文章编号 1004-924X(2016)06-1272-09

# 桌面 97 单元自适应光学系统性能测试

林旭东*,刘欣悦,王 帅,王建立,卫沛锋,王 亮,贾建禄,陈宝刚,汪宗洋,姚凯男
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要**:构建了一套桌面自适应光学系统性能测试系统,用以验证 97 单元自适应光学系统的校正能力。该测试系统主要由光源、快速控制反射镜、变形镜、Shack-Hartmann 波前传感器、高速波前处理器、扰动相位屏等部件组成,分别利用干涉仪和 Shack-Hartmann 波前传感器的数据控制变形镜进行光路的展平校正,得到了系统的静态校正精度。然后,测试了精密跟踪系统的校正能力。最后,利用扰动相位屏模拟不同的大气扰动条件,以成像相机图像的斯特列尔比(SR)为指标,在不同目标亮度下测试了自适应光学系统的动态校正能力。测试结果显示:该 97 单元自适应光学系统的静态波像差校正精度的 RMS 接近 λ/20;两种控制模式下精密跟踪系统的误差抑制带宽分别达到了 15 Hz 和 39 Hz;系统在强湍流情况下,动态校正后的成像分辨率基本优于 3 倍衍射极限。由此表明,97 单元自适应光学系统能够有效地校正像差,提高成像分辨率。

**关 键 词**:自适应光学;性能测试;动态校正;精密跟踪;变形镜;斯特列尔比;相位屏
**中图分类号**:P124;TB133 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20162406.1272

# Performance testing of a desk-top 97-element adaptive optical system

LIN Xu-dong*, LIU Xin-yue, WANG Shuai, WANG Jian-li, WEI Pei-feng, WANG Liang, JIA Jian-lu, CHEN Bao-gang, WANG Zong-yang, YAO Kai-nan

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: linxudong_82@126.com*

**Abstract**: A set of performance test system of the desktop adaptive optical system was established to verify the correction capability of a 97-element adaptive optical system. The test system mainly consisted of such components as the light source, fast steering mirror, deformable mirror, Shack-Hartmann wave-front sensor, fast wave-front processor and disturbance phase screen. The data of the interferometer and Shack-Hartmann wave-front sensor were employed to control the deformable mirror for the flattening correction of optical path and the static correction precision of the system was obtained. Then, the correction capability of the precision tracking system was tested. Finally, the disturbance phase screen was use to simulate different atmospheric disturbance conditions and the dynamic correction capability of the adaptive optical system was tested under different degrees of target brightness with the Strehl Ratio (SR) of the imaging camera image being the index. The results show that: the RMS of the static wave aberration correction precision of the 97-element adaptive optical system is ap-

**收稿日期**:2015-07-17;**修订日期**:2015-08-30.
**基金项目**:国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2014AAXXX1003X)

proximate λ/20；the error suppression bandwidths of the precision tracking system under two control modes can respectively reach 15 Hz and 39 Hz；when the system is under the strong turbulence，the imaging resolution after dynamic correction is basically superior to three times of diffraction limit. It indicates that the 97-element adaptive optical system can effectively correct the aberration and improve the imaging resolution.

**Key words**：adaptive optics；performance test；dynamic correction；precision tracking；deformable mirror；Strehl Ratio；phase screen

## 1　引　言

自适应光学(Adaptive Optics，AO)技术能够实时校正大气湍流引起的动态波前误差，提高光学系统的成像质量，因此越来越多地被应用到大口径天文望远镜系统中[1]。AO 系统一般由精密倾斜跟踪控制回路、高阶波前校正回路、高分辨率成像系统等组成[2]。其中，精密倾斜跟踪控制回路利用精密跟踪相机的图像数据控制快速控制反射镜校正光学系统的跟踪误差；高阶波前校正回路主要由波前校正器[3]、波前传感器及高速波前处理器构成，用以快速校正大气扰动引起的高阶波前误差。

波前校正器的校正误差、波前传感器拟合误差、波前处理器的波前重构误差等静态影响因素的综合效果反应了 AO 系统所能达到的最优工作状态；而 AO 系统对动态扰动的抑制效果则综合体现了它在空间和时间尺度上的校正能力。影响动态校正效果的主要因素有大气扰动特性、目标光源亮度和自适应光学系统的控制带宽等[4-5]。

本文针对一套 97 单元 AO 系统开展了性能评估。该系统的波前校正器为 97 单元分离压电促动器连续镜面变形镜[6-7]，波前传感器为一个基于 Andor 公司 DU860 相机的 Shack-Hartmann (S-H)传感器。利用相位屏作为模拟大气光学相位扰动的输入源，干涉仪作为系统静态校正性能的对比评判测量仪器，以成像相机采集到的图像算得的斯特列尔比为指标分析了系统的动态校正效果。结果表明，该 AO 系统能够有效地校正像差，从而提高相机的分辨率。

