

兴隆2.16 m望远镜自适应光学系统

李常伟, 李邦明, 陆彦婷, 陆启帅, 郑兆璞, 王地 and 李顺

Citation: 中国科学: 物理学 力学 天文学 **47**, 084206 (2017); doi: 10.1360/SSPMA2016-00486

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSPMA2016-00486>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/47/8>

Published by the 《中国科学》杂志社

Articles you may be interested in

[我国口径最大的天文光学望远镜——2.16m反射望远镜](#)

科学通报 **35**, 641 (1990);

[\$\delta\$ Scuti型星——V650Tau的多重脉动](#)

科学通报 **38**, 1202 (1993);

[中国2.16m望远镜的主光路系统](#)

中国科学A辑: 数学 物理学 天文学 技术科学 **19**, 1187 (1989);

[一个可能从NGC4579喷射出来的类星体](#)

科学通报 **45**, 29 (2000);

[两颗太阳孪生星的光谱分析与太阳颜色的确定](#)

中国科学G辑: 物理学 力学 天文学 **39**, 1161 (2009);



兴隆2.16 m望远镜自适应光学系统

李常伟^{1,2*}, 李邦明^{1,2}, 陆彦婷^{1,2}, 陆启帅^{1,2}, 郑兆璞^{1,2}, 王地^{1,2}, 李顺^{1,2}

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 210042

* 联系人, E-mail: cwli@niaot.ac.cn

收稿日期: 2016-11-21; 接受日期: 2017-01-04; 网络出版日期: 2017-03-17

中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项和国家自然科学基金(编号: 11373048, 11573047, 11203052, 11403066)资助项目

摘要 自适应光学系统是大口径天文望远镜克服大气湍流, 提高望远镜成像质量的必备手段之一. 本文针对兴隆2.16 m望远镜及其所在台址的大气视宁度, 研制了一套自适应光学系统. 系统的主要部件包括具有109个压电陶瓷驱动器的变形镜, 具有100个子孔径的Shack-Hartmann波前传感器, 以及基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的高速波前控制平台等. 实验结果表明, 该系统可以把大气扰动引起的波前像差的均方根值校正到0.1λ以下, 获得接近衍射极限的成像质量.

关键词 自适应光学系统, 波前重建, 波前控制, 高速控制平台

PACS: 07.05.Pj, 42.25.Dd, 42.68.Bz, 95.75.Qr

1 引言

大气湍流是影响地基天文望远镜成像质量的主要因素, 为了克服大气湍流的影响, 提高望远镜的分辨率, 许多大口径天文望远镜都装配了自适应光学系统^[1-3]. 位于国家天文台兴隆观测站的2.16 m望远镜是国内口径较大的天文光学望远镜之一. 由于兴隆站点视宁度条件的限制, 2.16 m望远镜目前主要进行天文学光谱观测. 为了提高望远镜工作效率, 同时便于天文学家进行成像观测, 我们在中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项资助的支持下研制了一套适用于2.16 m望远镜的小视场自适应光学系统.

望远镜自适应光学系统的设计必须考虑望远镜

站点关于大气湍流的统计数据. 大气湍流的统计数据反映了站点大气湍流扰动的剧烈程度, 其中包括大气的相位结构常数、视宁度、等晕角、相干长度等^[4-10]. 其中, 主要反映站点望远镜实际成像质量的统计参数为大气视宁度. 兴隆观测站的大气视宁度大部分时间在2"–3"之间, 平均风速为6 m/s. 与世界上其他天文观测站点相比^[11,12], 兴隆站的视宁度条件并不理想. 据兴隆站点的前期统计数据, 大气湍流扰动对兴隆站2.16 m望远镜引入的波前畸变的均方根(Root Mean Square, RMS)值为1.5倍波长, 对应焦面处的斯特列尔比约为0.02. 为了使望远镜能满足清晰成像的观测要求, 所配备的自适应光学系统必须能够将湍流波前校正至0.2倍波长(RMS)以下, 焦面处的斯特列尔比大于0.2,

