

文章编号: 0253-2239(2005)12-1687-6

双变形镜自适应光学系统像差解耦研究

胡诗杰^{1,2} 许冰¹ 吴健² 姜文汉¹

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

摘要: 对由大行程变形镜和高空间频率变形镜组成的双变形镜自适应光学系统中的像差解耦原理和限定像差校正算法做了理论分析。认为在高空间频率变形镜的斜率响应矩阵中加入限定像差向量, 根据直接斜率法分别计算出两个变形镜的控制电压, 可以实现两个变形镜分别对低阶像差和高阶像差的闭环校正。仿真研究了 19 单元变形镜和 61 单元变形镜组成的双变形镜自适应光学系统对低阶像差和高阶像差分别校正的情况, 结果说明双变形镜自适应光学系统的校正效果与理想行程的单变形镜自适应光学系统的校正效果相当, 避免了制作同时具有大行程和高空间频率两个特征的变形镜。

关键词: 自适应光学; 双变形镜; 大行程变形镜; 高空间频率变形镜; 像差解耦

中图分类号: TP202⁺.7 文献标识码: A

Aberration Decoupling Analysis for Double Deformable Mirrors Adaptive Optical System

Hu Shijie^{1,2} Xu Bing¹ Wu Jian² Jiang Wenhan¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)
(² School of Optics and Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract: A theoretical study of the aberration decoupling and the algorithm of aberration limited for a double mirrors adaptive optical system including a large scale stroke deformable mirror and a high spatial frequency deformable mirror is presented. By adding a limitative aberration vector in the gradient response matrix of high spatial deformable mirror, the voltage of actuators of two deformable mirrors is calculated, and the two deformable mirrors can correct the low-order aberration and high-order aberration respectively. The situation that double deformable mirrors in an adaptive optical system correct the low-order aberration and high-order aberration respectively has been simulated. The result indicates that the close-loop correction performance of double deformable mirrors adaptive system is almost the same as that of the adaptive optical system with an ideal stroke deformable mirror.

Key words: adaptive optics; double deformable mirrors; large stroke DM; high spatial frequency DM; aberration decoupling

1 引言

自适应光学(AO)系统在不同的应用环境和应用目的下,有时使用一套单系统工作,有时使用两个或多个系统工作。两个系统一起工作时,每个系统都各有自己的用途,比如一个系统用于改善出射激光光束质量,另一个则用于大气湍流校正。对于两

个或多个自适应光学系统共同作用于一个目的研究, Sivokon^[1]分析了低空间分辨力系统和高空间分辨力系统联合使用,以提高整个系统的空间校正能力,李新阳等^[2]分析了两个自适应光学系统串联校正以提高整个系统的控制效果的方法,而 Roggemann 等^[3]提出用两个变形镜来校正激光大

作者简介: 胡诗杰(1973~),男,四川大竹人,助理研究员,博士研究生,主要从事自适应光学的研究。

E-mail: seakeyhul@sina.com.cn

收稿日期: 2005-03-25; 收到修改稿日期: 2005-05-23

气传输中的闪烁效应, Karr^[4]则讨论了利用双变形镜方案避免热晕相位校正不稳定性问题, Kanev等^[5]研究了双变形镜系统对湍流闪烁校正问题。

对于相位的补偿,按照文献[1,2]所述的方法用两个完整的自适应光学系统串联使用来提高激光光束质量从原理上讲具有可行性,但这将极大地提高成本,增加系统的体积。当单套自适应光学系统对同时包含大的低阶像差和高阶像差的光束校正时,要求变形镜同时具有大行程和高空间频率两个特征,这又将极大地增加变形镜的制作难度。因此,考虑在一套自适应光学系统中用两个分别具有较大行程和较高空间频率的变形镜来分别校正大的低阶像差和高阶像差。本文将详细分析两个具有不同特征的变形镜如何分别校正低阶像差和高阶像差,以防止两个变形镜对像差的重复校正或校正不全。

