

文章编号: 0253-2239(2009)07-1761-05

# 双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统像差解耦分析

胡诗杰<sup>1,2</sup> 许冰<sup>2</sup> 陈善球<sup>2</sup> 杨平<sup>2</sup> 吴健<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; <sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 分析了双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的工作原理, 并通过共模波前传感器中的两套波前传感器探测得到的波前信息进行数据差分融合, 按照优化理论推导了两套波前校正器需要校正的像差公式。根据此像差公式, 仿真分析了以两套 61 单元变形反射镜组成的双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的校正能力, 并与单套波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的校正能力进行了比较, 结果验证了推导的像差公式的正确性, 也说明了两套波前校正器不仅可以解耦, 而且其校正效果与理想行程单套波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的校正效果相当。

**关键词** 自适应光学; 全光路像差校正; 双波前校正器; 波前传感器

**中图分类号** TP273 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1761

## Aberration Decoupling Analysis in Adaptive Optics System with Two Sets of Wavefront Correctors for All-path Aberration Correction

Hu Shijie<sup>1,2</sup> Xu Bing<sup>2</sup> Chen Shanqiu<sup>2</sup> Yang Ping<sup>2</sup> Wu Jian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Optics and Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract** The principle of an adaptive optics (AO) system with two sets of wavefront correctors for all-path aberration correction is analyzed. The measured wavefront information by two sets of Hartmann-Shack wavefront sensors is fused, and the optimized formula of the aberrations corrected by two sets of wavefront correctors is deduced. The performance of the AO system with two sets of wavefront correctors for all-path aberration correction is simulated. The result is compared with that of the AO system with a single corrector. The simulation result indicates the formula is right and the two sets of wavefront correctors can be decoupled. The correction performance is the same as that of AO system with a single deformable mirror with ideal stroke.

**Key words** adaptive optics; all-path aberration correction; double-wavefront corrector; wavefront sensor

## 1 引 言

全光路像差校正自适应光学(AO)系统<sup>[1~2]</sup>可以同时校正光路中的所有像差, 具有常规 AO 系统没有的优点, 并且集成性和可靠性高。这种系统中的波前校正器可以是一套, 也可以是两套, 或者是多套。全光路像差校正自适应光学系统主要由波前校正器(变形反射镜和倾斜反射镜)、共孔径分光镜 ASE、角锥棱镜阵列、共模波前传感器组成, 其中共

模波前传感器包括两个波前传感器, 分别称之为 HS1 和 HS2, 前者主要用于探测内部出射波前信标, 后者用于探测外部波前信标, 从角反射器阵列返回的波前是入射波前的伪共轭<sup>[3~5]</sup>。当一套波前校正器的行程满足所有像差的校正要求时, 采用一套波前校正器校正; 当一套波前校正器的行程不能满足所有像差的校正要求时, 就必须采用两套或者多套波前校正器对其进行校正。对波前校正器是一套

收稿日期: 2008-07-15; 收到修改稿日期: 2008-10-20

作者简介: 胡诗杰(1973—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: seakeyhu@yahoo.com.cn

的情况,文献[6]分别通过斜率融合(包括直接斜率融合、加修正因子斜率融合)、波面融合和电压融合等方式对 HS1 和 HS2 探测的斜率数据进行融合来控制一套波前校正器进行了分析,并用实验进行了验证。对于两套波前校正器全光路像差校正自适应光学系统,由于系统中的两套波前校正器均有校正像差的功能,如果两套波前校正器像差解耦不好,将出现校正不足或者校正过头,甚至出现校正紊乱。本文就两套波前校正器(主要考虑两套变形反射镜)的像差解耦情况进行了理论分析。

## 2 双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统工作原理分析

图 1 所示的是双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统结构示意图。

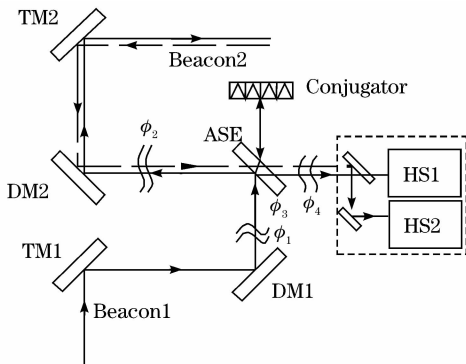


图 1 双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统结构示意图

Fig. 1 Configuration of AO system with two sets of correctors for all-path aberration correction