## 2　性能测试系统

AO 测试系统的光路如图 1 所示，其中变形镜的通光口径为 76 mm。

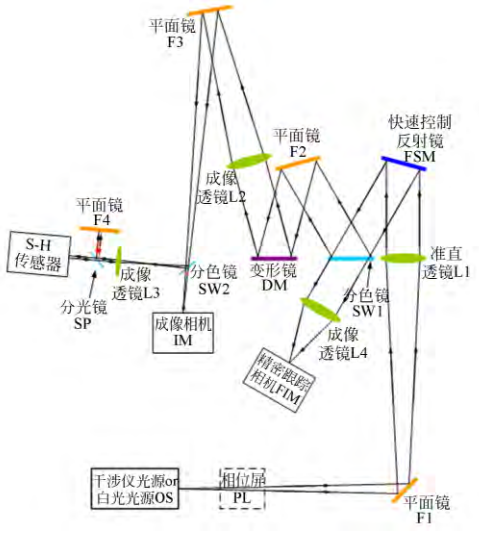



图 1　AO 测试系统光路

Fig. 1　Optical layout of AO testing system

搭建的实际系统如图 2 所示。其中，白光光纤光源(OS)安装在一个平移台上，其亮度可以调整，用于模拟空间目标的亮度；干涉仪(IN)的出射光束焦点位于白光光源位置，与自准直平面镜(F4)一起用于系统光路的自准直检测；相位屏(PL)用于模拟大气扰动。

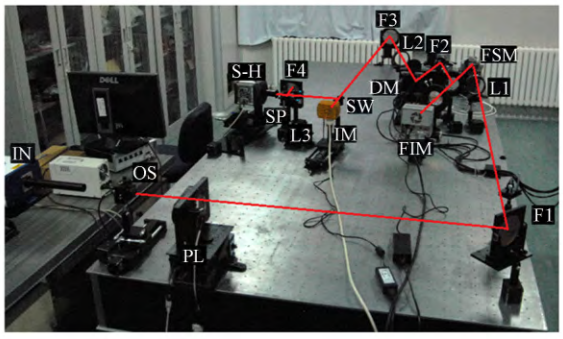



图 2　AO 测试系统照片

Fig. 2　Photo of AO testing system

透镜 L1、L2 分别用于光束的准直和会聚，透镜 L3 在 S-H 传感器之前用于光束的准直，变形

镜与 S-H 传感器的微透镜阵列满足光瞳共轭关系；L3 与 S-H 传感器之间用一个分光镜(SP)进行分光，这样在进行 S-H 传感器测量和干涉仪测量切换时只需移动白光光源。

精密跟踪相机(FIM)与快速控制反射镜(FSM)构成闭环控制回路，用于校正光路的波前倾斜，该闭环回路在 900～1 700 nm 的短波波段工作。S-H 传感器(S-H)和变形镜(DM)组成高阶闭环校正回路，用于校正系统中除了倾斜之外的像差，校正后的光源目标在成像相机(IM)上面成像。波前传感和成像光路由分色镜(SW)分光，其中 S-H 传感器的透光波段为 500～700 nm，成像波段为 700～900 nm。光路中 F1，F2，F3 都为光线折转用平面镜。

快速控制反射镜为定制的压电陶瓷驱动平台，其校正行程优于 $\pm 6'$，机械谐振频率优于 850 Hz。变形镜为 97 单元的分离促动器连续镜面变形镜，压电促动器采用 11×11 的方形排列形式，单促动器的校正行程大于 $\pm 2.5$ μm，机械谐振频率优于 12 kHz。S-H 传感器的微透镜阵列为方形排列，微透镜与变形镜促动器一一对应，即采用 Southwell 模型[1]映射。

波前处理器用于实现高速波前探测处理和校正控制，采用基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array，FPGA)＋数字信号处理器(Digital Signal Processor，DSP)的嵌入式架构[8]。波前处理器包括单板计算机、波前处理主板以及可扩展的波前处理子板等。其中，单板计算机主要完成非实时操控管理的功能；基于 FPGA 的波前处理主板主要完成实时波前探测处理的功能；而基于 DSP 的波前处理子板主要完成实时波前校正控制的功能。实测表明，系统波前处理的总延时约为 62 μs，远小于波前传感器 CCD 图像的输出时间[9]。测试系统的基本设计参数如表 1 所示，假定望远镜口径 $D$ 为 1.2 m。

这里应用从 Lexitek 公司[10]定制的相位屏模拟大气扰动。它是一个直径为 10 cm、厚度为 10 mm 的光学元件，由一个电机驱动，可以电动控制转动频率。在两层玻璃之间嵌入一层刻蚀伪随机图案的聚合物从而构成相位屏。该伪随机图案模拟了满足大气扰动功率谱特性的 Kolmogorov 湍流[11]。大气相干长度 $r_0$(也就是 Freid 参数)及格林伍德频率 $f_G$ 是衡量大气扰动强弱的两个重要指标。其中，$r_0$ 定义为孔径大小，在该孔径内的波前均方误差为 1 rad$^2$，$r_0$ 越小，扰动越强。而 $r_0$ 又与波长的 6/5 次方呈比例关系，波长越长，$r_0$ 越大。该定制相位屏上的 $r_0$ 在波长为 633 nm 时为 0.6 mm。所以理论上，测试系统中对应望远镜主镜位置的 $r_0$ 由相位屏透光区域与望远镜口径之比决定。假设相位屏透光区域直径上面含有 $n$ 个 $r_0$，那么对应到主镜上面的 $r_0$ 为 $D/n$，其中 $D$ 为主镜口径，这里取 $D=1.2$ m。

