

层向多层共轭自适应光学系统的模拟

颜召军¹, 杨朋千²

- (1. 中国科学院上海天文台 光学天文技术研究室, 上海 200030;
2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要: 单层校正自适应光学系统只能在较小视场范围内对大气湍流进行有效校正, 多层共轭自适应光学技术可以突破这种限制。介绍了层向多层共轭自适应光学系统基本结构及工作原理, 研究了层向多层共轭自适应光学系统的模拟, 内容包括: 如何产生动态大气湍流波前数据、基于四棱锥波前传感器的波前复原算法、基于模式法的变形镜闭环校正控制过程等。对单层和两层的层向共轭自适应光学系统进行了模拟仿真, 仿真结果表明: 层向多层共轭自适应光学系统采用了更多的导星来校正两层大气湍流, 比单层校正自适应光学系统具有更大的校正视场和更好的校正效果。

关键词: 大气光学; 多层共轭自适应光学系统; 层向共轭; 四棱锥波前传感器; 导星
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0918005

Simulation of layer oriented multi-conjugate adaptive optics system

Yan Zhaojun¹, Yang Pengqian²

- (1. The Astronomical Optical Instrument Group, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The adaptive optics (AO) system in which one turbulence layer is corrected has a good compensation performance only over small field of view. The technology of multi-conjugate adaptive optics (MCAO) can overcome the limitation. The elementary structure and working principle of layer oriented multi-conjugate adaptive optics (LOMCAO) system was presented. Simulation method of LOMCAO system was investigated, including how to generate dynamic turbulence wavefront data, wavefront reconstruction algorithm of pyramid wavefront sensor and close-loop modal control procedure of deformable mirror. Simulations for single layer-conjugate and two layer-conjugate AO systems were carried out. The simulation results show that LOMCAO system has better correction performance over a larger field of view than single-conjugate AO system due to the fact that much more guide stars are used and two layer turbulence are compensated in LOMCAO system.

Key words: atmospheric optics; multi-conjugate adaptive optics system; layer oriented conjugate; pyramid wavefront sensor; guide star

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(11403079)

作者简介: 颜召军(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事自适应光学方面的研究。Email: zhaojunyan@shao.ac.cn

0 引言

自适应光学系统通常采用哈特曼或四棱锥波前传感器(Wavefront Sensor, WFS)实时测量由大气扰动、温度起伏等因素引起的动态畸变波前,采用倾斜镜和变形镜来实时校正动态畸变波前,从而有效减小大气湍流等的影响,使地基光学望远镜获得较高分辨率成像质量^[1]。除了在天文上的应用,自适应光学技术也应用于激光、人眼、通信等领域^[2-3]。现代大型光学望远镜一般都安装了单层校正的自适应光学(Single-Conjugate Adaptive Optics, SCAO)系统,但由于大气非等晕限制,望远镜只能在很小的视场范围内获得较好的成像质量^[4]。导致这一现象发生的原因是由于单层校正自适应光学系统通常只校正地面层的大气湍流,而大气湍流在不同高度都有分布。

为扩大自适应光学系统的校正视场范围,学者们提出了多层共轭自适应光学技术^[5]。多层共轭自适应光学系统采用多个波前探测器同时探测来自多颗导星方向的畸变波前,对波前进行重构后施加一定电压给变形镜驱动器以补偿校正其共轭高度的畸变波前。对多层共轭自适应光学系统的理论分析和仿真分析表明:对于 8 m 级光学望远镜,多层共轭自适应光学系统采用 2~3 个变形镜可在近红外波段的 1'~2' 视场范围内获得接近衍射极限分辨率的成像质量^[6]。

国外学者对多层共轭自适应光学技术进行了多年研究,已在实际系统上开展了实验验证,即将或已经开展了天文观测^[7-9]。目前我国尚无 4 m 以上口径光学望远镜,尚不具备对多层共轭自适应光学技术进行深入研究的实验条件。对多层共轭自适应光学系统进行模拟研究,设计相关仿真软件,将为该技术原理试验以及未来开展实际应用提供有益参考。

文中介绍了层向多层共轭自适应光学系统基本结构、工作原理以及模拟仿真方法。对一个两层校正的层向共轭自适应光学系统进行了数值仿真,并同传统单层校正自适应光学系统的闭环结果进行了对比分析。

