

文章编号 2095-1531(2022)03-0545-07

# 基于焦面复制方法的自适应光学系统 静态像差校正技术

张天宇<sup>1,2,3</sup>, 王 钢<sup>1,2\*</sup>, 张 熙<sup>1,2</sup>, 窦江培<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 南京 210042;
2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室 (南京天文光学技术研究所), 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**限制自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统表现的一个关键因素是由波前传感器所在路径和科学成像路径之间差异引起的非共光路像差(Non-Common Path Aberration, NCPA), 同时 AO 系统共光路部分也会不可避免地引入静态像差。为此, 本文提出了一种基于焦面点扩散函数(Point Spread Function, PSF)复制的技术, 用于校正 AO 系统中的静态像差。此技术利用点光源产生的 PSF 图像作为参考图像, 通过迭代优化算法控制可变形镜改变其面型, 将参考 PSF 图像复制到 AO 系统科学成像路径。实验结果表明, 校正后的斯特列尔比(Strehl Ratio, SR)从初始的 0.312 提高到 0.995。此技术可以稳定、快速地获得全局校正结果, 特别是在系统具有较大的初始静态像差时。

**关键词:**自适应光学; 像差校正; 高对比度成像

中图分类号: P111.3; TP391.8

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0182

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2021-11-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 11827804, No. U2031210, No. 11673042); 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究经费(No. CMS-CSST-2021-A11); 中科院对外合作重点项目(No. 114A32KYSB20160057); 中科院战略性先导科技专项 A 类资助(No. XDA15010300)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11827804, No. U2031210, No. 11673042); Special Scientific Research Funds for China's Manned Space Project Sky Survey Space Telescope (No. CMS-CSST-2021-A11); Key foreign cooperation projects, the Chinese Academy of Sciences (No. 114A32KYSB20160057); The Strategic Priority Research Program (category A) of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA15010300)

# Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach

ZHANG Tian-yu<sup>1,2,3</sup>, WANG Gang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xi<sup>1,2</sup>, DOU Jiang-pei<sup>1,2</sup>

(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: gwang@niaot.ac.cn

**Abstract:** A key factor limiting the performance of Adaptive Optics (AO) systems is the Non-Common Path Aberration (NCPA) caused by the difference between the wavefront sensor path and the science imaging path. Meanwhile, a static aberration will inevitably be introduced in the common path of the AO system. This paper proposes a correction technology based on a copy of the focal-plane Point Spread Function (PSF) to correct static aberration in the scientific imaging path of AO systems. This technology uses the PSF generated by the laser point light source as the reference PSF, and copies that to the science imaging path of the AO system through iterative optimization algorithms. Experimental results show that the Strehl Ratio (SR) increases from the initial 0.312 to 0.995 after correction. This technology can still stably and quickly obtain global optimization results, especially when the initial static aberration of the system is large.

**Key words:** adaptive optics; aberration correction; high-contrast imaging

## 1 引言

随着科学技术的发展,自适应光学已经被广泛应用于生物、医学、通信和天文等领域。在天文领域,自适应光学系统通常用于校正大气湍流引入的波前畸变,获得接近衍射极限的成像<sup>[1-9]</sup>。

1994年,Angel<sup>[10]</sup>首次提出利用自适应光学技术对系外行星进行直接成像,同时提出了超级自适应光学(Extreme Adaptive Optics, ExAO)的概念。由于系外行星与主星的对比度相差悬殊,其对比度通常在 $10^{-6}$ ~ $10^{-10}$ 量级,且行星与恒星的角距离通常为几个~十几个 $\lambda/D$ 。为了提高成像对比度,ExAO被应用于在小视场内获得高质量,其校正后的斯特列尔比通常优于0.9,甚至更高;同时可以配合星冕仪进一步抑制望远镜孔径衍射引入的散斑噪声,进而极大地提高成像对比度<sup>[11-12]</sup>。

