.3 畸变介质仿真模型

在实际应用中系统内部存在的像差主要为低阶像差,而在低阶像差中又以离焦和像散为主,因此本文中畸变介质采用离焦和 45° 像散畸变的组合。模型采用单位圆上的 Zernike 多项式^[9],其表达式为

$$Z(4) = \sqrt{3}(2r^2 - 1), \quad (2)$$

$$Z(5) = \sqrt{6}r^2 \sin 2\varphi, \quad (3)$$

式中 $Z(4)$ 表示离焦畸变, $Z(5)$ 表示 45° 像散畸变。

2.4 激光传输模型

激光传输采用角谱传播模型^[10],其表达式为

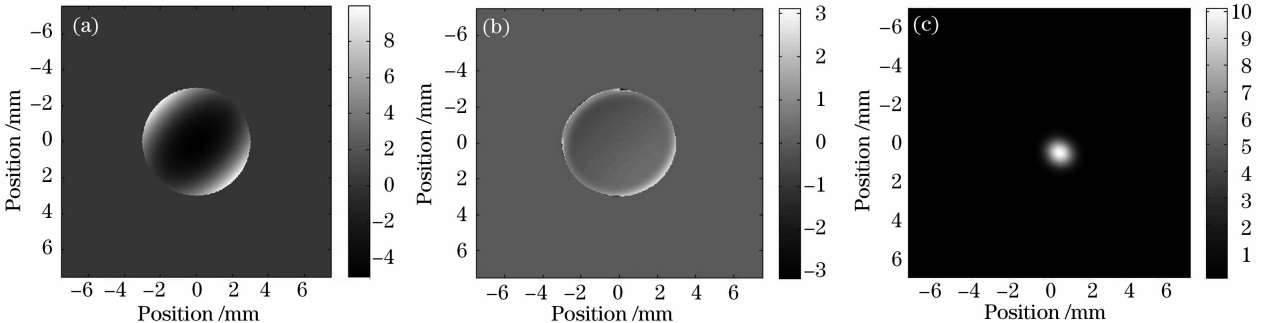


图 2 (a)畸变相位分布图; (b)校正后相位分布图; (c)校正后远场光强分布图

Fig. 2 (a) Distorted-phase distribution; (b) corrective phase distribution; (c) corrective distribution of the far-field

播距离 z 经波前探测器探测、波前控制器控制变形镜校正其波面为平面。发射激光经此变形镜校正后传播至发射端,计算得到其校正后相位分布、远场光强分布和斯特雷尔比。

2.2 平面波模型

仿真中信标光和发射激光均为平面波,模型采用超高斯分布^[8],其表达式为

$$E = A \exp[-2(r/R)^p], \quad (1)$$

式中 R 表示光束半径, r 为对应点半径, p 为超高斯阶数。文中取 $A = 1, R = 3 \text{ mm}, p = 7$ 。

$$A(f_x, f_y, z) =$$

$$A_0(f_x, f_y) \exp[jkz \sqrt{(1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2)}], \quad (4)$$

式中 $A_0(f_x, f_y)$, $A(f_x, f_y, z)$ 分别为原始光场和传播到 z 处光场的离散傅里叶变换频谱, λ 为波长, f_x, f_y 为空间频谱, z 为传播距离。文中波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 。

3 仿真结果与分析

3.1 衍射效应大小对校正效果的影响

离焦和像散畸变的像差峰谷(PV)值均取为

0.8λ, 分别在 $z=0.3$ m(菲涅耳数为 28.2) 和 $z=1$ m(菲涅耳数为 8.46) 条件下进行仿真。其中菲涅耳数 $N_f = a^2 / (z\lambda)$, 由于激光在传输过程中孔径 a 变大即菲涅耳数变化, 为了便于分析, 菲涅耳数计算的孔径 a 均采用激光初始孔径 $R=3$ mm。当菲涅耳数为 28.2 时, 其计算结果如图 2 所示, 其中斯特

雷尔比^[9]为 0.814。当菲涅耳数为 8.46 时, 其计算结果如图 3 所示, 其中斯特雷尔比为 0.532。对比上述两种仿真结果可以得出结论: 大菲涅耳数下, 自适应系统相位校正效果良好; 小菲涅耳数下, 相位校正效果不佳。