图 1 中出射信标 Beacon1 经倾斜反射镜 TM1、变形反射镜 DM1,携带出射激光本身像差、各光学元件像差以及所经光路扰动像差的总和  $\phi_1$  到达共孔径分光镜 ASE,部分能量经共孔径分光镜 ASE 反射至变形镜 DM2 和倾斜镜 TM2 最后反射出去,少部分能量透过 ASE,经角锥棱镜阵列反射回 ASE,再经 ASE 的反射面反射至 HS1。同时,外部信标光 Beacon2 经倾斜反射镜 TM2 和变形反射镜 DM2,携带所经光学元件的像差总和  $\phi_2$  透过 ASE 到达 HS2。假如共孔径分光镜 ASE 在激光出射过程中反射面存在吸热变形像差  $\phi_3$ ,那么 HS1 探测的出射激光波前信标也同时携带了 ASE 的变形像差  $\phi_3$ 。由于 ASE 的变形对透射波前影响很小,所以外部信标光经 ASE 透射后其像差仍然近似为  $\phi_2$ 。此时,内部波前信标和外部波前信标在共孔径分光镜

后到达它们的共同光路部分。假如共同光路部分的像差为一固定像差,那么可以用通过共同光路的标定波前分别对波前传感器 HS1 和波前传感器 HS2 进行标定<sup>[7]</sup>,以消除共同光路像差的影响;假如共同光路部分的像差为随机像差,不妨假设为  $\phi_4$ ,那么内部波前信标和外部波前信标在分别到达 HS1 和 HS2 时,就分别携带了共同光路部分的像差  $\phi_4$ 。所以,HS1 和 HS2 测量得到的像差分别为

$$\phi_{\text{HS1}} = -(\phi_1 + \phi_3) + \phi_4, \quad (1)$$

$$\phi_{\text{HS2}} = \phi_2 + \phi_4. \quad (2)$$

为了消除共同光路像差的影响,对 HS1 和 HS2 探测的波前像差  $\phi_{\text{HS1}}$  和  $\phi_{\text{HS2}}$  进行差分融合,就可以完全消除共同光路部分像差的影响。即:

$$\phi_{\text{HS1}} - \phi_{\text{HS2}} = -(\phi_1 + \phi_3 + \phi_2). \quad (3)$$

从(3)式可知, $\phi_{\text{HS1}} - \phi_{\text{HS2}}$  是波前校正器 DM1 和 DM2 要校正的像差总和。如果分别求出  $\phi_1 + \phi_3$  和  $\phi_2$ ,两套波前校正器 DM1 和 DM2 便可分别对它们进行校正。但是,从(1)式~(3)式,无法直接求出  $\phi_1 + \phi_3$  和  $\phi_2$ 。因此,可以寻找优化算法,使两套波前校正器校正的像差总和为  $\phi_{\text{HS1}} - \phi_{\text{HS2}}$ 。两套波前校正器校正的像差满足  $(\phi_1 + \phi_3)^2 + \phi_2^2$  取最小值。即  $(\phi_{\text{HS1}} - \phi_4)^2 + (\phi_{\text{HS2}} - \phi_4)^2$  取最小值。

令

$$f(\phi_4) = (\phi_{\text{HS1}} - \phi_4)^2 + (\phi_{\text{HS2}} - \phi_4)^2, \quad (4)$$

当  $\frac{\partial f}{\partial \phi_4} = 0$  时, $f(\phi_4)$  有最小值。此时,

$$\phi_4 = (\phi_{\text{HS1}} + \phi_{\text{HS2}})/2, \quad (5)$$

把(5)式代入(1)式和(2)式,除共同光路像差外两套波前校正器 DM1 和 DM2 需要校正的像差分别为

$$\phi'_{\text{DM1}} \approx -(\phi_{\text{HS1}} - \phi_{\text{HS2}})/2,$$

$$\phi'_{\text{DM2}} \approx (\phi_{\text{HS1}} - \phi_{\text{HS2}})/2. \quad (6)$$

根据(6)式,在系统实际工作时,两个波前校正器需要校正的像差也可以选择使用直接斜率融合、波面融合或者电压融合等方式求解。

## 3 双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统校正能力仿真

为了验证第 2 节中的像差校正原理,本节数值仿真模拟了双波前校正器全光路像差校正 AO 系统的波前校正效果,并与理想行程单波前校正器全光路像差校正 AO 系统的校正效果、有限行程单波前校正器全光路像差校正 AO 系统的校正效果进行了比较。单波前校正器全光路像差校正自适应光学系