自适应光学系统由共光路的像差校正子系统,非共光路的波前检测子系统和成像子系统构

成。研究表明波前检测子系统与成像子系统之间的相对差异会引起非共光路像差(NCPA)。由于波前检测子系统无法检测到成像子系统内的静态像差,AO系统在闭环校正过程中也无法测量和补偿该像差。此外,共光路部分也存在静态像差,该像差主要由可变形镜的面型引起。上述静态像差的存在使得AO系统的成像质量显著下降<sup>[13]</sup>,必须要在自适应光学系统闭环校正之前预先校正<sup>[14-15]</sup>。

2012年,Ren和Dong等首次将随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)算法应用到AO系统静态像差校正中,并提出一种基于焦面能量优化方法的静态像差校正技术<sup>[16]</sup>。通过控制可变形镜,改变其面型,将科学成像路径的焦面能量集中到艾里斑内以获得高SR。然而根据过去的经验,焦面能量优化方法在系统初始像差较大的情况下容易陷入局部极值,难以获得全局最优的校正结果。

接着,Ren和Zhang等提出一种基于瞳面的

静态像差校正方法<sup>[17]</sup>。该方法使用一个参考点光源经准直后产生的平面波作为参考波前, 并使用夏克哈特曼波前传感器(SH-WFS)记录参考波前, 之后通过迭代优化算法将参考波前复制到 AO 系统。参考波前为整个校正提供了优化方向, 因此该方法可以快速校正系统的静态像差, 并且容易获得全局最优解。然而该方法在校正过程中需要使用一台额外的波前传感器和激光光源且实验流程相对复杂。

基于上述问题, 本文提出一种基于焦面复制方法的 AO 系统静态像差校正技术。该技术利用点光源产生的完美 PSF 作为参考图像, 使用迭代优化算法直接将参考 PSF 图像复制到系统成像路径来校正系统内的静态像差。与瞳面校正方法复制波前相比, 该方法直接复制系统焦面 PSF 图像, 优化速度更快, 而且更加容易获得全局最优解。

## 2 校正原理

### 2.1 校正系统

图 1 为校正系统原理图。激光器发出的光被透镜 L1 准直后, 经过摆镜(TTM)和可变形镜(DM)反射, 由分束镜(BS)将光束分别投射到波前传感器路径和科学相机成像路径中。波前传感器路径由透镜 L2、L3、微透镜阵列 MLA 和波前检测相机构成; 科学成像路径的光束经过成像透镜 L4 后直接成像在科学成像相机上(位置 1)。在静态像差校正时, 将科学相机移走, 光经过透镜 L5 再次成像到静态像差校正相机(位置 2)。

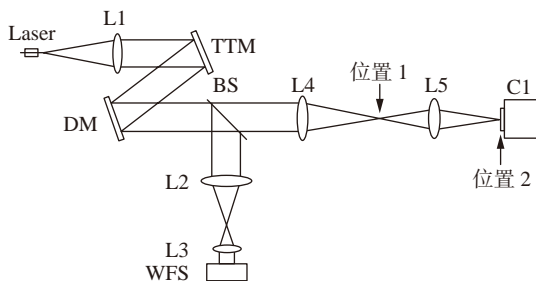


图 1 校正系统原理图

Fig. 1 Block diagram of the correction system

实验步骤如下:

(1) 在成像透镜 L4 焦点位置上放置一个点光源作为参考光源, 该光源经过透镜 L5 成像在静态像差校正相机 C1 上, 该图像将作为参考

PSF(该过程只需要执行一次, 后续可以直接调用该图像);

(2) 移出参考光源, 执行静态像差校正。

校正完成后, 将科学相机 C1 重新安装在位置 1 即可开展科学观测。

### 2.2 校正算法

本文采用随机并行梯度下降算法校正 AO 系统的静态像差。SPGD<sup>[18-20]</sup>最早由 Vorontsov 提出, 并一直被用于自适应光学校正, 它基于传统的梯度下降算法的改进, 通过对每个控制变量(DM 促动器电压值)同时施加微小的随机扰动量, 随后计算评价函数(Metric Function)的变化, 并以此寻找梯度下降最快的方向进行下一次迭代, 直到评价函数收敛于期望值。在每一次迭代优化过程中, 施加的微小的随机扰动量会重新生成, 用以产生多种梯度方向, 供算法评估, 进而保证评价函数收敛。SPGD 算法中每次迭代的控制变量迭代公式:

