

doi:10.3788/gzxb20154407.0701001

自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析

卫沛锋^{1,2}, 卢振武¹, 刘欣悦¹, 林旭东¹, 王亮^{1,2}, 董磊¹, 贾建禄¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:地基大口径望远镜自适应光学系统对空间目标的校正性能相对天文目标明显退化. 为有针对性地优化观测参数, 获取空间目标最佳校正效果, 需要对自适应光学系统对空间运动目标校正性能进行合理地预测. 以波前探测器测量的校正后波前残差为度量标准, 通过对空间目标轨道分析, 推导了空间目标最佳自适应观测仰角的存在和计算方法. 以长春光机所自研的 1.23m 望远镜为例, 分析了空间目标随轨道变化的大气相干长度对空间拟合像差、格林伍德频率对时域拟合像差、目标信号强度对波前测量误差的影响. 结果表明: 时域拟合像差相对空间拟合像差占主要成分; 目标信号强度变化对波前测量误差的影响不大; 目标、轨道、系统参数不同, 对应的最佳自适应观测仰角亦不同. 另外, 通过改变湍流相位板通光尺寸、转速以及光源亮度分别模拟大气相干长度、格林伍德频率以及目标信号强度的变化, 构造了可用于测试自适应光学系统对不同轨道状况空间目标的校正性能的实验系统.

关键词: 自适应光学; 大气光学; 预测模型; 目标; 赝风; 望远镜; 波前

中图分类号: TH743

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0701001-7

Performance Analysis of Adaptive Optical System for Spatial Objectives

WEI Pei-feng^{1,2}, LU Zhen-wu¹, LIU Xin-yue¹,

LIN Xu-dong¹, WANG Liang^{1,2}, DONG Lei¹, JIA Jian-lu¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 China University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The performance of adaptive optical system of a ground-based large telescope when observing spatial objectives degraded comparing with observing astronomical objectives. To adjust the parameters of adaptive optical system purposively, and get the best correction result, it was necessary to predict the performance of adaptive optical system for spatial objectives. Presence of the best observation elevation range for spatial objectives having different orbits was validated by analysis of orbits based on the residual wavefront errors after correction. The corresponding calculation method was also concluded. The effects of the variation of atmospheric coherence length on the spatial fitting errors, Greenwood frequency on the temporal fitting errors, signal intensity on the wavefront measurement errors were analyzed based on the 1.23m telescope made by CIOMP. The result showed that the temporal fitting errors were primary compared to the spatial fitting errors, the wavefront measurement errors could be neglected when signal intensity of the spatial objectives varying, and the best observation elevations were different for different spatial objectives, orbits and telescope systems. An experiment system was constructed to test an adaptive optical system for different spatial objective by changing the aperture diameter of the turbulence phase plate, velocity and the light source intensity to simulate the variation of the atmospheric coherence length, Greenwood frequency and the signal intensity individually.

Key words: Adaptive active; Atmospheric optics; Prediction model; objective; Pseudo-wind; Telescope; Wavefront

OCIS Codes: 010.1080; 110.1080; 110.6770; 010.1290

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2014AAXXX1003X)资助

第一作者: 卫沛锋(1984-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为自适应光学和大气光学. Email: weipeifeng@foxmail.com

导师: 卢振武(1955-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为波动光学、光学设计和光学检测. Email: luzw@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2015-01-15; 录用日期: 2015-04-28

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

为获取天文目标和空间目标的清晰成像,地基望远镜口径变得越来越大,随之而来的大气对望远镜分辨能力的限制,使得自适应光学成为地基大口径望远镜必不可少的技术单元^[1-6].

在实际观测中,目标一般分为两类:方位角和仰角变化较慢的天文目标;变化较快的空间目标.相对天文目标,空间目标的观测,如卫星、火箭残骸等,对自适应光学系统提出了更高的要求;同时,随方位角和仰角快速变化而来的大气相干长度、格林伍德频率以及目标信号强度的剧烈变化使得对空间目标的监视效果相对天文目标严重退化.