对于测试中的单层大气湍流模型[12]，相位屏所模拟的格林伍德频率 $f_G$ 为：

$$f_G = 0.427\frac{v}{r_0}, \tag{1}$$

其中 $v$ 为风速。由式(1)即可推算出不同 $f_G$ 下的相位屏转速。

在本测试中，先按照理论计算不同 $r_0$，$f_G$ 时相位屏在光路中的位置及转动速度，同时保存测试中相关数据用于实际 $r_0$ 的复算以及测试条件的修正。

**表 1　AO 测试系统基本参数**

Tab. 1　Parameters of AO testing system

| 参数 | 值 |
|---|---|
| 变形镜(DM)单元数 | 97 |
| 变形镜通光口径/mm | 76 |
| DM 促动器排列 | 11×11 的方形排列 |
| DM 单个促动器变形量/μm | ＞±2.5 |
| S-H 子孔径布局方式 | 方形排列 |
| S-H 与 DM 映射关系 | Southwell 模型 |
| S-H 子孔径尺寸/μm | 200 |
| S-H 子孔径焦距/mm | 7 |
| S-H 单子孔径视场 | 约为 10″×10″ |
| S-H 单子孔径所占像素数/pixel | 10×10 |
| 快速控制反射镜(FSM)口径/mm | 76 |
| FSM 倾斜校正量/(′) | ±6 |
| FSM 机械谐振频率/Hz | 850 |
| 波前处理器架构 | FPGA＋DSP |
| 波前处理延时/μs | 约 62 |
| 成像系统通光口径/mm | 76 |
| 成像系统焦距/mm | 3 000 |
| 成像系统视场(对角线)/(″) | 约为 50 |

## 3　静态校正能力对比测试

波前的空间测量及拟合校正能力、系统的动

态时间响应特性以及信号的信噪比是影响 AO 系统性能的关键因素。变形镜单元数、S-H 传感器子孔径数、变形镜促动器和 S-H 传感器子孔径的对应关系、波前控制算法是影响波前测量与拟合校正能力的主要因素。在系统信噪比足够大的情况下，AO 系统的静态校正能力测试有助于确认系统所能够达到的最优状态，以便于系统的改进。

因为干涉仪在空间频率上要优于 S-H 传感器，所以测试系统中利用干涉仪测量数据作为评价依据。这里先利用干涉仪数据控制变形镜对系统光路进行展平[13-14]，展平后干涉仪测量得到的波前数据如图 3 所示。从图 3 可以看出：在所搭建的光路中，利用干涉仪数据当反馈信号进行展平，基本能够达到 Zygo 干涉仪直接进行展平的效果（光路短、扰动小，面形 RMS 值约为 λ/50，如图 4 所示，对应的波前值约为 λ/25）。

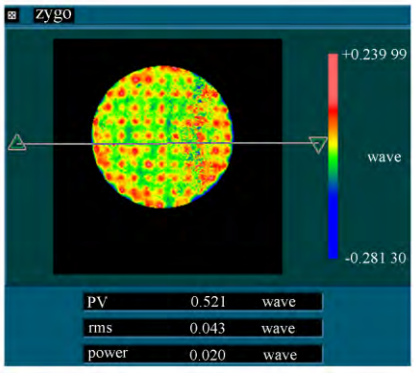



图 3　干涉仪展平后的波前测量结果

Fig. 3　Wavefront after optical path flattened using interferometer data

然后，通过选取较优的控制模式等参数，利用 S-H 传感器数据作为反馈信号控制变形镜对系统光路进行展平。具体操作如下：把白光光源移到干涉仪光源位置，进行展平校正后，变形镜维持面形，再把白光光源移开，利用干涉仪及自准直平面镜 F4 对光路进行波前测量。展平测量结果如图 5 所示。从数据可以看出，S-H 传感器展平的结果接近干涉仪展平的结果，整个 AO 系统（主要误差包括变形镜拟合误差、哈特曼波前测量误差和控制算法波前拟合误差等）的展平精度能够接近 λ/20（λ=632.8 nm）。

图 6 分别给出了 S-H 传感器信噪比 SNR（定义见下文）为 30 和 150 时，系统展平后成像相机对白光目标所成的原始图像。成像效果与展平波前的测量结果基本相当。