引用格式: 李常伟, 李邦明, 陆彦婷, 等. 兴隆2.16 m望远镜自适应光学系统. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 084206
Li C W, Li B M, Lu Y T, et al. Adaptive optics system for the Xinglong 2.16 m telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 084206, doi: 10.1360/SSPMA2016-00486

将望远镜的斯特列尔比提高至少1个量级. 这意味着, 为2.16 m望远镜配备自适应光学系统不仅技术难度大, 而且需要高性能的元器件. 在预算范围之内, 研制了一套工作在自然导星模式下的单共轭自适应光学系统, 能够在近红外波段提供接近衍射极限的成像质量. 该系统利用Shack-Hartmann (SH)波前传感器和四象限探测器(Quadrant Photodiodes, QD)在可见光波段分别探测大气湍流引起的高阶波前像差和倾斜像差, 并分别利用压电陶瓷变形镜和倾斜镜对这两种波像差进行实时补偿, 经过自适应光学系统补偿的星光经离轴抛物镜汇聚至近红外相机成像. 本文将从光学系统、控制系统、波前控制算法和实验结果几方面对这套自适应光系统进行简要介绍.

2 光学系统

兴隆2.16 m望远镜具有3个光学焦点, 分别是主焦点、卡塞格林(Cassegrain)焦点和折轴(Coude)焦点. 考虑到自适应光学系统的体积以及焦点的稳定性, 此套自适应光学系统设计安装在望远镜的折轴焦点处.

该自适应光学系统的光路结构如图1所示, 来自望远镜折轴焦点的发散光经过离轴抛物镜OAP1准直, 入射到倾斜镜TTM上, 继而入射到变形镜DM上, 经DM反射后的平行光经长通二向色分光棱镜(Dichroic Beam Splitter, DBS)后, 分为两束, 透过二向色分光棱镜的红外波段(>800 nm)的平行光, 经过离轴抛物镜OAP2汇聚到红外CCD (Charge Coupled Device)相机上, 用于成像观测, 经二向色分光棱镜反射的可见光波段(<800 nm)的平行光经可见光分光棱镜BS (Beam Splitter)后分为两束平行光: 一束经离轴抛物镜OAP3和OAP4压缩, 入射到波前传感器(Wavefront Sensor, WFS)上, 用于测量光束的波前像差; 第二束经过透镜汇聚, 入射到四象限探测器(Quadrant Detector, QD)上, 用于传感光束的倾斜.

确定系统的初步结构后, 结合兴隆站点的大气条件采用蒙特卡罗方法对该自适应光学系统进行了详细的结构优化和性能仿真^[13,14], 根据仿真结果选择和确定了波前校正器和波前传感器的详细参数. 该自适应光学系统中, 波前校正器包括变形镜和倾斜镜两部分. 其中, 变形镜采用OKO公司制造的109通道压电陶瓷促动器变形镜, 具体技术参数如表1所示. 倾斜镜采

用PI公司制造的压电陶瓷倾斜镜, 技术参数如表2所示. 模拟仿真结果表明所选择变形镜和倾斜镜组合对兴隆站点的大气湍流引起的波前畸变面形拟合误差约为0.06个波长, 能够达到该自适应系统设计的成像目标. SH波前传感器为定制, 其微透镜阵列的子孔径数目为100个, 有效子孔径为64个, 测量精度达到1/100个波长, 技术参数如表3所示.

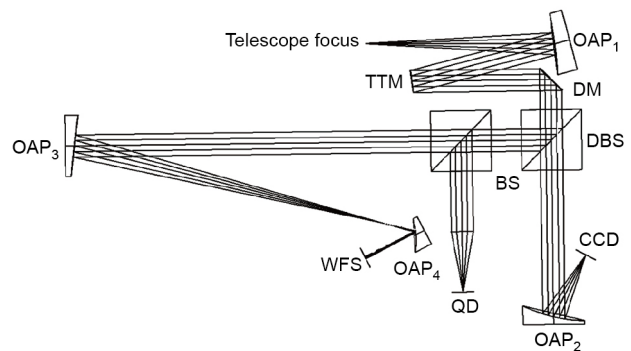


图1 2.16 m望远镜自适应光学系统光路示意图

Figure 1 Diagram of the adaptive optics (AO) system for the 2.16 m telescope.