David^[7]和阎吉祥^[8]曾做过研究,但均假定目标运动线速度或角速度恒定,与空间目标实际情况不符.李新阳^[9]在研究自适应光学系统的最优控制带宽时,并未考虑变形镜(Deformable Mirror, DM)拟合误差随观测目标的变化.饶长辉^[10]分析了自适应光学系统对实际大气湍流的时域校正效果,但理论分析与实验针对的是运动缓慢的天文目标.郭友明^[11]研究了Kolmogorov湍流下自适应光学系统的修正有效带宽,但实际观测中空间目标的快速运动要求系统带宽也须实时调整,作者并未在这方面给出分析.因此有必要对空间目标实际轨道变化带来的影响进行分析,从而可以有针对性地优化观测参数,获取最佳的观测性能.本文分析了自适应光学系统对空间运动目标的校正性能,建立了空间目标自适应最佳观测仰角的估算模型;同时采用湍流相位板模拟大气湍流,构造了空间目标自适应光学系统校正性能的测试系统,进行了相应的实验验证.

1 自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析

1.1 自适应光学系统对空间运动目标校正性能理论分析

地基大口径望远镜对空间运动目标进行观测时,像差可分为不随时间改变的静态像差,如光学组件加工误差和装调误差等,以及随时间变化的动态像差,如跟踪过程中主镜随仰角变化带来的像差和自适应光学系统校正后波前残余误差.

假定静态像差的影响忽略不计,且对于主镜随仰角变化带来的动态像差,已通过对星标校次镜调焦去除离焦,或通过主动光学校正良好,则这部分动态像差影响可忽略.影响成像效果的主要是自适应光学系统的校正波前残余误差,可表示为^[12]

$$\sigma_s^2 = \sigma_M^2 + \sigma_T^2 + \sigma_F^2 + \sigma_A^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{TR}^2 \quad (1)$$

式中, σ_M 为波前测量误差; σ_T 为时域拟合误差; σ_F 为空间拟合误差; σ_A 为非等晕误差; σ_D 为大气色散误差; σ_{TR} 为残余倾斜误差.

σ_s 主要是以目标图像为判别据,但难以用量化指标进行表征.简便可行的定量指标是波前探测器测量的校正后波前残差 σ_{WFS} .而 σ_M 描述的是波前探测器对畸变波前的测量准确性,并不能在测量值中得到体现;对于自参考并且视场较小的空间目标, σ_A 可忽略;对于可见光到近红外波段的空间目标的监视来讲, σ_D 影响较小,一般不考虑; σ_{TR} 不影响图像分辨率,也不考虑.故 σ_{WFS} 可表示为 $\sigma_{WFS} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_F^2}$.为统一像差度量标准,以nm为单位进行表征.

自适应光学系统波前校正器采用变形镜时, σ_{WFS} 可表示为^[10]

$$\sigma_{WFS} = \left(\alpha_F \left(\frac{d}{r_0} \right)^{5/3} + \kappa \left(\frac{f_G}{f_{3dB}} \right)^{5/3} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{500}{2\pi} \right) \quad (2)$$

式中, α_F 为拟合误差系数; d 为触动物间距投影到望远镜入瞳的尺寸; r_0 为大气相干长度; f_{3dB} 为系统闭环带宽;系数 k 为1; f_G 为格林伍德频率.

相对天文目标,当空间目标绕其轨道快速运行时,对 σ_{WFS} 影响较大的因素有两个:1)随仰角变化的 r_0 对 σ_F 的影响;2)随方位角和仰角变化的 f_G 对 σ_T 的影响.另外,空间目标运行过程中太阳相位角、姿态、大气透过率的变化等都会影响目标信号强度,从而影响 σ_M .为模型简单起见,以视星等作为目标亮度的表征来分析目标信号强度变化对 σ_M 的影响.