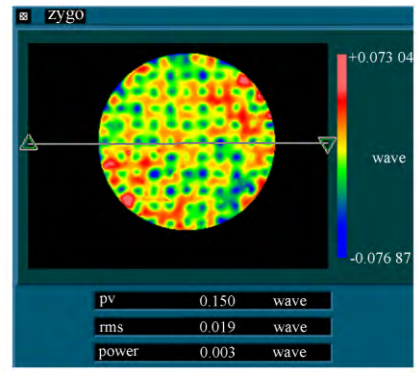



图 4　利用 Zygo 干涉仪数据对变形镜展平

Fig. 4　Wavefront for optical path flattened using Zygo interferometer data

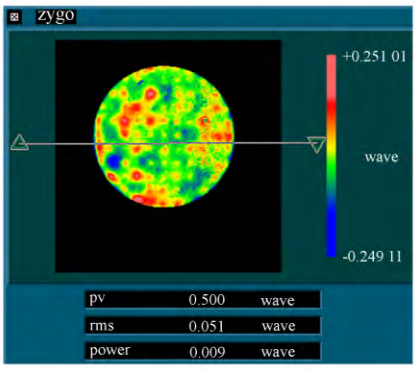
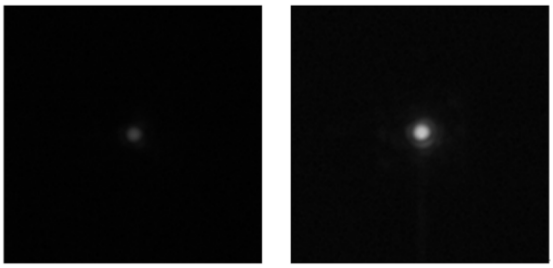



图 5　S-H 传感器展平后波前测量结果

Fig. 5　Wavefront after optical path flattened using S-H sensor data



(a) SNR=30　　(b) SNR=150

图 6　S-H 传感器不同信噪比下的展平成像

Fig. 6　Flattened images with S-H sensor in different SNR conditions

从测试结果来看，S-H 传感器的设计、波前图像数据的处理、波前控制方法及参数的调整等都会影响 S-H 传感器的展平效果，所以在最初设计阶段及 AO 实际工作过程中，对上述因素进行优化设计能够提高系统的性能。

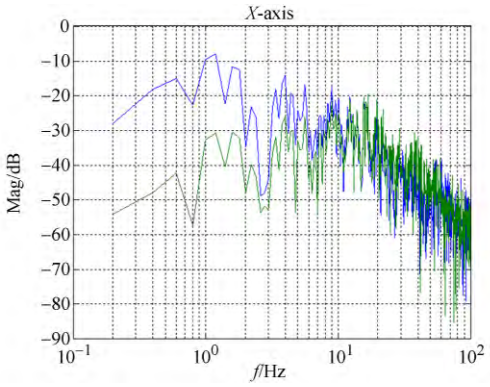
## 4　动态校正能力测试

正如前文所述，AO 系统通常设有精密跟踪回路和高阶 AO 校正回路，分别用来校正由大气引起的倾斜扰动和高阶扰动。在本测试中，将通过可调亮度光源模拟不同星等目标，通过相位屏模拟不同大气条件，以闭环跟踪精度、误差抑制带宽、成像斯特列尔比 SR 等作为评价指标[15]，对 AO 系统的动态校正能力进行测试。

### 4.1　精密跟踪性能测试

在如图 1 所示的系统中，精密跟踪回路的两种反馈控制方案为：一种是常规的利用精密跟踪相机的脱靶量信号控制快速反射镜实现对倾斜扰动的校正；另一种是利用 S-H 传感器测得的波前倾斜信号进行校正。利用精密跟踪相机作为反馈信号时，精跟相机的帧频为 200 Hz。测试中利用相位屏的转动引入倾斜像差，虽然该倾斜量不大，但较合适用于精度及带宽的测试。以格林伍德频率 $f_G$ 描述相位屏的不同转速情况，在 $f_G$ 为 100 Hz 时，测得精跟踪系统的开闭环误差功率谱曲线，如图 7 所示。

由图中数据可知，控制系统的误差抑制带宽为 14～15 Hz。同时，利用 S-H 传感器测得的波前倾斜数据分析不同扰动频率 $f_G$ 下的精密跟踪校正精度，结果如表 2 所示，可知随着扰动频率 $f_G$ 的增大，校正精度下降，但在 $f_G$ 为 100 Hz 时，精密跟踪闭环的两轴精度仍都优于 0.1 pixel。



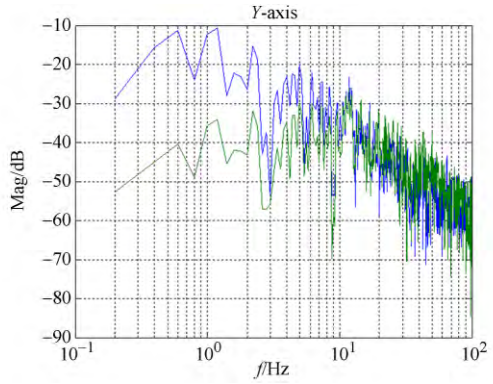




图 7　精密跟踪(精密跟踪相机做反馈信号)开闭环倾斜功率谱曲线@$f_G$=100 Hz

Fig. 7　Tilt power spectra of open loop and closed loop in precision tracking system(using FIM's data as feedback signals) @$f_G$=100 Hz