1 层向多层共轭自适应光学系统

多层共轭自适应光学按照其探测和控制方式的

不同分为星向多层共轭自适应光学 (Star Oriented Multi-Conjugate Adaptive Optics, SOMCAO)和层向多层共轭自适应光学 (Layer Oriented Multi-Conjugate Adaptive Optics, LOMCAO)^[9]。星向多层共轭自适应光学系统结构简单,如图 1 所示。图 1 中,每个波前传感器探测一颗导星方向的湍流波前,基于这些波前对大气进行三维波前复原,进而控制变形镜校正不同高度的畸变波前。

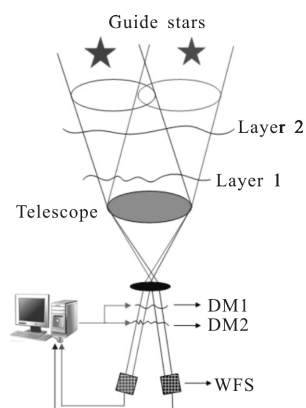


图 1 星向多层共轭自适应光学系统

Fig.1 Illustration of star oriented multi-conjugate adaptive optics system

星向多层共轭自适应光学系统通常采用哈特曼波前传感器,层向多层共轭自适应光学系统一般只采用四棱锥波前传感器 (Pyramid Wavefront Sensor, PWFS),这是由两种系统不同工作模式决定的。层向多层共轭自适应光学系统工作原理如图 2 所示。系统采用多个四棱锥传感器,改变 CCD 共轭位置就可以探测不同高度的畸变波前,变形镜和波前传感器的共轭高度需保持一致。星向多层共轭自适应光学系统测量的波前为导星传输路径上所有畸变像差的叠加;层向多层共轭自适应光学系统测量的波前为传感器共轭高度处的畸变波前,地面层的探测与校正、中高层的探测与校正是相互独立的。四棱锥波前传感器进行波前探测时,来自各个导星的光束最终会在 CCD 探测器上叠加,光能利用率高,可以提高波前探测信噪比。层向多层共轭自适应光学技术的另一个优点是:当两颗参考星的亮度差别较大时,光束的光学叠加相当于给亮度更强导星方向上的波前大的权重,减小较暗导星方向上的波前的权重,使校正效果在较大视场范围保持一致。

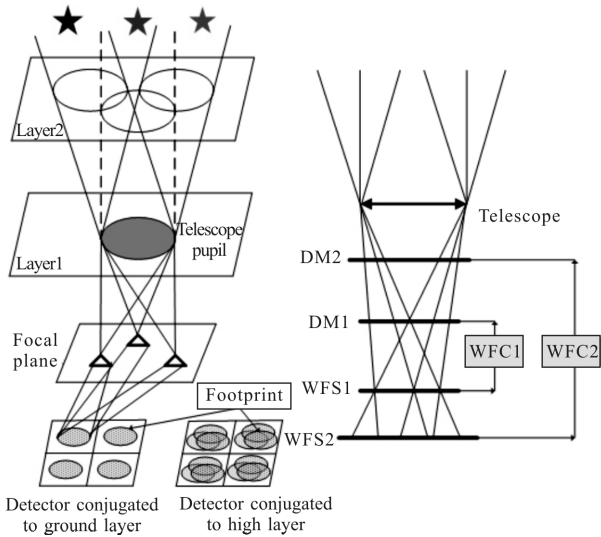


图 2 层向多层共轭自适应光学系统

Fig.2 Illustration of layer oriented multi-conjugate adaptive optics system

2 层向多层共轭自适应光学系统仿真

图 2 所示的层向多层共轭自适应光学系统中,四棱锥位于系统焦平面处,地面层的波前探测器(WFS1)对地面层的畸变波前进行探测,此时来自导星的光束经过波前探测成像系统后在光瞳像面上的“影迹”(Footprint)完全重合。WFS1 探测到的斜率信息经波前复原计算(WFC1)之后得到地面层的畸变波前,进而控制 DM1 对地面层的畸变波前进行闭环校正。中高层大气湍流波前的探测和校正原理同地面层类似,不同的是此时来自导星光束在光瞳像面上的 Footprints 只是部分重叠。下面介绍如何对层向多层共轭自适应光学系统各个部分进行模拟。