空间目标观测过程中,假定湍流强度不随时间变化,影响 r_0 的因素只有天顶角;影响 f_G 的因素有两个:天顶角、随方位角和仰角快速变化而来的阵风效应带来的风速 v . v 可表示为^[6]

$$v(h, \zeta) = c \cdot v_n(h) \sin \zeta + \omega(\zeta) z \quad (3)$$

式中, c 为风向因子(对天文目标来讲, $c=1$;对空间目标来讲, $c=-\cos\alpha$.其中, α 为自然风向与目标运行线速度方向的夹角.); v_n 为自然风速; ζ 为天顶角; ω 为目标角速度; h 为海拔高度; z 为斜距.

综上所述,影响 σ_{WFS} 的因素随空间目标轨道变化不一,因此,可结合空间目标的轨道信息对最佳自适应观测仰角进行估算,从而便于有针对性地调整参数,获取最佳观测性能.

1.2 空间目标最佳自适应观测仰角预测模型

已知

$$r_0 = [0.423k_c^2 u_0 \sec \zeta]^{-3/5} \quad (4)$$

$$f_G = [0.10247k_c^2 v_{5/3} \sec \zeta]^{3/5} \quad (5)$$

式中, k_c 为波数; $u_0 = \int dh C_n^2(h)$; $C_n^2(h)$ 为大气折射率结构常数; $v_{5/3} = \int dh C_n^2(h) v^{5/3}$

σ_{WFS}^2 对仰角 $e = \pi/2 - \zeta$ 求二阶导,可得

$$\frac{\partial^2 \sigma_{\text{WFS}}^2}{\partial e^2} = p \left[m \frac{\partial^2 (r_0^{-5/3})}{\partial \zeta^2} + n \frac{\partial^2 (f_G^{-5/3})}{\partial \zeta^2} \right] \quad (6)$$

式中, $p = (500/2/\pi)^2 > 0$, $m = \alpha_F d^{5/3} > 0$, $n = \kappa f_{3\text{dB}}^{-5/3} > 0$, $\frac{\partial^2 (r_0^{-5/3})}{\partial \zeta^2} = r_0^{-11/3} \left[\frac{40}{9} \left(\frac{\partial r_0}{\partial \zeta} \right)^2 + r_0^2 \sec^4 \zeta \left(1 + \frac{13}{5} \sin^2 \zeta \right) \right] > 0$.

空间目标的角速度多如图 1(a) 所示,不能简单假定为恒定,而是随着角速度的增大而加速增大;对应的格林伍德频率如图 1(b) 所示,变化趋势同角速度类似.由图 1(b) 可知, $\frac{\partial^2 f_G}{\partial e^2} > 0$,故 $\frac{\partial^2 \sigma_{\text{WFS}}^2}{\partial e^2} > 0$.因此,存在一个最佳自适应观测仰角,使得空间目标的 σ_{WFS} 最小.

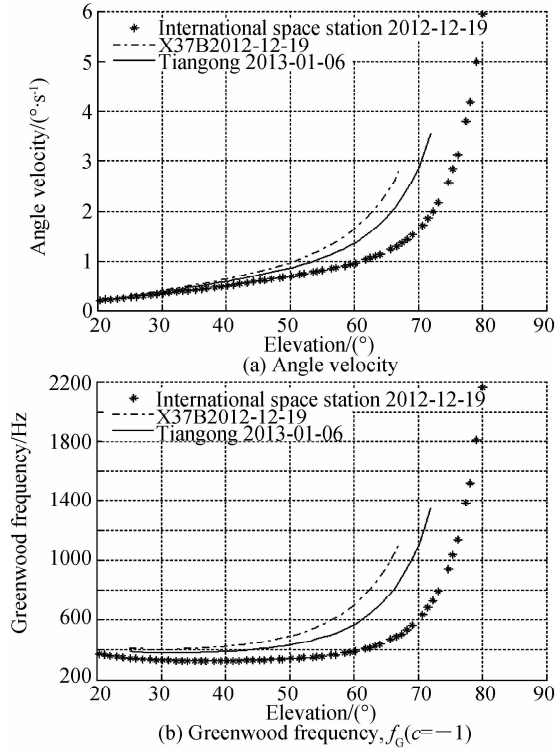


图 1 空间目标角速度及格林伍德频率随仰角的变化

Fig. 1 The variation of the Angle velocity and Greenwood frequency of spatial objectives

空间目标的最佳自适应观测仰角 e_{best} 可通过对

$$\frac{\partial \sigma_{\text{WFS}}^2}{\partial \zeta} = 0 \text{ 求解得到}$$

$$\frac{\partial f_G^{5/3}}{\partial r_0^{-5/3}} = -m/n \quad (7)$$

由于 e_{best} 的解析式难以给出,且可方便获取到空间目标的 r_0 、 f_G 随轨道的变化,因此,依据式(7)可直接求解出空间目标的 e_{best} .