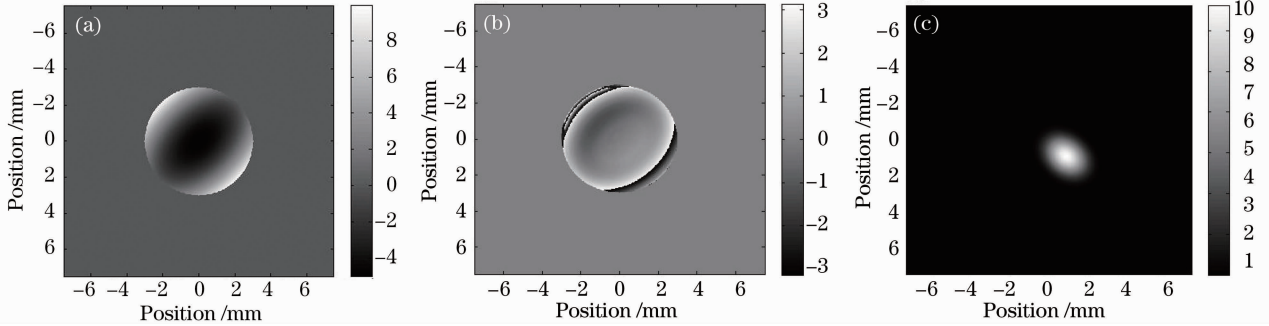


图 3 (a) 畸变相位分布图; (b) 校正后相位分布图; (c) 校正后远场光强分布图

Fig. 3 (a) Distorted-phase distribution; (b) corrective phase distribution; (c) corrective distribution of the far-field

通过改变 z 的大小依次增大菲涅耳数, 计算其远场得到模拟结果如图 4 所示。从图 4 可知, 随着菲涅耳数的减小, 校正效果逐渐变差。用斯特雷尔比来评价校正效果, 可以得到不同菲涅耳数下的斯特雷尔比如图 5 所示。如果定义斯特雷尔比小于 0.6 时校正效果不能接受, 则从图 5 可以得到, 当 $N_f < 11$ 时, 校正效果不可接受。因此在此相位畸变条件下, 校正效果良好的菲涅耳数范围为 $N_f > 11$ 。此现象产生的本质原因是由于自适应光学系统中像差源(等效位置)与校正器之间存在着一段距离, 而激光在传输中的衍射效应改变了光束的相位和振

幅, 波前探测器探测到的波前并不是系统需补偿的真实波前。随着激光光束菲涅耳数的变小(衍射效应的增强), 波前探测器探测到的波前与真实波前之间的差异增大, 从而导致自适应系统内光路的相位校正效果逐渐变差。

对于高能激光系统由于其发射激光的光强分布多为不均匀分布, 因而造成其实际的菲涅耳数比理论公式计算的菲涅耳数小很多, 容易处于校正效果良好的菲涅耳数范围之外, 从而常常得不到理想的校正效果。

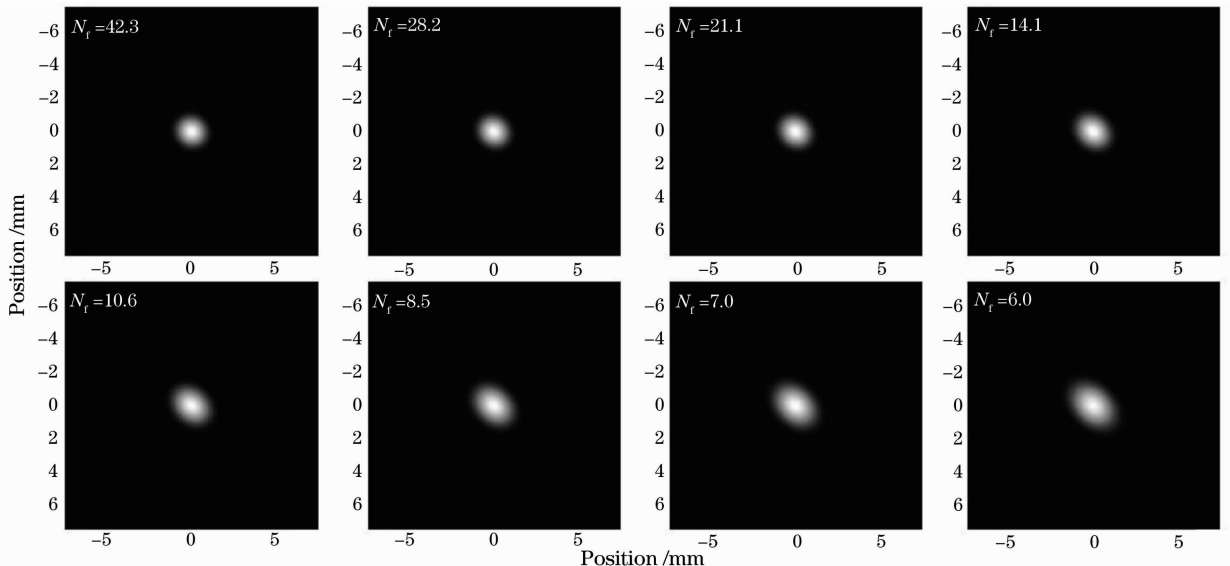


图 4 不同菲涅耳数下的远场光强分布图

Fig. 4 Distributions of the far-field light intensity under different Fresnel numbers