2.1 大气湍流相位屏的产生

使用傅里叶变换方法来产生满足 Kolmogorov 模型的大气湍流相位屏,同时加入低频次谐波信号。相位屏的功率谱密度满足 Kolmogorov 模型,其湍流功率谱密度为:

$$P_s(r_0, k) = 0.023r_0^{-5/3} k^{-11/3} \quad (1)$$

式中: r_0 为大气 Fried 参数; k 为空间频率。将相位屏波前数据做归一化处理,将归一化的波前乘以和望远镜口径有关的方差因子 $\sigma_\varphi^2 = 1.03(D/r_0)^{5/3}$ 后得到相位屏数据, D 为望远镜口径。

为了模拟动态大气湍流相位屏,首先利用傅里

叶变换法生成多个尺寸较大的湍流相位屏,截取相位屏中(一般从中心开始)与望远镜口径大小相等的区域内的数据作为望远镜当前接收到的扰动波前,然后拖动相位屏移动来模拟真实的风速,以实现动态大气湍流的模拟。模拟过程中需要设定基本的时间长度,即相位屏移动的时间间隔 Δt ,该参数决定了仿真过程中相位屏移动的最小时间步长,其他的时间参数,例如波前传感器积分时间、风速大小和变形镜响应延迟时间等必须是 Δt 的整数倍。在 $n\Delta t$ 时刻,第 i 层相位屏的移动距离为:

$$\Delta S_i = nV_{wind,i}\Delta t \quad (2)$$

式中: $V_{wind,i}$ 为第 i 层相位屏的风速大小; n 表示程序处于第 n 次迭代。由于 ΔS_i 常常不是整数,为了使模拟更精确,需将相位屏在 ΔS_i 处进行插值。同时为保证湍流相位屏的大气统计特性,插值时需要使用 $[\Delta S_i]$ ($[\]$ 表示取整) 处的波前数据,然后在 $\Delta S_i - [\Delta S_i]$ 处进行插值,插值后的数据当做 $n\Delta t$ 时刻的波前。

2.2 波前探测及仿真时序控制

在相位屏上定义一个二维平面的坐标系 Oxy ,坐标系的中心即为望远镜视场的中心,之后就可以定义各个导星在视场中的位置坐标。

对于闭环控制过程,第 i 个导星方向上的残余波前相位为(此时相位屏及导星影迹见图 3):

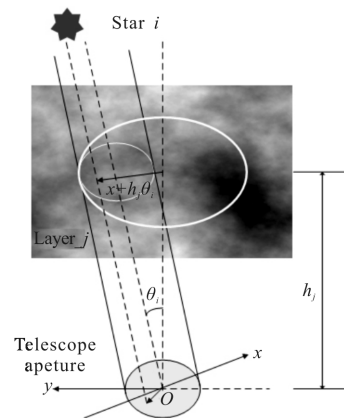


图 3 波前和导星影迹示意图

Fig.3 Illustration of layer wavefront and star footprint

$$W_{Fi}(x) = \sum_{j=1}^{N_{layer}} L_j(x+h_j\theta_i) - \sum_{k=1}^{N_{DM}} D_{Mk}(x+h_k\theta_i) \quad (3)$$

式中: N_{layer} 为相位屏的层数; N_{DM} 为变形镜个数; L_j 为第 j 层的相位屏波前; D_{Mk} 为第 k 个变形镜面型; x 为望远镜光瞳面上的位置向量; θ_i 描述了第 i 个导星的

空间位置; h_j 为第 j 层相位屏高度; h_k 为第 k 个变形镜共轭高度, 该共轭高度处的波前相位为:

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{star}}} W_{\text{Fi}}(x_i, y_i) I_{\text{NTi}}}{\sum_{j=1}^{N_{\text{star}}} I_{\text{NTj}}} \quad (4)$$

式中: N_{star} 为导星数目; W_{Fi} 为第 i 颗导星方向上叠加的波前相位; I_{NTi} 为来自第 i 颗导星光束的光强。

2.3 四棱锥传感器波前探测

PWFS 是一种新型波前传感器, 最早由 Ragazzoni 发明。早期 PWFS 需要引入调制信号才能正常工作, 后来的研究表明其在无调制条件下也可以很好的工作^[10-11]。自此 PWFS 技术在多层共轭自适应光学系统中得到了快速的发展和应