2 双变形镜像差解耦原理分析

双变形镜的像差解耦在模式法中可以通过选取两个变形镜要校正的模式阶数来实现像差解耦,但这种方法由于耗费的计算时间较多,并且两个变形镜分别校正引起的残差也较大,所以一般不用于实时波前控制。本文主要从直接斜率法^[6]的角度对双变形镜像差解耦进行分析。

直接斜率法中哈特曼-夏克(H-S)波前传感器测量得到的斜率向量与斜率响应矩阵的关系为

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}\mathbf{V}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{G} 为哈特曼-夏克波前传感器测量得到的子孔径斜率向量, \mathbf{R} 为变形镜驱动器的斜率响应矩阵, \mathbf{V} 为变形镜驱动器的电压向量。

图 1 所示的是双变形镜自适应光学系统结构示意图。

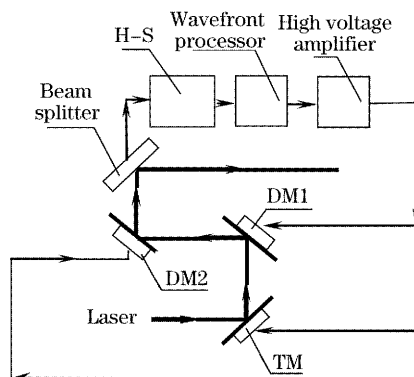


图 1 双变形镜自适应光学系统结构示意图

Fig. 1 Configuration of double deformable mirrors adaptive optics system

系统中的两个变形镜分别是校正低阶像差的大行程变形镜 DM1 和校正高阶像差的高空间频率变形镜 DM2。假定 DM1 和 DM2 的斜率响应矩阵分别为 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 , 哈特曼-夏克波前传感器探测的像差斜率向量为 \mathbf{G} 。使用斜率信息 \mathbf{G} 控制变形镜 DM1 和 DM2。为了实现两个变形镜分别校正低阶像差和高阶像差,不妨假定 DM2 满足限定条件 R_m 而不校正低阶像差,即

$$\sum_{i=1}^{m_2} V_i R_{m_i} = 0, \quad (2)$$

式中 m_2 为驱动器个数, V_i 为第 i 个驱动器电压。此时变形镜 DM2 的扩展斜率响应矩阵

$$\mathbf{R}_2^* = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 \\ R_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

对 \mathbf{R}_2^* 求广义逆 \mathbf{R}_2^{*+} , 即可得到变形镜 DM2 的控制电压

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{R}_2^{*+} \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由于变形镜 DM2 根据限定条件校正的高阶像差的斜率向量 $\mathbf{G}_2 = \mathbf{R}_2 \mathbf{V}_2$, 那么, 剩余低阶像差的斜率向量 $\mathbf{G}_1 = \mathbf{G} - \mathbf{G}_2$, 因此, 变形镜 DM1 校正的电压向量

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{R}^+ \mathbf{G}_1. \quad (5)$$

3 限定校正算法

假定 Φ 是待校正波前, 它由某一较大的低阶像差 Φ_1 和高阶像差 Φ_2 组成, 其中 Φ_1 和 Φ_2 分别由大行程变形镜和高空间频率变形镜校正, 它们可以由圆域内正交的泽尼克 (Zernike) 多项式^[7,8] (或 Karhunen-Loeve 模式等其他正交的多项式) 表示:

$$\Phi_1 = a_k Z_k, \quad (6)$$

式中 Z_k 表示第 k 阶泽尼克多项式, a_k 表示第 k 阶的泽尼克多项式系数。

$$\Phi_2 = \sum_{n=1}^l a_n Z_n, \quad (n \neq k) \quad (7)$$

式中 a 表示泽尼克多项式系数, l 表示选定的模式数。

令变形镜 DM2 有 m_2 个驱动器, 第 i 个驱动器的位置坐标为 (x_i, y_i) , 响应度为 R_{2i} , 驱动电压为 V_i 。所以 DM2 校正的像差

$$\Phi_2 = \sum_{n=1}^l a_n Z_n = \sum_{i=1}^{m_2} R_{2i}(x, y) V_i, \quad (n \neq k)$$