$$u^{k+1} = u^k - \gamma \delta J^k \delta u^k, \quad (1)$$

其中,  $k$  为迭代次数; DM 促动器的控制电压可以表示为:  $u = u_1, u_2, \dots, u_n$ ,  $n$  为优化变量的个数(DM 的促动器数量, 本文实验中为 97 个);  $\gamma$  为增益系数, 当评价函数向极小值方向优化时,  $\gamma$  为正值, 反之,  $\gamma$  为负值;  $\delta u$  为施加的随机扰动且服从伯努利分布; 评价函数变化值为  $\delta J$ :

$$\delta J = J(u + \delta u) - J(u) \quad (2)$$

通常使用双边扰动以提高评价函数变化值的计算精度。

$$\delta J = J_+ - J_- = J(u + \delta u/2) - J(u - \delta u/2) \quad (3)$$

为了实现焦面 PSF 图像的复制, 本文提出了一种专门用于优化焦面复制方法的系统评价函数。该评价函数用于将参考 PSF 图像复制到 AO 系统焦面, 进而实现系统内静态像差的校正。假设 PSF 图像大小为  $m \times n$  个像素,  $i(x, y)$  表示 AO 系统焦面图像每一点像素强度,  $i_{\max}, i_{\min}$  分别表示系统图像上像素强的最大和最小值。  $i_{\text{ref}}(x, y)$  表示参考图像每点像素值,  $i_{\text{refmax}}, i_{\text{refmin}}$  分别表示参考图像上像素的最大和最小值。在使用公式(4)和(5)对图像归一化后, 系统评价函数可以表示为,

$$I(x, y) = \frac{i(x, y) - i_{\min}}{i_{\max}}, \quad (4)$$

$$I_{\text{ref}}(x, y) = \frac{i_{\text{ref}}(x, y) - i_{\text{refmin}}}{i_{\text{refmax}}}, \quad (5)$$

$$J = \left\{ \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n |I(x, y) - I_{\text{ref}}(x, y)| \right\} \times \phi, \quad (6)$$

其中,  $\phi$  为影响系数, 取值范围为 (0.000 1, 1), 用于保证评价函数的动态范围和收敛。由公式 (6) 可知, 理论上当评价函数的值为 0 时, 参考图像被完全复制到 AO 系统成像路径。但实际校正过程中, 由于相机噪声和外部环境的影响, 系统评价函数  $J$  无法被优化到 0。通常情况下, 当评价函数  $J$  收敛到 0.45~0.55 内时, 影响系数  $\phi$  的数量级为 0.001~0.01, 优化区域内归一化后各像素点的差值  $|I(x, y) - I_{\text{ref}}(x, y)|$  的平均值为 0.007~0.015, 反向归一化后可得实际各个像素点的差值的平均值在 500~1 000 ( $i_{\max} = i_{\text{refmax}}, i_{\min} = i_{\text{refmin}}$ )。考虑到相机噪声和外部环境的影响, 此种差值情况下, 两张 PSF 图像此时可以视作基本一致。

此时波前检测相机将记录优化后的 DM 电压对应的波前, 用于后续的 AO 系统闭环校正。

### 3 实验研究

实验系统的光源采用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器。可变形镜采用 ALAPO 公司生产的 97 单元连续镜面的可变形镜 (DM), 促动器排列 11×11。图 2(a) 为拍摄的系统初始焦面 PSF 图像, 从图中可知系统焦面存在较大初始静态像差。图 2(b) 为校正后的焦面 PSF 图像, 从图中可以看出, 校正后系统内的静态像差被有效校正, 校正后的系统焦面 PSF 图像和参考 PSF 图像基

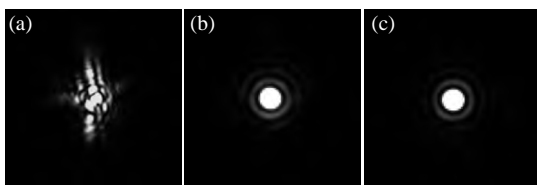


图 2 焦面 PSF 图像。(a) 初始图像; (b) 校正后图像; (c) 参考图像

Fig. 2 The focal-plane PSF image. (a) Initial image; (b) corrected image; (c) reference image