用。无调制 PWFS 的工作原理及典型光路如图 4 所示。四棱锥位于透镜 L_1 (焦距为 f_1) 的焦点, 入射波前(通光口径为 D)经透镜 L_1 后聚焦在四棱锥塔顶后被分成了四束, 然后经过透镜 L_2 (焦距为 f_2), 最终在位于透镜 L_2 的焦平面位置处的 CCD 上形成四个光瞳像, 光瞳像光强分别为 I_1, I_2, I_3, I_4 。

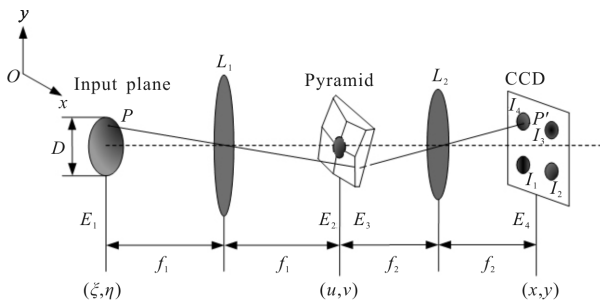


图 4 无调制 PWFS 光路图

Fig.4 Configuration of optical path of PWFS without modulation

入射光瞳处的光场函数为:

$$E_1(\xi, \eta) = u_0 \exp[i\varphi(\xi, \eta)] P_u(\xi, \eta) \quad (5)$$

式中: u_0 为入射光场振幅; $\varphi(\xi, \eta)$ 为入射波前相位; (ξ, η) 为入射光瞳面空间坐标; $P_u(\xi, \eta)$ 为光瞳函数。光场 $E_1(\xi, \eta)$ 传播到透镜 L_1 的焦平面处的光场函数为:

$$E_2(u, v) = \frac{1}{\lambda f_1} \text{FT}[E_1(\xi, \eta)] \left(\frac{u}{\lambda f_1}, \frac{v}{\lambda f_1} \right) \quad (6)$$

式中: (u, v) 为 E_2 处的空间频率坐标; λ 为波长; FT 表示二维傅里叶变换。四棱锥的作用等效于改变了波前的相位或振幅, 一般用振幅掩膜模型^[12]和相位掩膜模型

来描述这种作用^[13]。这里采用相位掩膜模型对 PWFS 进行仿真, 对入射波前相位的改变可表示为:

$$\Phi_p = \exp[-i2\pi\alpha_0(|u|+|v|)] \quad (7)$$

则入射波前经过 PWFS 之后的光场为:

$$E_3(u, v) = E_2(u, v) \Phi_p \quad (8)$$

入射波前到达 CCD 位置时的光场为:

$$E_4(x, y) = \frac{1}{\lambda f_2} \text{FT}[E_3(u, v)] \left(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2} \right) \quad (9)$$

式中: (x, y) 为 CCD 位置定义的空间坐标。将 $E_4(x, y)$ 取模的平方得到光瞳像光强分布, 入射波前 x 方向、 y 方向的斜率分别为^[14]:

$$S_x(x, y) = \frac{[I_1(x, y) + I_4(x, y)] - [I_2(x, y) + I_3(x, y)]}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)} \quad (10)$$

$$S_y(x, y) = \frac{[I_3(x, y) + I_4(x, y)] - [I_1(x, y) + I_2(x, y)]}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)} \quad (11)$$

2.4 基于模式法的响应矩阵计算方法

基于模式法的校正过程可描述为: 假定波前探测到的斜率矩阵为 M_l , 在第 l 次迭代循环时变形镜的校正系数 c_l 为:

$$c_l = I^+ M_l \quad (12)$$

式中: I^+ 为复原矩阵, 是响应矩阵 I 的逆矩阵。为使闭环校正过程更加稳定, 对变形镜的校正系数乘以增益系数 g_l , 此时变形镜的模式系数为:

$$a_{n+1, l} = a_{n, l} + g_l c_{n+1, l} \quad (13)$$

式中: 下标 $n, n+1$ 分别表示同一循环的两个相邻步骤。

模式法校正时响应矩阵的计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} S_{1x}(Z_1) & \cdots & S_{1x}(Z_p) \\ S_{1y}(Z_1) & \cdots & S_{1y}(Z_p) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{Nx}(Z_1) & \cdots & S_{Nx}(Z_p) \\ S_{Ny}(Z_1) & \cdots & S_{Ny}(Z_p) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} I_{1x}(Z_1) & \cdots & I_{1x}(Z_p) \\ I_{1y}(Z_1) & \cdots & I_{1y}(Z_p) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ I_{Nx}(Z_1) & \cdots & I_{Nx}(Z_p) \\ I_{Ny}(Z_1) & \cdots & I_{Ny}(Z_p) \end{bmatrix}}_I \cdot \begin{bmatrix} a & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & a \end{bmatrix}_{p \times p} \quad (14)$$