表 2　精密跟踪开闭环倾斜残差(精密跟踪相机做反馈信号)

Tab. 2　Tilt residual errors of open loop and closed loop in precision tracking system(using FIM's data as feedback signals)

| 格林伍德 | 开环 | | 闭环 | |
|---|---|---|---|---|
| 频率 $f_G$/Hz | X/pixel | Y/pixel | X/pixel | Y/pixel |
| 50 | 0.192 03 | 0.251 48 | 0.046 5 | 0.069 65 |
| 100 | 0.185 66 | 0.252 34 | 0.050 02 | 0.095 13 |
| 160 | 0.185 27 | 0.252 05 | 0.067 41 | 0.140 52 |

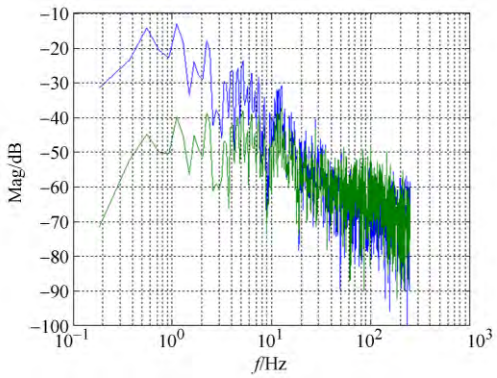



图 8　精密跟踪(S-H 传感器做反馈信号)X 轴开闭环倾斜功率谱曲线@$f_G$=100 Hz

Fig. 8　X-axis tilt power spectra of open loop and closed loop in precision tracking system(using S-H's data as feedback signals) @$f_G$=100 Hz

利用 S-H 传感器测得的波前倾斜信号控制快速控制反射镜校正由相位屏引起的倾斜扰动时，S-H 传感器 CCD 相机的帧频为 500 Hz。与前述测试过程及方法类似，在格林伍德频率 $f_G$

为 100 Hz 时，测得控制系统的误差抑制带宽约为 39 Hz。图 8 给出了 $X$ 轴方向上开闭环的倾斜功率谱曲线。相比精密跟踪相机作反馈时的校正，由于 S-H 传感器的测量精度高，闭环跟踪误差明显变小，表 3 给出了不同扰动频率 $f_G$ 下的跟踪精度，对比表 2 数据可见闭环跟踪精度提高了约 1 倍。

**表 3　精密跟踪开闭环倾斜残差(S-H 传感器做反馈信号)**

Tab. 3　Tilt residual error of open loop and closed loop in precision tracking system(using S-H's data as feedback signals)

| 格林伍德 | 开环 | | 闭环 | |
|---|---|---|---|---|
| 频率 $f_G$/Hz | $X$/pixel | $Y$/pixel | $X$/pixel | $Y$/pixel |
| 50 | 0.198 15 | 0.264 28 | 0.019 94 | 0.030 82 |
| 100 | 0.189 49 | 0.251 63 | 0.028 09 | 0.049 95 |
| 160 | 0.176 48 | 0.252 41 | 0.039 00 | 0.069 42 |

### 4.2　高阶 AO 动态校正能力测试

#### 4.2.1　信噪比与斯特列尔比

S-H 图像信号的信噪比计算过程(本测试中都用该方法计算)如下：首先利用式(2)计算每个子孔径内的图像信噪比[16]；再取中间 25 个子孔径信噪比做平均，即为当前由 S-H 传感器测得的目标信噪比，并作为光源亮度调整的依据。

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{WFS}}=\frac{\langle\sum_n \mathrm{pixel}\rangle-\langle\sum_m \mathrm{background}\rangle}{\sigma},\quad(2)$$

其中：$<\sum_n \mathrm{pixel}>$表示对子孔径质心邻域内的 $n$ 个有效像素信号取灰度均值(本测试中 $n$ 取 $3\times 3$)，$\langle\sum_m \mathrm{background}\rangle$表示对子孔径内除了有效信号外的 $m$ 个背景像素信号取灰度均值，$\sigma$ 为子孔径背景灰度的均方差。

这里以成像相机对目标所成图像的斯特列尔比 SR(Strehl Ratio)作为 AO 系统动态校正能力性能的评估系数。参考文献[17]给出了多种 AO 系统中的 SR 评价算法。本测试在参考文献[15]和[17]的基础上，采用如下的图像 SR 计算方法：

(1)计算没加相位屏时，AO 校正后成像相机上像点的总亮度值 $P_1$；

(2)利用光路参数，计算无像差情况下成像相机上的理想点扩散函数(Point Spread Function，PSF)，并使其总亮度值等于 $P_1$；

(3)加入相位屏进行光纤点目标的校正成像，计算多帧该图像的总亮度值的平均值 $P_2$，比值 $P_2/P_1$ 可视为相位屏的透过率 $t$；

(4)对光学传递函数进行积分，再平均多帧图像确定 SR，也就是用校正图像的傅里叶变换的二维积分值除于理想 PSF 的傅里叶变换的二维积分值来获得该帧图像的 SR 值(应考虑相位屏透过率 $t$ 的影响)。