表1 变形镜技术参数

Table 1 Technical parameters for deformable mirror

口径	驱动器数目	初始面形误差RMS	电压范围	最大行程
50 mm	109	$<2 \mu\text{m}$	0–400 V	$8 \mu\text{m}$

表2 倾斜镜技术参数

Table 2 Technical parameters for tip/tilt mirror

口径	校正范围	闭环校正精度
50 mm	2 mrad	0.02 mrad

表3 SH波前传感器技术参数

Table 3 Technical parameters for SH wavefront sensor

参数	描述
口径	5 mm
像素大小	$14 \mu\text{m}$
像素个数	256×256
测量精度	$\lambda/100$
微透镜口径	$300 \mu\text{m}$
微透镜焦距	4.5 mm
工作波段	350–1100 nm
帧频	>1000 fps

3 控制系统

兴隆2.16 m望远镜自适应光学系统控制系统的框图如图2所示, 该系统主要包括上位机软件、变形镜控制回路和倾斜镜控制回路3个部分. 其中上位机软件用于提供可视化的人机接口, 通过以太网接口与变形镜和倾斜镜控制回路相连, 方便用户监控系统运行状况, 并进行各种操作. 为提高系统的实时性, 控制系统和上位机通信采用了裸机程序设计方法, 并且设计实现了TCP/IP协议栈, 同时满足了控制系统的实时性和稳定性要求. 变形镜控制回路通过采集SH波前传感器的光斑信号, 经计算转化为变形镜驱动电压, 驱动变形镜校正波前的高阶像差, 该回路的控制频率为1000 Hz. 倾斜镜控制回路通过采集QD的输出信号, 经计算转化为倾斜镜的驱动电压, 驱动倾斜镜校正波前的倾斜像差, 该回路的控制频率为2000 Hz. 变形镜控制回路和倾斜镜控制回路的具体硬件实现介绍如下.

3.1 变形镜控制回路

如图2上半部分所示, 变形镜控制回路以FPGA+DSP作为主处理器, 通过Camera Link接口实时采集SH传感器获得的光斑图, 对光斑图进行波前重建和控制信号计算后得到相应的控制电压, 然后通过12位数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)和高压放大器(High Voltage Amplifier, HVA)输出0~300 V的高压驱动变形镜产生相应的面形.

控制回路主处理器的FPGA部分主要以高速并行

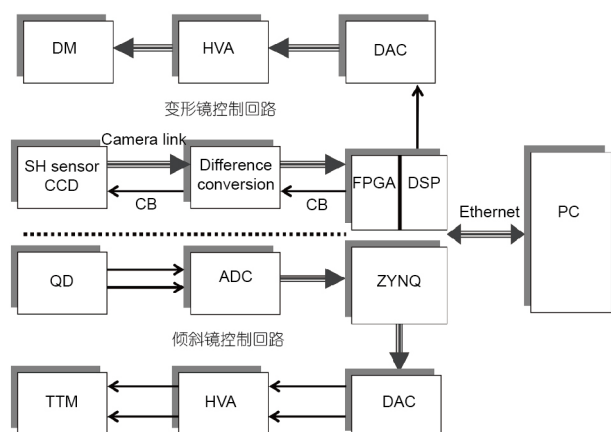


图2 控制系统框图

Figure 2 Diagram of the control system.

计算的方式对光斑图进行处理, 完成波前重建和波前控制信号计算, 数据处理和相关算法均以硬件描述语言实现. 波前重建和波前控制的算法介绍见第4节. 主处理器的DSP部分主要用于硬件和上位机数据交换和控制变形镜改变面型以补偿大气湍流引起的波前畸变.