本相同。图 2(c) 为拍摄的参考 PSF 图像 (参考 PSF 提前拍摄并保存, 校正过程只需要读取图像即可)。按照远场定义公式计算并使用参考图像作为标准图像。在使用焦面复制技术校正后, SR 从初始的 0.312 提升到 0.995。

图 3 为评价函数曲线, 在校正约 15 000 步后, 系统评价函数从初始的 2.1 下降到 0.49, 继续优化评价函数不会再下降。实验结果表明基于焦面复制方法的 SPGD 校正技术能有效校正 AO 系统的静态像差。

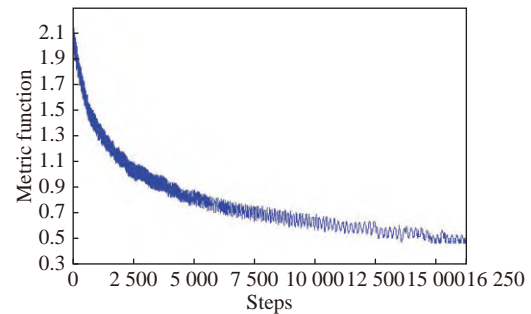


图 3 评价函数曲线

Fig. 3 Metric function curve

为了进一步定量分析校正效果, 本实验使用 Thorlabs 公司生产的 WFS-150-5C 波前传感器, 分别测量了校正前后的 RMS。测试结果表明在校正后 AO 系统的 RMS 波前误差从初始的 110 nm 下降到 7 nm。表 1 为校正前后各项 Zernike 多项式系数 (使用 Zernike 多项式前 15 项进行波前重

表 1 校正前后系统各项 Zernike 系数

Tab. 1 Zernike coefficients of the system before and after correction

Zernike 多项式系数	校正前	校正后
Astigmatism y	-0.029	0.001
Astigmatism x	0.127	-0.003
Trefoil y	0.013	0.000
Coma x	-0.038	-0.002
Coma y	-0.035	0.001
Trefoil x	0.028	-0.004
Tetrafoil y	0.009	-0.000
Secondary Astigmatism y	-0.040	-0.000
Primary Spherical	-0.061	0.003
Secondary Astigmatism x	0.035	0.000
Tetrafoil x	0.111	-0.002

构, 其中不包括平移、 $X$ 轴倾斜、 $Y$ 轴倾斜和离焦)。从表 1 可知, 校正后, Zernike 多项式各项系数明显减小, 这也证明了本文校正技术可以有效校正 AO 系统成像路径的静态像差。图 4(彩图见期刊电子版)为校正后的 AO 系统的波面。

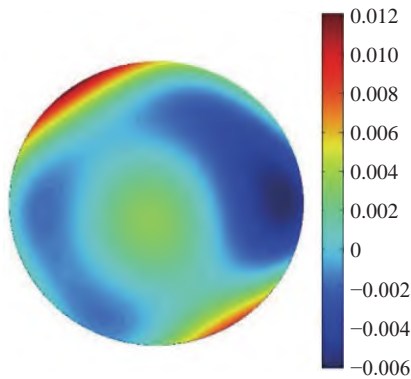


图 4 校正后波前图

Fig. 4 The corrected wavefront map

#### 4 对比实验与分析

为了说明本文提出的焦面复制技术优于先前提出的焦面能量优化方法和瞳面校正法。本节将在相同的实验环境下分别比较 3 种方法的校正效果。图 5(彩图见期刊电子版)为使用焦面能量优化方法校正后的焦面 PSF 图像和波前图。在初始静态像差较大的情况下, 采用焦面能量优化方法校正后的, SR 从初始的 0.312 提高到 0.739。RMS 从初始的 110 nm 下降到 55 nm。整个校正过程需要迭代约 70 000 步。图 6 为瞳面方法校正后 PSF 图像和波前图, 使用瞳面方法校正后的 SR 提高到 0.988, 波前 RMS 下降到 11 nm, 整个校正过程需要迭代约 40 000 步。表 2 为 3 种方法校正后各项 Zernike 多项式系数对比。