在处理图像数据的过程中，应根据光路数据选取合适的感兴趣区域进行上述计算，使有效信号尽可能地在区域内，同时还应该注意背景噪声的影响。

#### 4.2.2　斯特列尔比性能指标测试

测试中 S-H 传感器所用 DU860 相机的 CCD 帧频为 500 Hz，合并像素情况下的帧频能达到 892 Hz。但在同一光路中进行像素合并时，S-H 传感器的测量精度会下降。由测试结果可知，相对于测量精度的下降，通过合并像素提高 S-H 传感器 CCD 帧频对最终校正效果的影响要小得多。所以本文只给出 S-H 传感器在帧频为 500 Hz 情况下系统校正性能的测试结果。目前，基于 1 500 Hz 帧频 CCD 相机的 S-H 传感器正在装调测试中，下一步将在相同测量精度下，比对测量不同采样频率下 S-H 传感器对 AO 系统校正性能的影响。

按照前述计算方法，针对相位屏所模拟的不同 $r_0$(测试中设定在波长为 632.8 nm 时，$r_0$ 分别为 110，90，70 mm)及不同格林伍德频率 $f_G$($f_G$ 从 10～100 Hz 按 10 Hz 间隔依次递增)，依次调整光源亮度，在不同 S-H 传感器图像信噪比下，AO 系统进行精密跟踪及高阶校正，并记录成像相机上的图像，以成像斯特列尔比 SR 为性能指标，测试 AO 系统的校正能力。测试中为了达到最优的成像效果，还应该补偿系统中的非共光路像差[18]。

当 $r_0=110$ mm 时，在假设望远镜口径为 1.2 m 的情况下，调整相位屏在图 1 光路中的位置，使其透光孔径内径向方向含有约 11 个定制大小的 $r_0$，此时对应望远镜主镜的 $r_0$ 即为 110 mm。测得 AO 校正后成像斯特列尔比与模拟扰动格林伍德频率及 S-H 传感器信噪比的关系如图 9 所示。

本文根据式(3)给出了 3 条倍率衍射极限线(见图 9、图 10、图 11)，分别对应 1.5 倍、2 倍、3 倍衍射极限，可以作为评价校正能力的参考线。

$$\mathrm{resolution}=1.22\frac{\lambda}{D}\frac{1}{\sqrt{SR}}.\qquad(3)$$

调整相位屏的位置使等效的大气相干长度 $r_0$ 为 90 mm，在该条件下进行 AO 校正测试，结果如图 10 所示。同理，测得 $r_0=70$ mm 时的 AO 校正结果，如图 11 所示。

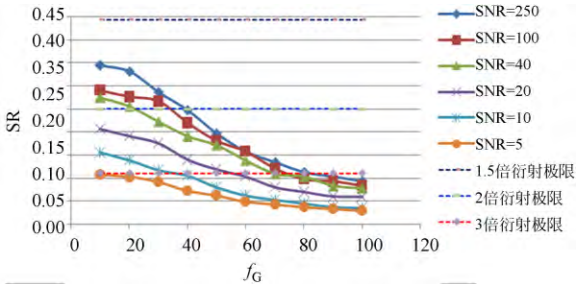



图 9　$r_0=110$ mm 时的 AO 校正性能

Fig. 9　AO correction performance with $r_0=110$ mm

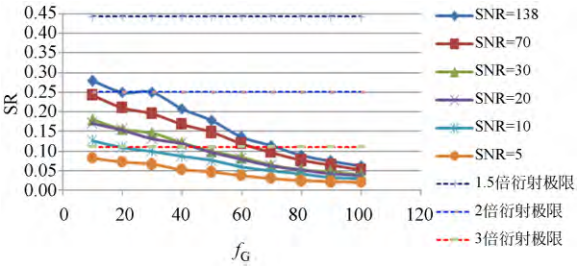



图 10　$r_0=90$ mm 时的 AO 校正性能

Fig. 10　AO correction performance with $r_0=90$ mm

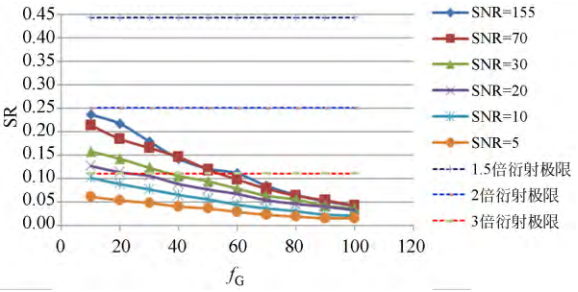


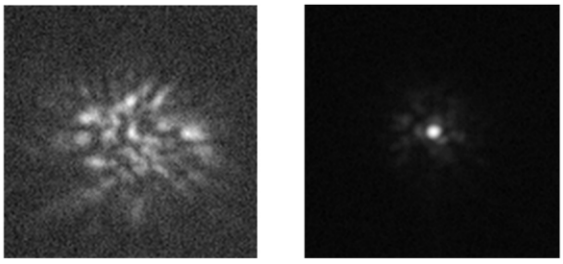

图 11　$r_0=70$ mm 时的 AO 校正性能

Fig. 11　AO correction performance with $r_0=70$ mm

图 12 给出了 S-H 传感器信噪比为 30、$r_0$ 为 90 mm、格林伍德频率 $f_G$ 为 60 Hz 时，AO 系统校正前后，成像相机所采集到的图像（为了便于观测，图像做了拉伸）。从图中可以明显看出 AO 的校正效果。