3.2 倾斜镜控制回路

如图2下半部分所示, 倾斜镜控制回路以Xilinx公司的Zynq处理器(FPGA+ARM)作为主处理器, 通过16位高精度模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)对QD信号进行实时采集, 将QD信号转化为对应的倾斜量后, 经计算处理得到相应的电压控制量, 继而通过16位DAC和HVA输出0~100 V的高压, 驱动倾斜镜产生相应的倾斜.

Zynq处理器的FPGA部分主要以高速并行计算的方式对QD信号进行数据处理和控制信号计算. 分析了不规则入射光斑情况下QD信号与所测倾斜量的对应关系, 并综合采用自抗扰控制算法和改进的PID算法, 获得了较高的倾斜校正精度^[15-17]. Zynq处理器的ARM部分主要用于和上位机通信. 有关Zynq编程开发和基于Zynq的高精度数据采集知识可参阅文献^[18,19].

由于压电陶瓷倾斜镜是较大的容性负载, 需要较大的电流驱动, 倾斜控制回路中的HVA为自主设计, 最大输出电流高达8 A, 经测试, 其线性、精度和带宽均优于本控制系统设计指标.

4 波前控制算法

4.1 波前重建

在自适应光学系统中, 波前重建是指由波前传感器得到的光强信息, 重建出湍流波前. 波前重建是自适应光学系统中校正大气湍流的重要环节, 其精度直接决定了系统的性能. 兴隆2.16 m自适应光学系统采用SH波前传感器探测大气湍流像差, 波前重建的过程就是由SH传感器得到的光斑图重建出湍流波前的过程. 本系统采用了基于Zernike多项式的模式法^[20]进行波前重建. 该方法首先将波前表示为若干Zernike多项式的线性组合, 然后利用SH波前传感器各子孔径探测到局部波前斜率, 通过最小范数最小二乘法拟合出各项Zernike多项式的系数, 最终求解出的波前系数用于后续的波前校正.

具体说来, 整个波前重建过程分三步完成, 即从光斑图中提取光斑实际质心和参考质心位置、依据质心位置计算局部波前斜率、基于Zernike多项式的波前重建. 这三个步骤中, 精确定位光斑实际质心点与参考质心点是波前重建的关键. 因为在实际天文望远镜工作环境下, 通常没有合适的参考光源用于参考质心定标, 使质心的精确定位比较困难. 针对这一问题, 设计了一种无参考输入光条件下的自适应波前重建算法^[21]. 该方法首先采用亮度分层法确定光斑探测窗口, 然后采用自适应阈值法确定实际质心位置, 能够准确定位参考质心和实际质心的位置. 完整的波前重建算法请参阅文献^[21], 该算法经FPGA实现后进行了模拟动态大气环境的自适应光学系统校正实验, 验证了该算法的可靠性与实用性.

需要注意的是, 在采用模式法进行波前重建时, 所采用的Zernike多项式的阶数并不是越多越好, 而是要与SH传感器子孔径的个数相匹配. 所选择的Zernike多项式的阶数过小, 就不能充分发挥波前传感器的性能, 是对传感器性能的浪费; 所选择的多项式阶数过大, 由于波前传感器子孔径数目有限, 会存在采样不足导致重建波前不准确的问题. 因此使用模式法重建波前时必须仔细选择所使用Zernike多项式的阶数.

4.2 波前控制

自适应光学系统可以看作是一个以光学波前为控制对象的自动控制系统. 为了减小对波前传感器动

态范围的要求, 克服系统中变形镜本身存在的迟滞、蠕动等非线性效应, 自适应光学系统一般采用闭环负反馈的工作方式. 图3给出了本系统的控制框图, 其中CC为控制计算. 设 $\varphi_{tur}(x,y,t)$ 是入射的大气畸变波前, $\varphi_{dm}(x,y,t)$ 是变形镜在控制信号下产生的波前, $\varphi_{res}(x,y,t)$ 是残余波前, 则有 $\varphi_{res}(x,y,t) = \varphi_{tur}(x,y,t) - \varphi_{dm}(x,y,t)$, 即波前传感器测量的是变形镜校正后的波前误差. 采用闭环负反馈的工作方式, 要求输出信号 $\varphi_{dm}(x,y,t)$ 能够很好地跟踪输入信号 $\varphi_{tur}(x,y,t)$, 从而使 $\varphi_{res}(x,y,t)$ 取得较小值.