统的结构示意图如图 2 所示。数值仿真的波前校正器均为 61 单元变形反射镜<sup>[8]</sup>, 哈特曼波前传感器的子孔径布局以及变形反射镜驱动器排布方式如图 3 所示, 图中的圆点表示变形镜驱动器位置, 方格表示 H-S 波前传感器子孔径。数值仿真中的像差由 Zernike 多项式前 35 项随机组成。

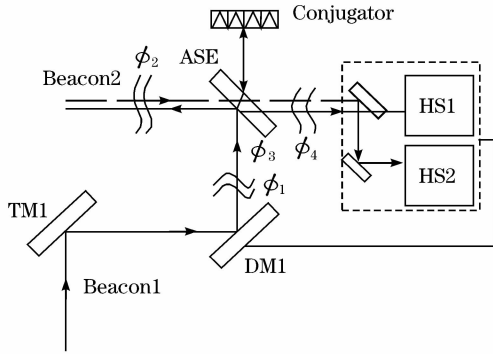


图 2 单波前校正器全光路像差校正自适应光学系统结构示意图

Fig.2 Configuration of AO system with a single corrector for all-path aberration correction

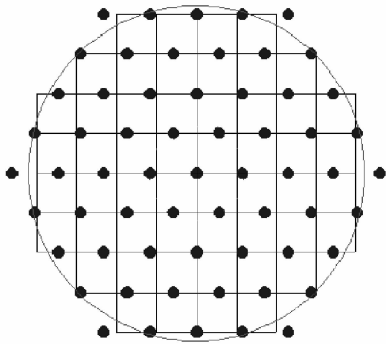


图 3 61 单元自适应光学系统变形镜驱动器与哈特曼子孔径布局结构示意图

Fig.3 Configuration of Hartmann subaperture and deformable mirror actuators of 61-element AO system

假定共模波前传感器中的 HS1 探测的 Beacon1 的像差如图 4 (a) 所示, HS2 探测的 Beacon2 的像差如图 4(b) 所示; 两波前信标融合后的差分波前信息如图 5(a) 所示, 图 5(b) 是目标处的开环远场光斑, 其斯特列尔比  $S_R = 0.103$ 。

图 2 所示的单波前校正器全光路像差校正自适应光学系统在变形反射镜的行程足够校正图 5(a) 所示的待校正波前时, 其校正残余波前和目标处的闭环远场光斑分别如图 6(a) 和 6(b) 所示, 闭环远场光斑的斯特列尔比  $S_R = 0.584$ ; 当波前校正器的行程不足以校正图 5(a) 所示的待校正波前时, 其校正效果如图 7 所示, 其远场光斑的斯特列尔比  $S_R = 0.474$ 。

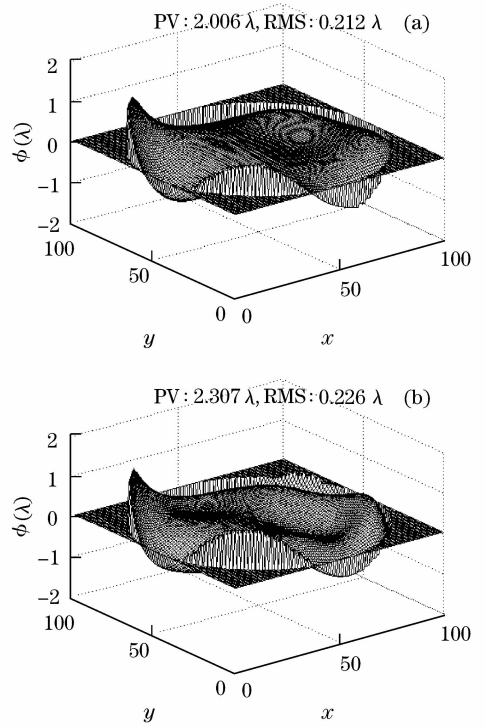


图 4 (a) 信标 Beacon1 原始波前像差 (b) 信标 Beacon2 原始波前像差

Fig.4 (a) The original wavefront aberration of Beacon1, (b) the original wavefront of Beacon2