由于泽尼克多项式在圆域内正交, 所以

$$\iint \Phi_1 \Phi_2 dx dy = \iint a_k Z_k \sum_{n=1}^l a_n Z_n dx dy =$$

$$\iint a_k Z_k \sum_{i=1}^{m_2} R_{2_i}(x, y) V_i dx dy = 0, (n \neq k) \quad (8)$$

所以，

$$\iint Z_k \sum_{i=1}^{m_2} R_{2_i}(x, y) V_i dx dy = 0,$$

即

$$\sum_{i=1}^{m_2} V_i \iint Z_k R_{2_i}(x, y) dx dy = 0.$$

令 $Rm_i = \iint Z_k R_{2_i}(x, y) dx dy$, 把 Rm_i 代入(3)式, 即可得到 DM2 的扩展斜率响应矩阵。

求得 DM2 的扩展斜率响应矩阵后, 即可按照

第 2 节中所述的方法分别求得两个变形镜的校正电压, 以实现低阶像差和高阶像差的解耦。

4 数值仿真分析

以 19 单元大行程变形镜 DM1 和 61 单元^[9]高空间频率变形镜 DM2 组成的自适应光学系统为例仿真研究了双变形镜自适应光学系统的像差解耦。假定待校正波前像差 Φ 为离焦像差 Φ_1 和其他高阶像差 Φ_2 的总和, 该像差用泽尼克多项式前 35 阶随机组成, 其中的离焦像差表示为 $\Phi_1(x, y) = a_3 Z_3 = a_3 [2(x^2 + y^2) - 1]$, 所以变形镜 DM2 的斜率响应矩阵的像差限定项

$$Rm_i = \iint R_{2_i}(x, y) Z_3 dx dy = \iint R_{2_i}(x, y) [2(x^2 + y^2) - 1] dx dy, \quad (9)$$

把 Rm_i 代入变形镜 DM2 的斜率响应矩阵得到扩展斜率响应矩阵:

$$R_2^* = \begin{bmatrix} R_2 \\ Rm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{2_{1,1,x}} & R_{2_{1,2,x}} & \cdots & R_{2_{1,m_2,x}} \\ R_{2_{1,1,y}} & R_{2_{1,2,y}} & \cdots & R_{2_{1,m_2,y}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{2_{n,1,x}} & R_{2_{n,2,x}} & \cdots & R_{2_{n,m_2,x}} \\ R_{2_{n,1,y}} & R_{2_{n,2,y}} & \cdots & R_{2_{n,m_2,y}} \\ R_{m_1} & R_{m_2} & \cdots & R_{m_{m_2}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

对于以上给定的待校正波前, 我们仿真比较了双变形镜自适应光学系统、理想行程(指行程足以校正待校正波前)61 单元单变形镜自适应光学系统和有限行程(指行程受制作工艺限制不足以校正待校正波前)61 单元单变形镜自适应光学系统的校正效

果。哈特曼-夏克波前传感器的子孔径布局及其与两个变形镜驱动器的匹配关系如图 2 所示, 图中的方格代表哈特曼-夏克波前传感器的子孔径排布方式, 圆点代表变形镜驱动器位置。图 3 所示的是待校正像差波前包含离焦和去掉离焦的像差。