为了实现自适应光学系统和大气湍流像差时空特性的最优匹配, 本系统采用模式控制方法滤掉容易引起控制系统不稳定且对像质影响不大的高频像差, 只对大气湍流中对系统像质影响较大的低频像差进行校正. 图4给出了模式控制法的原理结构图, 其基本思想为: 残余波前由SH波前传感器采样并测量, 然后经过波前重建算法, 分解为一系列正交的像差模式, 并把各个模式像差分别输入到控制器中. 控制器根据自适应光学系统对这些模式的响应特性以及大气湍流、噪声等环境对模式的影响程度, 根据设计的控制算法计算出各个模式控制信号的输出, 汇总后驱动变形镜进行工作. 这样就把多输入多输出的自适应光学控制系统分解为多个并行的单输入单输出的控制系统进行处理, 并通过控制算法设计对每个控制通道进行控制. 具体的控制算法可参阅文献^[22,23], 实验表明该方法实现了系统和待校正像差模式时空特性的最优匹配, 增加了系统的稳定性.

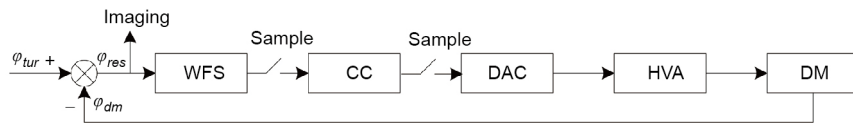


图3 自适应光学系统控制框图
Figure 3 Block-diagram of control system for the AO system.

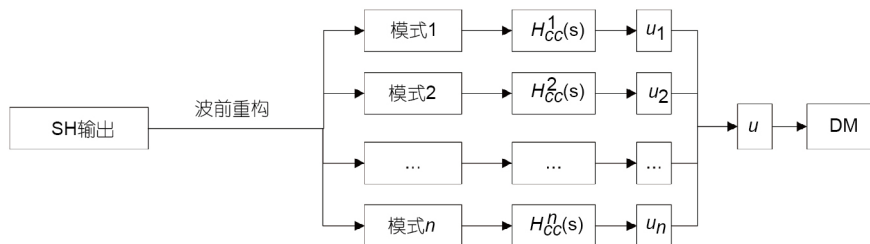


图4 模式控制法的原理结构图
Figure 4 Diagram of the scheme of the modal control.

5 系统性能

由于预算有限, 目前系统中的SH传感器的探测器和红外成像相机灵敏度太低, 无法进行星光下的自适应光学校正实验, 只能进行实验室模拟验证.

为了验证系统性能, 采用波长为 $0.66\ \mu\text{m}$ 的激光二极管作为光源, 将二极管发出的激光耦合到单模光纤中. 由于单模光纤的直径很小, 对可见光一般为几个微米, 因此, 单模光纤的输出可以近似看作点光源. 实验中, 以单模光纤的输出作为点光源模拟宇宙中的恒星. 用一块直径为 $40\ \text{mm}$ 的双胶合透镜将单模光纤输出的发散光准直成平行光. 为了避免透镜边缘对平行光的影响, 用一个直径为 $35\ \text{mm}$ 的光阑将光束变为直径 $35\ \text{mm}$ 的平行光束, 模拟来自无穷远处恒星发出的光. 然后, 再利用一块口径为 $50\ \text{mm}$ 的双胶合透镜模拟望远镜, 将准直的平行光汇聚到一点, 用该汇聚点模拟望远镜的焦点和自适应光学系统进行对接, 构成完整的望远镜自适应光学系统.