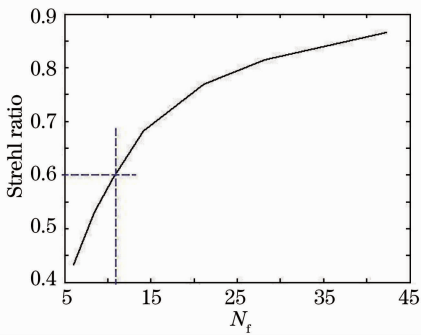


图 5 不同菲涅耳数下的斯特雷尔比图

Fig. 5 Strehl ratios under different Fresnel numbers

3.2 像差大小对校正效果的影响

在离焦和像散畸变以 1:1 比例存在的情况下, 改变整体像差的 PV 值, 通过 Matlab 模拟得到不同像差大小下的斯特雷尔比如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随着像差的增大, 斯特雷尔比降低, 校正效果变差。此现象产生的本质原因是随着光路中像差的增大, 衍射效应对光束的振幅和相位影响增大, 波前探测器探测到的波前与真实波前之间的差异增大, 从而导致自适应系统内光路的相位校正效果逐渐变差。

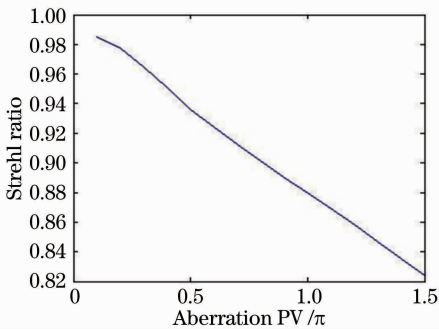


图 6 不同像差大小下的斯特雷尔比图

Fig. 6 Strehl ratios under different sizes of aberration

4 结 论

本文将光在传输中的衍射效应作为影响自适应系统内光路相位校正效果的一个因素进行了研究,

建立了仿真模型, 研究了在系统内光路存在离焦和像散这些主要低阶像差的情况下衍射大小和像差大小对校正效果的影响, 并最终得到了如下结论: 随着衍射效应的增强, 相位校正效果逐渐变差, 校正效果良好的菲涅耳数范围为 $N_f > 11$; 随着像差的增大, 相位校正效果变差。

参 考 文 献

- 1 N. B. Baranova, A. V. Mamaev, N. F. Pilipetsky *et al.*. Wave-front dislocations: topological limitations for adaptive systems with phase conjugation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1983, **73**(5): 525~528
- 2 C. A. Primmermen, T. R. Price, R. A. Humphreys *et al.*. Atmospheric compensation experiments in strong-scintillation conditions[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12): 2081~2088
- 3 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(4): 753~758
- 4 Wang Yingjian, Wu Yi, Wang Chao *et al.*. Experimental results of atmospheric-compensation in the horizontal propagation path [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1998, **15**(2): 164~169
王英俭, 吴毅, 汪超等. 激光实际大气传输湍流效应相位校正一些实验结果[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 164~169
- 5 Wang Xiaolin, Liu Zhejing, Zhou Pu *et al.*. Investigation on influence of laser intensity fluctuation on beam cleanup system based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1396~1401
王小林, 刘泽金, 周朴等. SPGD 算法光束净化中光强起伏对校正效果的影响研究[J]. *光学学报*, 2009, **30**(5): 1936~1941
- 6 Li Qiang, Shen Mangzuo. Measurement of telescope aberrations using phase diversity method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1553~1557
李强, 沈忙作. 利用相位差法测量望远镜像差[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1553~1557
- 7 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. Experimental research of laser beam cleanup for dynamic aberrations based on stochastic parallel-gradient-descent method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 97~101
王三宏, 梁永辉, 龙学军等. 基于随机并行梯度下降方法的动态光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 97~101
- 8 David L. Shealy, John A. Hoffnagle. Laser beam shaping profiles and propagation[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5118~5130
- 9 Zhou Renzhong. Adaptive Optics Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 43~50, 161~164
周仁忠. 自适应光学理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 43~50, 161~164
- 10 Ji Jiarong. Advanced Optics Tutorial [M]. Beijing: Science Press, 2007. 58~61
季家镛. 高等光学教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 58~61