式中: Z_i 表示模式校正时选取的第 i 个模式, 这里采用泽尼克模式^[15]。 $S_{ix}(Z_j)$ 和 $S_{iy}(Z_j)$ 分别表示变形镜上产生第 i 个模式时, 波前传感器上第 i 个子孔径 x 方

向和 y 方向的波前斜率。假设变形镜可以产生模式的阶数为 p 。让变形镜依次产生均方根为 a 的各阶模式,记录各个子孔径上的波前斜率数据,得到公式(14),然后对其进行奇异值分解等运算后得到复原矩阵 I^* 。

复原矩阵与导星位置有关,当导星位置改变时需重新计算复原矩阵。对于没有被导星“照亮”的子孔径,在计算响应矩阵时将该子孔径的斜率数据设为 0。

模拟过程中还需要对波前探测增加噪声,包括探测器读出噪声、暗噪声以及天空背景噪声^[16]。

3 模拟仿真结果

3.1 主要仿真参数

采用 7 层大气湍流相位屏来模拟真实大气,相位屏高度分别为 0、2、3、6、7、12、16 km;各层的 D/r_0 分别为 7.5、2.3、2.4、1.1、1.1、2.2、0.8;各层风速分别为 6、12、8、33、23、22、8 m/s。望远镜口径为 8 m,视场为 120",两个变形镜的共轭高度分别为 0 和 8 km,闭环控制增益系数分别为 0.5 和 0.4,校正阶数分别为 59 和 49,响应延迟均为 2 ms。波前探测器探测的中心波长为 700 nm,带宽为 400 nm,读出噪声方差为 $3 e^{-\text{pixel}^{-1}\text{frame}^{-1}}$,量子效率为 0.2,暗噪声为 $500 e^{-\text{pixel}^{-1}\text{s}^{-1}}$,积分时间分别为 4 ms 和 3 ms。天空背景亮度等效为 20 星等。假设视场范围内均匀分布了 49 颗虚拟的自然星(星等为 9),利用这些虚拟的自然星计算这些位置的斯特列尔比,然后对其进行数值插值得到全视场范围内的斯特列尔比。

3.2 闭环校正结果

对 LOMCAO 系统进行模拟时,视场范围内有 8 颗自然导星,星等分别为 18.77、15.58、9、16.77、16.01、17.38、18.16、17.82,它们在视场中的分布如图 5 所示。对 SCAO 系统进行模拟时,只有视场中心一颗导星,星等为 9。

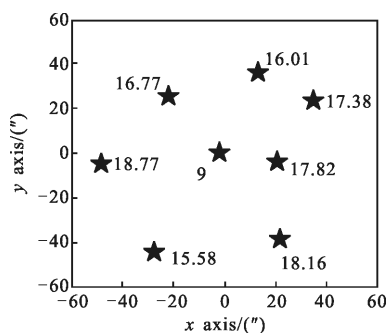


图 5 导星在视场中的分布图

Fig.5 Configuration of stars over the field of view

图 6(a)为 LOMCAO 系统采用两个变形镜对畸变波前进行校正后得到的 Strehl Ratio 分布图(曝光时间为 0.5 s),其最大值为 0.31,平均值为 0.06。图中等高线的数值表示了该位置 Strehl Ratio 的数值。图 6(b)为 SCAO 系统采用一颗导星和一个变形镜对畸变波前进行校正后的 Strehl Ratio 分布图(曝光时间为 0.5 s),其最大值为 0.19,平均值为 0.04。仿真对比结果表明:多层共轭自适应光学系统比单层共轭自适应光学系统的校正效果好,校正视场更大。除视场中心的导星外,其余的导星亮度都非常暗,仿真的对比结果也验证了四棱锥波前传感器具有光能利用率高的优点。