为了能够在系统中引入符合大气湍流扰动规律且动态变化的波前畸变, 加工制作了一块大气湍流相位屏. 该大气湍流相位屏引入的相位分布满足Kolmogorov模型, 而且, 大气相干长度和兴隆站点的大气湍流统计相干长度一致. 关于大气湍流相位屏模拟和加工的详细讨论见参考文献[24]. 加工好的大气湍流相位屏刻蚀在一个直径为 $150\ \text{mm}$ 的圆形石英玻璃板上. 当大气湍流相位屏的部分相位分布于直径为 $35\ \text{mm}$ 的平行光束时, 就会在系统中引入一个静态的波前畸变. 如果大气湍流相位屏绕轴旋转, 并且保证在旋转过程中平行光束始终通过大气湍流相位屏

的某一部分, 这样就可以在系统中引入一个动态的波前畸变. 在实验中就是使用旋转的大气湍流相位屏来模拟动态波前畸变的, 其中大气湍流相位屏以 $8\ \text{圈/分钟}$ 的速度匀速旋转.

在系统中引入动态畸变波前之后, 开启自适应光学系统之前, CCD相机上捕获的长曝光(CCD的曝光时间设置为 $3.5\ \text{s}$)图像, 即点光源的像十分模糊, 几乎淹没在噪声之中, 并且动态变化. 图5(a)为自适应光学系统开启之前, CCD捕获的一系列动态图像中的一幅. 开启自适应光学系统之后, CCD相机上捕获的长曝光图像变得十分明亮清晰. 图5(b)为自适应光学系统开启之后, CCD捕获的一系列动态图像中的一幅, 和点扩散函数十分接近. 图6为实验时通过SH波前传感器得到的自适应光学校正前后的像差, 其中图6(a)为自适应系统校正前的像差, 图6(b)为自适应系统校正后的残余像差. 校正前像差的RMS值为 1.07λ , 校正后像差的RMS为 0.07λ . 实验过程中, 观测到经过自适应光学系统校正之后, CCD相机捕获的图像十分稳定, 波前传感器测得残余波像差也稳定在 0.1λ (RMS)以下. 通过对比图5(a)和(b)可以发现, 校正前, 点光源像的最大灰度值为14, 信号基本湮灭在背景噪声中, 几乎难以分辨出目标, 经过自适应光学系统校正后, 物体的亮度明显增强, 最大灰度值达到255, 表明校正后光斑能量更集中. 同时, 自适应光学校正前后图像的半高全宽也明显减小, 由原来的95个像素减小到了12个像素, 十分接近理想的点扩散函数; 系统的斯特列尔比提高了18倍多, 成像质量显著提高. 根据系统残差和斯特列尔比的近似关系^[8], 系统的残余波像差在 0.1λ (RMS)

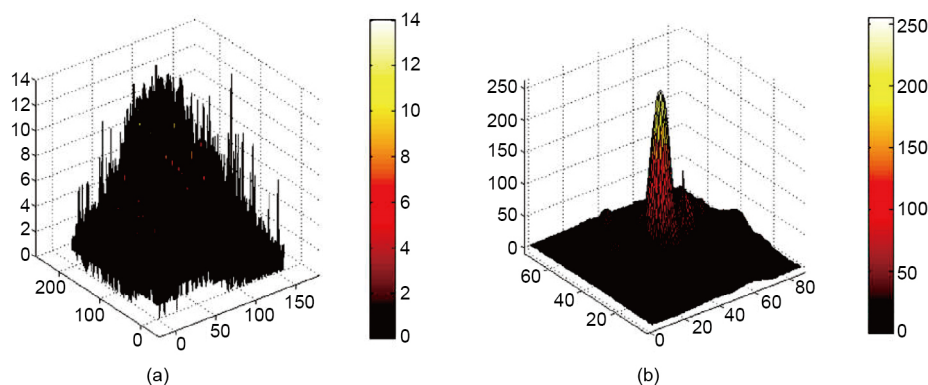


图5 (网络版彩图)自适应光学系统校正前后光斑的三维能量分布图. (a) 校正前光斑的能量分布图; (b) 校正后光斑的能量分布图

Figure 5 (Color online) 3-dimensional intensity profiles before (a) and after (b) correction by the AO system.