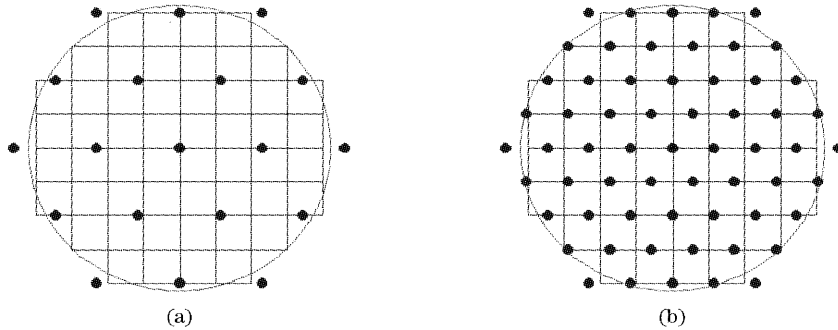


图 2 (a)19 单元和(b)61 单元自适应光学系统变形反射镜驱动器和子孔径结构布局示意图

Fig. 2 Configuration of subaperture and deformable mirror actuators of (a) 19-element and (b) 61-element AO system

对于图 3 所示的待校正像差波前, 理想行程 61 单元单变形镜自适应光学系统校正前波前和校正后残余波前如图 4 所示, 残余波前峰谷值(PV)为

1. 208λ, 均方根值(RMS)为 0. 126λ。有限行程 61 单元单变形镜自适应光学系统校正波前和校正残余波前如图 5 所示, 残余波前峰谷值为 1. 550λ, 均方根值为