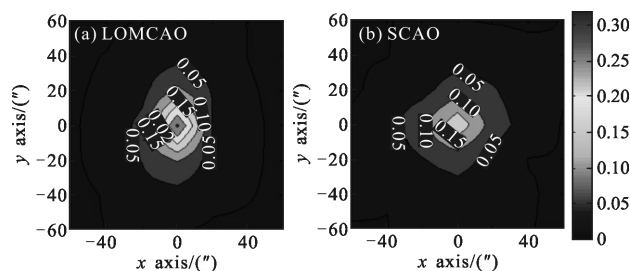


图 6 全视场 Strehl Ratio 图

Fig.6 Strehl Ratio map over the field of view

4 结论

首先介绍了层向多层共轭自适应光学系统工作原理,而后详细介绍了如何对一个两层校正的层向共轭自适应光学系统进行模拟仿真。层向多层共轭自适应光学系统的模拟包括如下几个部分:产生动态的大气湍流相位屏、利用四棱锥波前传感器进行波前探测、基于模式法的变形镜闭环校正控制、性能指标的计算等。对单层和两层的层向共轭自适应光学系统进行了仿真,仿真对比结果表明:在相同条件下,与采用单颗导星、单层校正的自适应光学系统相比,采用多颗导星、两层校正的多层共轭自适应光学系统具有更大的校正视场和更好的校正效果。对多层共轭自适应光学系统的模拟方法研究为以后开展多层共轭自适应光学技术研究提供了有益的参考和帮助。

参考文献:

[1] Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, et al. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics,

- Chinese Academy of Sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 72–80. (in Chinese)
- 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 72–80.
- [2] Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Technical research of adaptive fiber coupler array based on SPGD algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (7): 2157–2161. (in Chinese)
- 李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于 SPGD 算法的自适应光纤耦合器阵列技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2157–2161.
- [3] Liu Ruixue, Zheng Xianliang, Xia Mingliang, et al. Accurate fixation of adaptive optics fundus imaging field of view based on visual target guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1794–1799. (in Chinese)
- 刘瑞雪, 郑贤良, 夏明亮, 等. 视标引导的自适应光学眼底成像视场精确定位 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1794–1799.
- [4] Chen Jingyuan, Zhou Yu, Chang Xiang, et al. Unified method for anisoplanatism of adaptive optical systems [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 234–243. (in Chinese)
- 陈京元, 周钰, 常翔, 等. 研究自适应光学非等晕性的统一方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 234–243.
- [5] Ellerbroek B. First order performance evaluation of adaptive optics system for atmospheric turbulence compensation in extended field of view astronomical telescope [J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11(2): 783–805.
- [6] Rigaut F J, Ellerbroek B L, Flicker R W, et al. Adaptive optical systems technology[C]//SPIE, 2000, 4007: 1022–1031.
- [7] Hill J M. The large binocular telescope [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(16): 115–122.
- [8] Simone Esposito, Armando Riccardi, Luca Fini, et al. First light AO (FLAO) system for LBT: final integration, acceptance test in Europe and preliminary on-sky commissioning results [C]//SPIE, 2010, 7736: 9–12.
- [9] Goncharov A V, Dainty J C, Esposito S, et al. Laboratory MCAO test-bed for developing wavefront sensing concepts [J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5580–5590.
- [10] Ragazzoni R. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(2): 289–293.
- [11] Ragazzoni R, Diolaiti E, Vernet E. A pyramid wavefront sensor with no dynamic modulation [J]. *Optics Communications*, 2002, 208(1): 51–60.
- [12] Simone Esposito, Armando Riccardi. Pyramid Wavefront Sensor behavior in partial correction adaptive optics systems [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, 369: 9–12.
- [13] Carillet M, Vérinaud C, Femenía B, et al. Modeling astronomical adaptive optics [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 356(4): 1236–1275.
- [14] Shatokhina I, Obereder A, Rosensteiner M, et al. Preprocessed cumulative reconstructor with domain decomposition: a fast wavefront reconstruction method for pyramid wavefront sensor[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2640–2652.
- [15] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 1976, 66(3): 207–211.
- [16] Arcidiacono C, Diolaiti E, Tordi M, et al. Layer-oriented simulation tool [J]. *Applied Optics*, 2004, 43 (22): 4288–4302.