### 4.2.3　大气相干长度 $r_0$ 复算

在上述测试过程中，针对不同的 $r_0$，本文保存了 S-H 传感器的像点图像，并利用差分图像运动算法[19-20]估算了实际 $r_0$ 的大小，结果如表 4 所示。为了验证算法的重复精度，在每个 $r_0$ 下对应不同的格林伍德频率 $f_G$，都给出了 $r_0$ 的实测值，并对数据进行了简单的统计分析。在从法国 Alcor System 公司购买的一台大气相干长度测量仪（12″ $f/8$ RCDIMM Telescope）上，应用上述算法对图像进行分析计算，得到的 $r_0$ 与其真实值相差很小；同时，基于相位屏的加工误差、相位屏与变形镜及 S-H传感器在光路中光瞳共轭位置偏差等因素，这里认为相位屏模拟 $r_0$ 应该以实际测量值为准。



(a) AO 校正前　(b) AO 校正后

(a) AO off　(b) AO on

图 12　SNR=30、$r_0=90$ mm、$f_G=60$ Hz 时 AO 校正前后的图像

Fig. 12　Images of AO system with SNR=30、$r_0=90$ mm、$f_G=60$ Hz

表 4　不同大气模拟条件下的 $r_0$ 测量值

Tab. 4　Measured values of $r_0$ in different atmospheric simulation conditions

| $f_G$/Hz | $r_0$ 实测值/mm | | |
|---|---|---|---|
| | $r_0=70$ mm | $r_0=90$ mm | $r_0=110$ mm |
| 10 | 43.9 | 59.6 | 97.2 |
| 20 | 42.6 | 61.1 | 85.5 |
| 30 | 36.5 | 59.5 | 85.9 |
| 40 | 40.4 | 62.9 | 86.4 |
| 50 | 42.7 | 64 | 86.8 |
| 60 | 40.8 | 61.4 | 87.8 |
| 70 | 41.5 | 58.4 | 88.2 |
| 80 | 40.9 | 61.8 | 88.9 |
| 90 | 41.2 | 61.6 | 89.6 |
| 100 | 41.6 | 62.5 | 90.5 |
| 均值 | 41.21 | 61.28 | 88.68 |
| 标准差 | 0.186 4 | 0.161 9 | 0.323 1 |

### 4.2.4　动态校正能力小结

由各组 AO 校正前的数据分析可知，校正前图像的 SR 一般都小于 0.02。那么，应用 $r_0$ 的实测值，由测试过程及测试数据图 9～图 12 可以得

到一些初步结果：

(1)同等大气扰动条件下，目标信噪比 SNR 越大，校正效果越好。但是，从测试过程看，即使 SNR 低到 5，AO 系统仍能在设定的扰动条件下稳定闭环校正，不过受 S-H 传感器像点质心提取精度的影响，成像 SR 的提高有限；

(2)对设定的各信噪比情况，$r_0$ 越大，所能抑制扰动频率 $f_G$ 越大。以成像系统达到 3 倍衍射极限(SR≈0.11)为判断标准，那么 $r_0$ 约为 88 mm 时，AO 系统能够对 $f_G$ 为 80 Hz 的扰动进行校正；$r_0$ 约为 61 mm 时，$f_G=70$ Hz；$r_0$ 约为 41 mm 时，$f_G=60$ Hz；

(3)影响整体 SR 及所能抑制的扰动频率 $f_G$ 的主要因素是所模拟的 $r_0$ 和 S-H 相机帧频。由于测试中所模拟的 $r_0$ 较小，导致 S-H 传感器及变形镜的测量和拟合误差增大；同时受 S-H 相机帧频(测试中为 500 Hz)的影响，AO 系统整体的带宽受限，导致误差抑制带宽偏低，这些都影响了最终的校正效果[4]。

## 5　结　论

本文对一套桌面 97 单元自适应光学系统的性能进行了较为全面的测试，主要包括了精度测试和动态校正能力测试。测试结果显示：理想情况下，AO 系统的展平精度接近 λ/20(λ=632.8 nm)；精密跟踪系统误差抑制带宽在两种反馈控制模式下分别达到 15 Hz 和 39 Hz；高阶校正模式在所模拟的 $r_0$ 偏小的情况下，在不同范围的大气湍流下实现了格林伍德频率 $f_G$ 的稳定校正，取得了很好的图像校正效果。在后续基于高帧频相机 S-H 传感器的实验中需要进一步改进、测试验证。

文中列出了 S-H 传感器信噪比、成像斯特列尔比 SR 等的详细计算方法，并实测了大气相干长度 $r_0$，这些在参考相关文献的基础上可以根据调试需要进行适当调整，这里可供讨论，并可作为其它测试的参考。

## 参考文献：


[1] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* [M]. New York: Oxford University Press, 1998.