0.186λ。图 6 是双变形镜自适应光学系统实现像差解耦后的 19 单元变形镜和 61 单元变形镜的校正波前、两个变形镜校正波前的总和,以及校正残余波前,残

余波前峰谷值为 1.176λ,均方根值为 0.125λ。可见,双变形镜自适应光学系统的校正残余波前好于有限行程单变形镜自适应光学系统的校正残余波前。

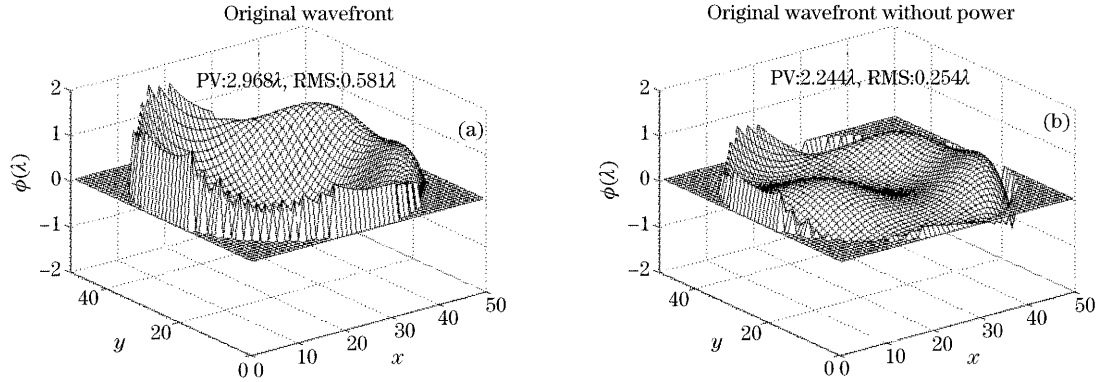


图 3 (a)带离焦的原始波前,(b)去掉离焦的原始波前

Fig. 3 The original wavefront (a) with power and (b) without power

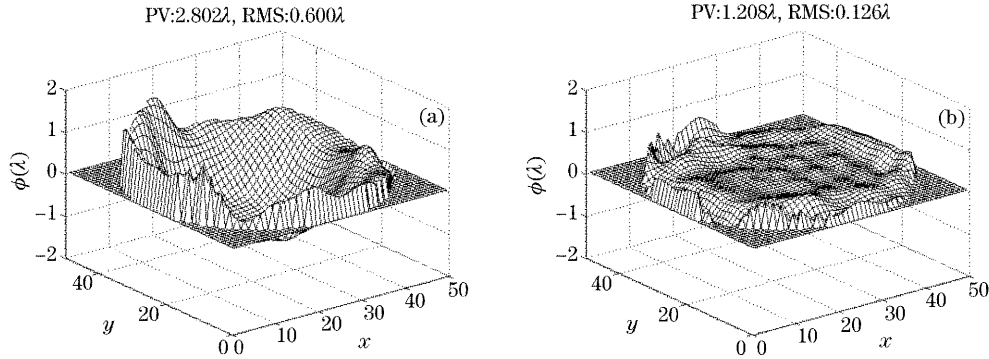


图 4 理想行程的 61 单元变形反射镜(a)校正波前和(b)校正残余波前

Fig. 4 (a) The wavefront corrected by the 61-element deformable mirror with an ideal stroke and (b) the residual wavefront

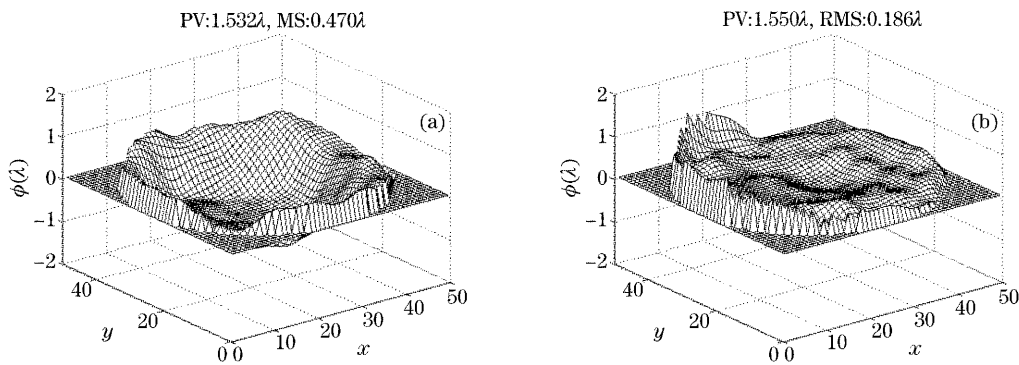


图 5 有限行程的 61 单元变形反射镜(a)校正前波前和(b)校正后残余波前

Fig. 5 (a) The wavefront corrected by the 61-element deformable mirror with limited stroke and (b) the residual wavefront

图 7 是开环远场、理想行程 61 单元单变形镜自适应光学系统校正后的闭环远场、有限行程 61 单元单变形镜自适应光学系统校正后的闭环远场,双变形镜自适应光学系统校正后的闭环远场。我们以施特雷尔比(Strehl rate)^[10,11], S_r 即实际峰值强度与衍射极限峰值强度之比作为光束质量评价指标。从

远场仿真结果可以看出:当 61 单元单变形镜的行程不足以校正待校正像差波前时,变形镜对像差的拟合能力将受到限制,远场校正效果从理想行程单变形镜系统校正效果的 S_r 由 0.598 下降为 0.421;而实现像差解耦的双变形镜的校正效果与理想行程 61 单元单变形镜的校正效果基本相当。