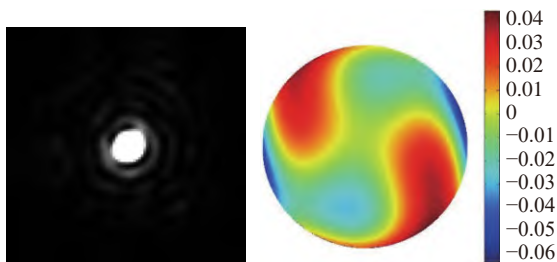


图 5 焦面能量优化方法校正后焦面 PSF 图像和波前图

Fig. 5 PSF corrected by the focal plane energy optimization method and the corresponding corrected wavefront map

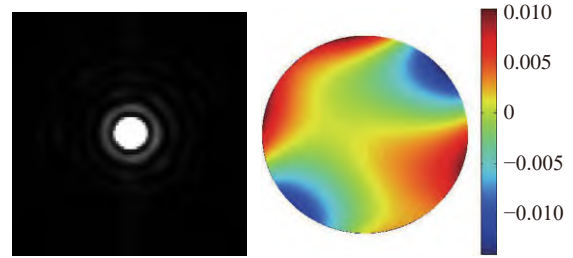


图 6 瞳面方法校正后 PSF 图像和波前图

Fig. 6 PSF corrected by the pupil plane approach and the corresponding corrected wavefront map

表 2 3 种方法校正后 Zernike 系数

Tab. 2 Zernike coefficients corrected by 3 kinds of methods

Zernike 多项式系数	焦面能量优化法	瞳面校正法	焦面复制技术
Astigmatism $y$	0.039	0.009	0.001
Astigmatism $x$	0.003	0.002	-0.003
Trefoil $y$	0.001	0.002	0.000
Coma $x$	0.007	-0.002	-0.002
Coma $y$	-0.008	-0.001	0.001
Trefoil $x$	0.006	0.000	-0.004
Tetrafoil $y$	0.005	0.001	-0.000
Secondary Astigmatism $y$	-0.004	0.000	-0.000
Primary Spherical	-0.004	0.001	0.003
Secondary Astigmatism $x$	-0.034	-0.001	0.000
Tetrafoil $x$	-0.013	0.005	-0.002

从校正结果(SR)可以看出, 本文提出的焦面复制技术与焦面能量优化方法相比, SR 提高了 34.6%。而与瞳面校正法校正结果几乎相同。从校正时间上来分析, 本文提出的焦面复制技术比瞳面校正法快了 2.67 倍。此外本文提出的焦面复制技术只需要在 AO 系统后额外增加一块透镜就可以实现静态像差的校正, 易于实现且不会在 AO 系统中引入额外的像差。

#### 5 结 论

本文提出了一种基于焦面复制的 AO 系统静态像差校正技术。采用参考光源产生的高质量 PSF 图像作为参考图像, 通过迭代优化算法控制可变形镜将参考 PSF 图像复制到 AO 系统成像路径。实验结果表明校正后 AO 系统的 SR 从初始的 0.312 提升到 0.995。本文还分别

在相同的实验条件下,对 3 种方法进行比较。测试结果表明:本文提出的基于焦面复制的静态像差校正技术在获得相同校正结果的情况下,校正速度明显优于其他方法,而且该技术器件简单易于实现。该校正结果不仅远远满足传统的自适应光学系统对成像质量的需求,还满

足 ExAO 系统对像质的需求。但是本文方法如应用于配备几百甚至上千单元可变形镜的自适应光学系统,校正速度会有所下降。下一步准备在本文研究成果基础上,提升校正速度,并应用于项目组研制的系外行星高对比度成像星冕仪系统中。