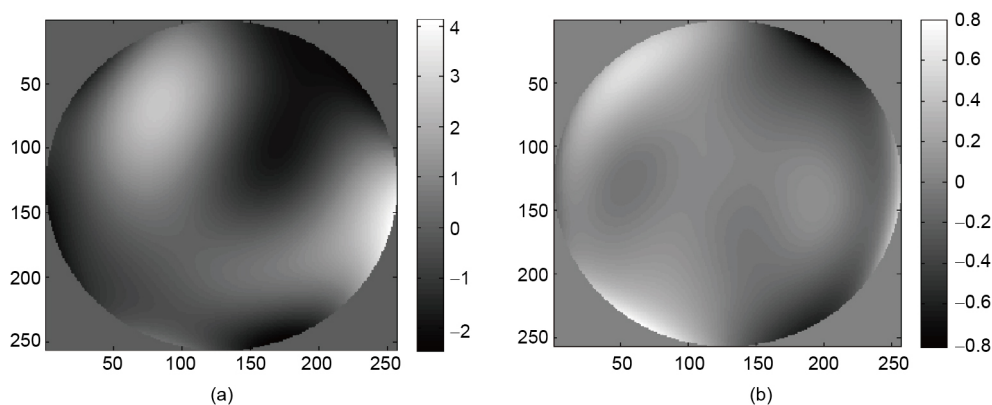


图6 自适应光学系统校正前后的像差。(a)校正前的像差;(b)校正后的残余像差
Figure 6 Aberrations before (a) and after (b) correction by the AO system.

时,系统的斯特列尔比可以达到0.68.实验结果表明该自适应光学系统的校正性能超出了设计值,具有很好的像差校正性能.

6 结论

本文根据2.16 m望远镜及兴隆站点的大气视宁度

条件,研制了一套自适应光学系统.系统实验结果表明,研制的自适应光学系统可以将波前像差的均方根值校正到0.1 λ 以下,可以获得接近衍射极限的成像质量.下一步,将对SH波前传感器的CCD探测器和成像相机进行升级,与望远镜联调进行星光自适应光学校正实验,进一步验证系统性能.

参考文献

- 1 Rousset G, Lacombe F, Puget P, et al. Status of the VLT Nasmyth adaptive optics system (NAOS). *SPIE*, 2000, 4007: 72–81
- 2 Sauvage J F, Fusco T, Petit C, et al. SAXO, the extreme adaptive optics system of SPHERE. Overview and calibration procedure. In: *Proceedings of Astronomical Telescopes and Instrumentation, Adaptive Optics Systems II*. Bellingham: SPIE, 2010
- 3 Guyon O, Arimoto N, Blain C, et al. Subaru telescope LGSAO: Overview of expected performance. In: *Proceedings of Astronomical Telescopes and Instrumentation, Advancements in adaptive Optics*. Bellingham: SPIE, 2004. 733–741
- 4 Tatarski V I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. New York: McGraw-Hill, 1961
- 5 Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy. *Prog Opt*, 1981, 19: 283–376
- 6 Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion. *J Opt Soc Am*, 1965, 55: 1427–1435
- 7 Fried D L. Anisoplanatism in adaptive optics. *J Opt Soc Am*, 1982, 72: 52–61
- 8 Roddier F. *Imaging through turbulence*. In: *Adaptive Optics in Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 9–22
- 9 Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am*, 1976, 66: 207–211
- 10 Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J Opt Soc Am*, 1966, 56: 1372–1379
- 11 Rigaut F, Rousset G, Kern P, et al. Adaptive optics on a 3.6-m telescope: Results and performances. *Astron Astrophys*, 1991, 250: 280–290
- 12 Roddier F J, Cowie L L, Graves J E, et al. Seeing at Mauna Kea: A joint UH-UN-NOAO-CFHT study. *SPIE*, 1990, 1236: 485–491
- 13 Jia P, Zhang S J. Performance modeling of the adaptive optics system on the 2.16 m telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2013, 56: 658–662
- 14 Li S, Zhang S. Numerical model of the influence function of deformable mirrors based on Bessel Fourier orthogonal functions. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 1504–1510
- 15 Zheng Z Y, Li C W, Zhang S J. Theoretical analyses for the relationship between the performance of quadrant photodetector and the size of incident light spot. In: *Proceedings of Astronomical Telescopes and Instrumentation, Adaptive Optics Systems IV*. Bellingham: SPIE, 2014
- 16 Zheng Z Y, Lu Q S, Zhang S J. Active disturbance rejection control for precise position tracking of piezoelectric actuators. *High Tech Lett*, 2015, 21: 333–338
- 17 Zheng Z Y, Li C W, Li B M, et al. Analysis and demonstration of PID algorithm based on arranging the transient process for adaptive optics.