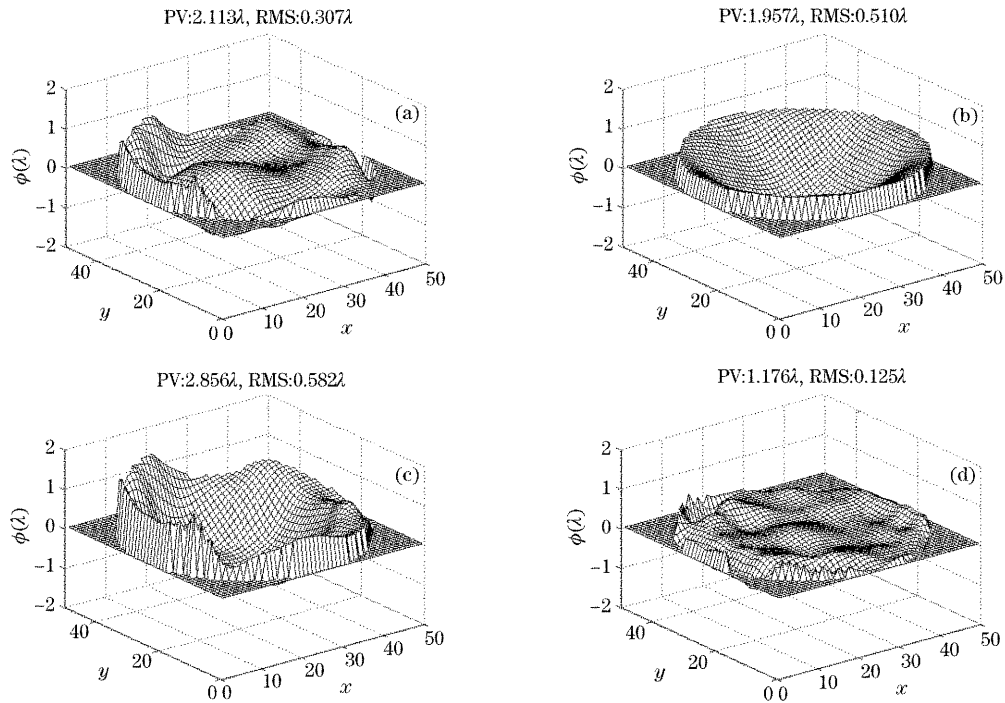


图 6 两个变形镜校正后,(a)61 单元变形反射镜校正波前和(b)19 单元变形反射镜校正波前,(c)为两个变形镜共同校正波前 (d)双镜校正后的残余波前

Fig. 6 (a) The wavefront corrected by 61-element DM, (b) the wavefront corrected by 19-element DM, (c) the wavefront corrected by two DMs together and (d) residual wavefront after two DMs correct

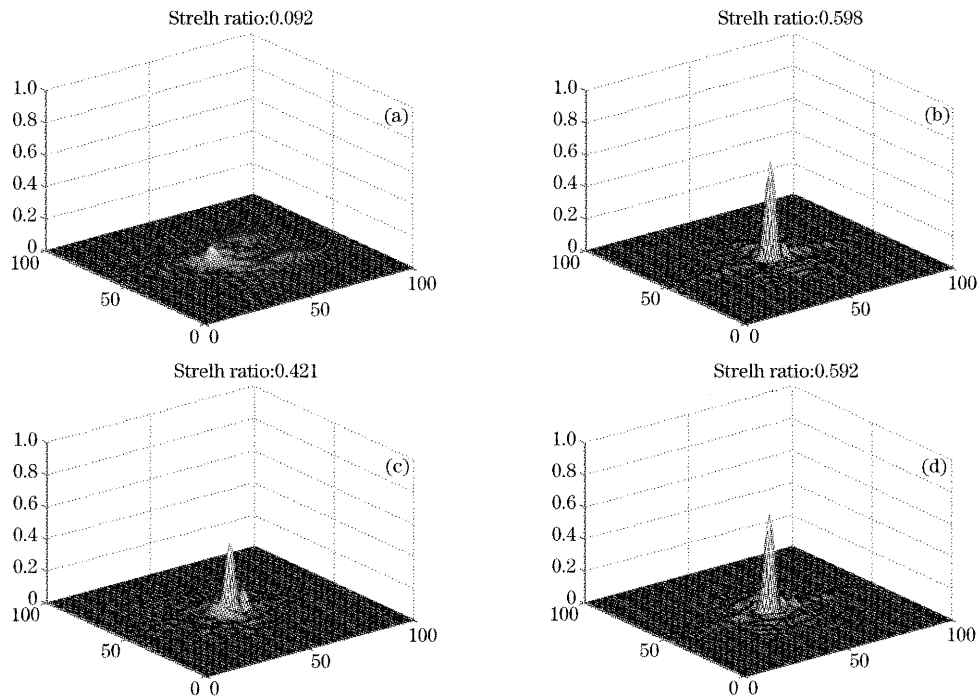


图 7 单个理想行程 61 单元变形反射镜自适应光学系统(a)开环远场和(b)闭环远场,(c)为单个有限行程 61 单元变形反射镜自适应光学系统闭环远场,(d)为 19 单元变形反射镜和 61 单元变形反射镜组成的双变形镜自适应光学系统闭环远场