[2] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
JIANG W H. Adaptive optical technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(1): 7-13.

[3] 林旭东，薛陈，刘欣悦，等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
LIN X D, XUE CH, LIU X Y, *et al*.. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 337-351. (in Chinese)

[4] ROBERT K T. *Adaptive Optics Engineering Handbook* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2000.

[5] ROBERT K T. *Principles of Adaptive Optics* [M]. Third edition. New York: CRC Press, 2011.

[6] 林旭东，刘欣悦，王建立，等. 137 单元变形镜的性能测试及校正能力实验[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 267-273.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al*.. Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 267-273. (in Chinese)

[7] 林旭东，刘欣悦，王建立，等. 961 单元变形镜研制及性能测试 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601001.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al*.. Development and performance test of the 961-element deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601001. (in Chinese)

[8] 贾建禄，王建立，赵金宇，等. 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(8): 1716-1722.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, *et al*.. Adaptive optical wavefront processor based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1716-1722. (in Chinese)

[9] 贾建禄，王建立，赵金宇，等. 961 单元自适应光学系统波前处理器[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1387-1393.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, *et al*.. 961-element adaptive optical wavefront processor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1387-1393. (in Chinese)

[10] 卫沛锋，刘欣悦，林旭东 等. 自适应光学系统测试中大气湍流的时域模拟[J]. 中国光学, 2013, 6(3):

371-377

WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al*.. Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive-optics system testing [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 371-377. (in Chinese)

[11] RHOADARMER T A, ANGEL J R P. Low-cost, broadband static phase plate for generating atmosphericlike turbulence[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(5): 2946-2955.

[12] BUTLER D J, MARCHETTI E, BAHR J, *et al*.. Phase screens for astronomical multi-conjugate adaptive optics: application to MAPS[J]. *SPIE*, 2003, 4839: 623-634.

[13] **林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定研究[J]. 光子学报**, 2012, 41(5): 511-515.

LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al*.. Study on the flatten calibration of the deformable mirror based on the measurement of the interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 511-515. (in Chinese)

[14] SIVARAMAKRISHNAN A, OPPENHEIMER B R. Deformable mirror calibration for adaptive optics systems[J]. *SPIE*, 1998, 3353: 910-916.

[15] ABREU R, GULLAPALLI S, RAPPOPORT W, *et al*.. Performance evaluation of the SAAO adaptive optics system[J]. *SPIE*, 2000, 3931: 300-309.

[16] **任剑峰, 饶长辉, 李明全. 一种** Hartmann-Shack **波前传感器图像的自适应阈值选取方法[J]. 光电工程**, 2002, 29(1): 1-5.

REN J F, RAO CH H, LI M Q. An adaptive threshold selection method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(1): 1-5. (in Chinese)

[17] Jr LEWIS C R, MARSHALL D P, MARCHIS F, *et al*.. Is that really your Strehl ration? [J]. *SPIE*, 2004, 5490: 504-515.

[18] **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)

[19] SLAVIN A C, WELLS A L, FUGATE R Q, *et al*.. A comparison of three methods of measuring the atmospheric coherence length [J]. *SPIE*, 1997, 3125: 241-249.

[20] **黄宏华, 姚永帮, 饶瑞中. 四孔差分像运动测量大气相干长度的方法研究[J]. 强激光与粒子束**, 2007, 19(3): 357-360.

HUANG H H, YAO Y B, RAO R ZH. Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3): 357-360. (in Chinese)

[21] **饶长辉, 姜文汉, 凌宁, 等. 自适应光学系统对实际大气湍流波前的时域校正效果[J]. 光学学报**, 2001, 21(8): 933-938.

RAO CH H, JIANG W H, LING N, *et al*.. Temporal correction effectiveness of adaptive optical system for light wave atmospheric propagation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(8): 933-938. (in Chinese)

[22] **卫沛锋, 刘欣悦, 林旭东, 等. 自适应光学系统测试中大气湍流的时域模拟[J]. 中国光学**, 2013, 6(3): 371-377.

WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al*.. Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive optics system testing [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 371-377. (in Chinese)

[23] Jr ROBERTS L, NEYMAN C R. Characterization of the AEOS adaptive optics system[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2002, 114: 1260-1266.

**作者简介:**



**林旭东**(1982—), **男, 福建莆田人, 博士, 助理研究员, 2010 年于长春光机所获得博士学位, 主要从事自适应光学波前校正技术的研究**。E-mail: linxudong_82@126.com



**刘欣悦**(1973—), **男, 辽宁大连人, 博士, 研究员, 2006 年于长春光机所获得博士学位, 主要从事自适应光学技术的研究**。E-mail: sirliuxy@sina.com

**(版权所有　未经许可　不得转载)**