- [Chin Opt Lett](#), 2013, 11: 110101–110104
- 18 Lu Q S, Lu Y T, Wang D. Practical Design Guide for Xilinx Zynq Soc Running Embedded Linux (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2014 [陆启帅, 陆彦婷, 王地. Xilinx Zynq SoC与嵌入式Linux设计实战指南. 北京: 清华大学出版社, 2014]
- 19 Lu Q S. Piezoelectric sesor precision acquisition system based on Zynq (in Chinese). *Microcontrol Embed Syst*, 2015, 9: 54–56 [陆启帅. 基于Zynq压电陶瓷传感器的高精度采集系统设计. 单片机与嵌入式系统应用, 2015, 9: 54–56]
- 20 Herrmann J. Cross coupling and aliasing in modal wave-front estimation. *J Opt Soc Am*, 1981, 71: 989–992
- 21 Li Z G, Li B M, Li C W, et al. An adaptive algorithm for wavefront reconstruction based on a Shack-Hartmann sensor (in Chinese). *Chin J Quantum Electron*, 2013, 30: 482–489 [李战, 李邦明, 李常伟, 等. 一种基于Shack-Hartmann传感器的自适应波前重建算法. 量子电子学报, 2013, 30: 482–489]
- 22 Li B M, Li C W, Zhang S J. Dynamic optimization method for modal control of adaptive optics system (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2012, 32: 26–30 [李邦明, 李常伟, 张思炯. 自适应光学系统模式控制动态优化方法. 光学学报, 2012, 32: 26–30]
- 23 Li B M, Li C W, Jia P, et al. Analysis and experimental demonstration of adaptive optics based on the modal control optimization. In: *Proceedings of Astronomical Telescopes and Instrumentation, Adaptive Optics Systems III*. Amstrdam: SPIE, 2012
- 24 Jia P, Zhang S. Simulation and fabrication of the atmospheric turbulence phase screen based on a fractal model. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 584–590

Adaptive optics system for the Xinglong 2.16 m telescope

LI ChangWei^{1,2*}, LI BangMing^{1,2}, LU YanTing^{1,2}, LU QiShuai^{1,2},
ZHENG ZhaoYing^{1,2}, WANG Di^{1,2} & LI Shun^{1,2}

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

² Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China

Adaptive optics (AO) is one of the essential techniques for the large-diameter astronomical telescopes to overcome the wavefront aberrations caused by atmospheric turbulence and improve their imaging qualities. This paper describes an adaptive optics system developed for the 2.16-m telescope at Xinglong. This AO system mainly consists of a piezoelectric deformable mirror with 109 actuators, a Shack-Hartmann wavefront sensor with 100 subapertures, and a high-speed control platform based on field-programmable gate array (FPGA). Experimental results show that this AO system can reduce the root-mean-square (RMS) of the atmospheric wavefront aberrations to, or even smaller than 0.1λ , and then the telescope can obtain a near diffraction limited resolution.

adaptive optics system, wavefront reconstruction, wavefront control, high-speed control platform

PACS: 07.05.Pj, 42.25.Dd, 42.68.Bz, 95.75.Qr

doi: [10.1360/SSPMA2016-00486](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00486)