Fig. 7 (a) The open-loop far field, (b) the closed-loop far field of AO system with a single 61-element DM with an ideal stroke, (c) the closed-loop far field of AO system with single 61-element DM with a limited stroke, and (d) the closed-loop far field of double DMs AO system with 19-element DM and 61-element DM

6 结 论

从哈特曼-夏克波前传感器测量得到的斜率向量,用扩展斜率响应矩阵实现双变形镜自适应光学系统的像差解耦,大行程变形镜和高空间频率变形镜分别校正低阶像差和高阶像差,进而实现全系统的稳定闭环。从仿真的残余误差波前和远场校正效果可以得出双变形镜自适应光学系统的校正效果好于有限行程单变形镜自适应光学该系统的校正效果,这种系统可以避免制作同时具有大行程和高空间频率两个特征的变形镜。双变形镜自适应光学系统像差解耦基于工程中常用的直接斜率法,对系统的控制速度不会产生大的影响。值得注意的是两个变形镜的驱动器排布方式均需与哈特曼-夏克波前传感器子孔径优化匹配,以使每个变形镜与哈特曼-夏克波前传感器一起工作时,均达到最优状态。该系统可以应用于任何需要校正大像差的场合,其中包括:人眼像差校正、惯性约束聚变(ICF)、微机电系统(MEMS)自适应光学系统以及改善激光光束质量等。

参 考 文 献

- 1 V. P. Sivokon, M. A. Vorontsov. High-resolution adaptive phase distortion suppression based solely on intensity information [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**(1): 234~247
- 2 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Control performance analysis of the construction of two adaptive optics systems in series[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1059~1064 (in Chinese)
李新阳,姜文汉. 两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1059~1064
- 3 Michael C. Roggemann, David J. Lee. Two-deformable-mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4577~4585
- 4 T. J. Karr. Instabilities of atmospheric laser propagation[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1221**: 26~55
- 5 Kanev Feodor Y., Makenova Nailya, Lukin Vladimir P. Amplitude-phase beam control in a two-mirror adaptive system [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5572**: 310~318
- 6 Li Xinyang, Wang Chunhong, Xian Hao *et al.*. Modal compensation effect analysis of the direct-gradient wavefront control algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 1143~1148 (in Chinese)
李新阳,王春红,鲜浩等. 直接斜率波前控制算法的模式校正效率分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 1143~1148
- 7 Duan Haifeng, Li Ende, Wang Haiying *et al.*. The effect of mode orthogonality of wavefront measurement and correction using Hartmann-Shack sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1143~1148 (in Chinese)
段海峰,李恩得,王海英等. 模式正交性对哈特曼-夏克传感器波前测量等的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1143~1148
- 8 Bo Qi, Hongbin Chen, Nengli Dong. Wavefront fitting of interferograms with Zernike polynomials [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(7): 1565~1569
- 9 Jiang Wenhan, Wang Chunhong, Ling Ning *et al.*. 61-element adaptive optics system[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 1998, **15**(2): 193~198 (in Chinese)
姜文汉,王春红,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
- 10 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Ultimate curves of aberration and Strehl ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1065~1067 (in Chinese)
侯静,姜文汉,凌宁等. 像差与斯特耳比的极限曲线[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1065~1067
- 11 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 327~332 (in Chinese)
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评论因素[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4): 327~332