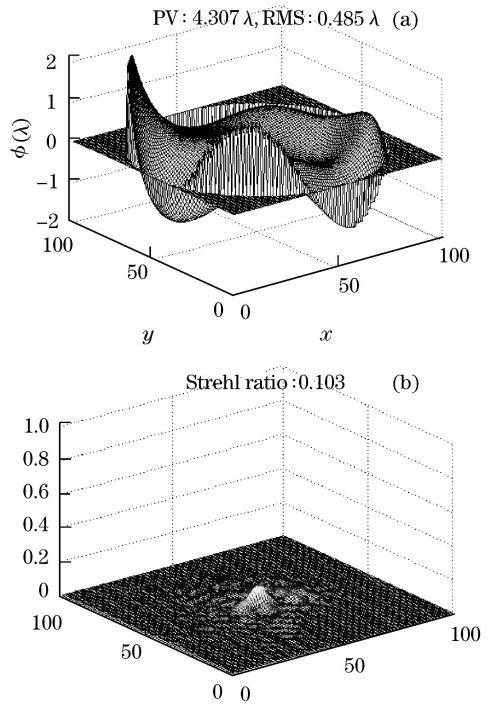


图 5 (a) 信标 Beacon1 和信标 Beacon2 的差分融合波前 (b) 目标处开环远场光斑

Fig.5 (a) The differential fused wavefront between the wavefronts of Beacon 1 and the wavefront of Beacon2. and (b) the open-loop far-field facula in target

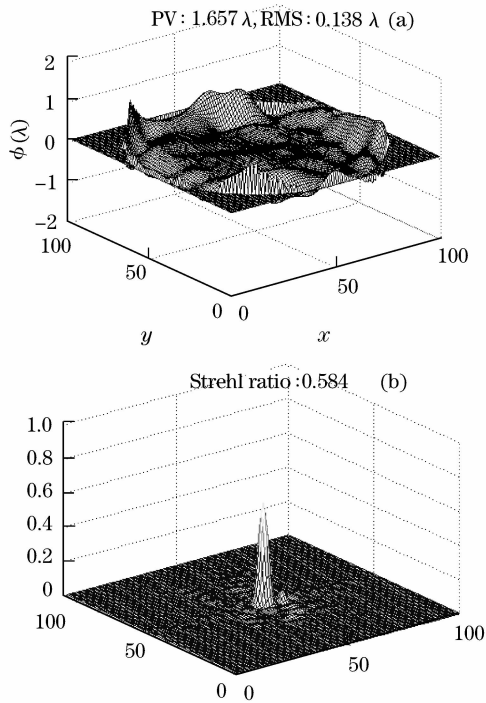


图 6 (a) 理想行程单变形镜全光路像差校正自适应光学系统校正后的残余波前与(b)远场光斑

Fig. 6 (a) The residual wavefront and (b) far-field facula after AO system with a single ideal stroke DM for all-path aberration correction

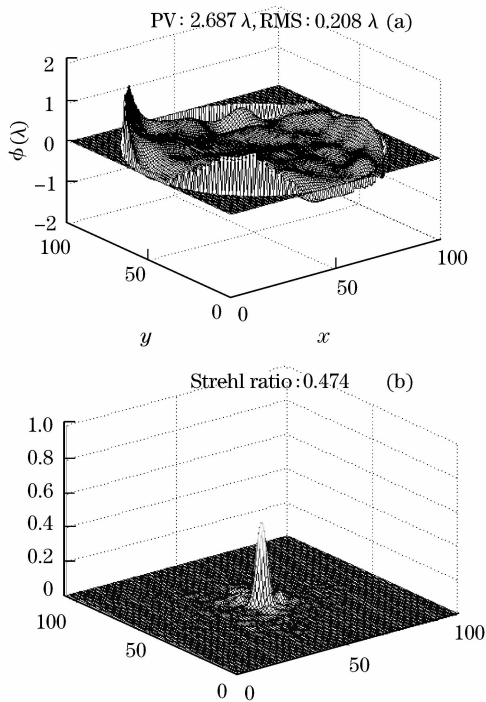


图 7 (a) 有限行程单变形镜全光路像差校正自适应光学系统校正后的残余波前与(b)远场光斑

Fig. 7 (a) The residual wavefront and (b) far-field facula after AO system with single limited stroke DM for all-path aberration correction

可见,当波前校正器行程不足以校正待校正波前时,自适应光学系统的校正效果受到较大限制。为了解决波前校正器的行程与待校正波前像差之间的矛盾,可以考虑采用两套波前校正器共同对像差波前进行校正。图 1 所示的两套波前校正器全光路像差校正自适应光学系统中的两套波前校正器按照(6)式分配它们校正的像差,图 5(a)所示的待校正差分融合像差经该系统校正后的残余波前及目标处的闭环远场光斑如图 8(a)和图 8(b)所示,其斯特列尔比  $S_R=0.584$ 。由此可见,在单波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的变形反射镜行程不足以校正待校正波前时,采用两个变形反射镜共同对待校正波前进行校正的效果与理想行程单变形反射镜全光路像差校正自适应光学系统的校正效果相同。这说明按照推导的双波前校正器校正像差公式,双波前校正器全光路像差校正 AO 系统中的两套波前校正器不仅可以解耦,而且也有很好的校正效果。