#### 参考文献:

- [1] ZHU Y T, DOU J P, ZHANG X, *et al.*. Portable adaptive optics for exoplanet imaging[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(4): 082.
- [2] KHORRAMI Z, LANGLOIS M, VAKILI F, *et al.*. Extreme adaptive optics astrometry of R136[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 649: L8.
- [3] SAHU P, MAZUMDER N. Improving the way we see: adaptive optics based optical microscopy for deep-tissue imaging[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 654868.
- [4] 郑贤良,刘瑞雪,夏明亮,等.液晶自适应光学视网膜校正成像技术研究[J].中国光学,2014,7(1):98-104.  
ZHENG X L, LIU R X, XIA M L, *et al.*. Retinal correction imaging system based on liquid crystal adaptive optics[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 98-104. (in Chinese)
- [5] CHEN Y W, HE Y, WANG J, *et al.*. Automated cone cell identification on adaptive optics scanning laser ophthalmoscope images based on TV-L1 optical flow registration and K-means clustering[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2259.
- [6] 刘立新,张美玲,吴兆青,等.自适应光学在荧光显微镜中的应用[J].激光与光电子学进展,2020,57(12):120001.  
LIU L X, ZHANG M L, WU ZH Q, *et al.*. Application of adaptive optics in fluorescence microscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 120001. (in Chinese)
- [7] MILLER D T, KUROKAWA K. Cellular-scale imaging of transparent retinal structures and processes using adaptive optics optical coherence tomography[J]. *Annual Review of Vision Science*, 2020, 6: 115-148.
- [8] 朱沁雨,韩国庆,彭建涛,等.双波长视网膜成像自适应光学系统的轴向色差补偿方法[J].中国光学,2022,15(1):79-89.  
ZHU Q Y, HAN G Q, PENG J T, *et al.*. Longitudinal chromatic aberration compensation method for dual-wavelength retinal imaging adaptive optics systems[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 79-89. (in Chinese)
- [9] 潘国涛,闫钰锋,于信,等.矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计[J].中国光学,2022,15(2):306-317.  
PAN G T, YAN Y F, YU X, *et al.*. Design of optical system for quality evaluation of large rectangular aperture laser beam[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 306-317. (in Chinese)
- [10] ANGEL J R P. Ground-based imaging of extrasolar planets using adaptive optics[J]. *Nature*, 1994, 368(6468): 203-207.
- [11] FUSCO T, SAUVAGE J F, PETIT C, *et al.*. Final performance and lesson-learned of SAXO, the VLT-SPHERE extreme AO: from early design to on-sky results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9148: 91481U.
- [12] POYNEER L A, PALMER D W, MACINTOSH B, *et al.*. Performance of the Gemini Planet Imager's adaptive optics system[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 323-340.
- [13] HIPPLER S. Adaptive optics for extremely large telescopes[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2019, 8(2): 1950001.
- [14] BAUDOZ P, MAS M, GALICHER R, *et al.*. Focal plane wavefront sensor sensitivity for ELT planet finder[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7736: 77365S.
- [15] 王亮,陈涛,刘欣悦,等.适用于波前处理器的自适应光学系统非共光路像差补偿方法[J].光子学报,2015,44(5):0511001.  
WANG L, CHEN T, LIU X Y, *et al.*. Compensation of the non-common path aberrations in an adaptive optics system with a wavefront processor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(5): 0511001. (in Chinese)
- [16] REN D Q, DONG B, ZHU Y T, *et al.*. Correction of non-common-path error for extreme adaptive optics[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, 124(913): 247-253.

- [17] REN D Q, ZHANG T Y, WANG G. A low-cost and high-performance technique for adaptive optics static wavefront correction[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(7): 181.
- [18] VORONTSOV M A, CARHART G W, RICKLIN J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 907-909.
- [19] VORONTSOV M A, SIVOKON V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(10): 2745-2758.
- [20] VORONTSOV M A, YU M. Compensation of distant phase-distorting layers. II. Extended-field-of-view adaptive receiver system[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(9): 1659-1668.

#### 作者简介:



张天宇(1992—), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 2019年于桂林电子科技大学获得硕士学位, 主要从事自适应光学自动控制方面的研究。

E-mail: tyzhang2019@niaot.ac.cn



王 钢(1988—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 2020年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事太阳自适应光学并行优化算法及变形镜静态误差校正的研究。E-mail: gwang@niaot.ac.cn



张 熙(1984—), 江苏南京人, 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2013年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事自适应光学和空间高对比度成像的研究。E-mail: xzhang@niaot.ac.cn



窦江培(1981—), 男, 河北衡水人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2009年于中国科学院研究生院获得天体物理学博士学位, 主要从事太阳系外行星天文高对比度直接成像技术与实测研究。E-mail: jpdou@niaot.ac.cn