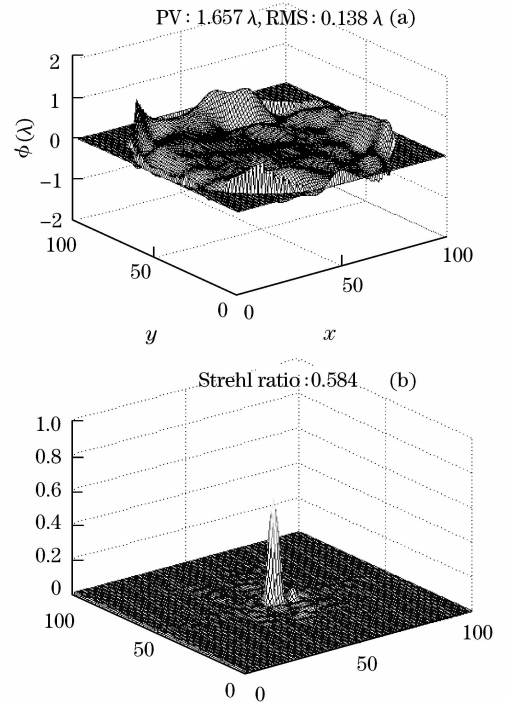


图 8 (a)两套波前校正器全光路像差校正自适应光学系统对差分融合波前校正后的残余波前及(b)远场光斑

Fig. 8 (a) Residual wavefront and (b) far-field facula after AO system with two DMs for all-path aberration correction

## 4 结 论

在双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统中,由于共孔径分光镜存在热变形像差,如果按照常规自适应光学系统的校正方法,该热变形像差将

不能得到有效校正。本文对双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的工作原理进行了分析,并按照优化理论求解了两套波前校正器的像差校正公式。根据此公式,共孔径分光镜像差将得到有效校正。最后,本文通过仿真对两套 61 单元波前校正器组成的双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统的校正效果进行了验证。结果表明,按照推导的双波前校正器像差校正公式,双波前校正器全光路像差校正自适应光学系统中的两套波前校正器不仅可以解耦,而且其校正效果与理想行程单变形镜全光路像差校正自适应光学系统的校正效果相当。

### 参 考 文 献

- 1 Billman K. W.. Airborne laser system common path/common mode design approach[C]. *SPIE*, 1999, **3706**: 196~203
- 2 Harold Schall, Andy Myers, David Weight *et al.*. In-flight calibration of an airborne wavefront control subsystem [C]. *SPIE*, 1999, **4034**: 196~203
- 3 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. The pseudo phase conjugate fidelity analysis of retroreflector array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(3):287~290  
侯 静,姜文汉,凌 宁. 角反射器阵列作为伪相位共轭器件的保真度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(3):287~290
- 4 Hu Shijie, Chen Shanqiu, Yang Ping *et al.*. The study of measurement precision of Hartmann-Shack wavefront sensor using retroreflector array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl.): 367~372  
胡诗杰,陈善球,杨 平等. 角锥棱镜阵列对波前传感器探测精度的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl.):367~372
- 5 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Pseudophase conjugator in common path/common mode adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11):1326~1330  
侯 静,姜文汉,凌 宁. 共光路/共模块自适应光学系统中赝相位共轭器件的应用分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11):1326~1330
- 6 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Data fusion of the two hartmann-shack wavefront sensors in the common path/common mode adaptive optics system[J]. *Acta Optics Sinica*, 2004, **24**(1): 131~136  
侯 静,姜文汉,凌 宁. 共光路/共模块自适应光学数据融合方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 131~136
- 7 Hu Shijie, Yang Ping, Zhang Xuejun *et al.*. The study of calibration method of common mode hartmann wavefront sensor in adaptive optics system for all-path aberration correction[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1):28~32  
胡诗杰,杨 平,张学军等. 全光路像差校正自适应光学系统中共模波前传感器标定方法研究[J]. *光电工程*, 2008, **35**(1):28~32
- 8 Jiang Wenhan, Wang Chunhong, Ling Ning *et al.*. 61-element adaptive optics system[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1998, **15**(2):193~198  
姜文汉,王春鸿,凌 宁等. 61 单元自适应光学系统[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2):193~198
- 9 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Ultimate curves of aberration and strehl ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1065~1067  
侯 静,姜文汉,凌 宁. 像差与斯特列耳比的极限曲线[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1065~1067
- 10 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4):327~332  
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4):327~332