空间目标的 e_{best} 估算的具体步骤如下:1)通过差分像运动监测仪(Differential image motion monitor, DIMM)^[13]或 Shack-Hartmann^[14]估算天顶角处的 r_0 ;2)利用湍流相位功率谱解析^[15]出大气 f_G ,再通过对目标预报轨道的分析,估计湍风引起的 f_G ;3)按式(7)求

取对应的仰角,即为该空间目标该轨道下的 e_{best} .

2 1.23m 望远镜自适应光学系统对空间目标校正性能分析

以 2012 年 12 月 19 日上升阶段国际空间站(International Space Station, ISS)为例,对长春光机所自研的 1.23m 光学望远镜自适应光学系统校正性能进行分析.

ISS 上升阶段对应的 r_0 、 f_G 以及大气透过率 T_A 变化如图 2 所示.可看出, r_0 、 f_G 以及 T_A 均随仰角的增大而增大; T_A 在一般有效观测仰角区域 $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$,变化 0.11.从图 2(b)可看出,有湍风时 f_G 急剧增大;同时,在仰角小于 40 度时,无湍风时的 f_G 相对有湍风时的 f_G 占比大于 16%,其影响并不可忽略.(其中, T_A 利用 MODTRAN 计算,相应计算参数:中纬度冬季,能见度 23km,海拔 200m,波段 $500 \sim 700\text{nm}$)

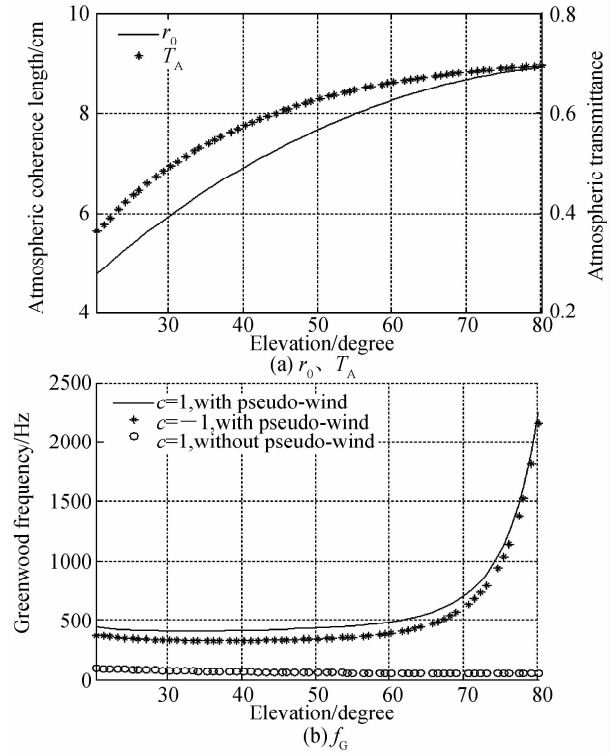


图 2 ISS 上升阶段 r_0 、 f_G 以及 T_A 的变化

Fig. 2 The variation of r_0 、 f_G and T_A of ISS in ascending phase

1.23m 自适应光学望远镜的自适应光学系统采用自研的 21 单元压电陶瓷变形镜;波前探测器采用 Shack-Hartmann;该望远镜能对 6 等星以上亮度的目标进行校正,而空间目标的轨道预报一般不包含亮度信息,为分析空间目标亮度变化对波前测量误差 σ_M 的影响,计算 0~6 等星空间目标的 σ_M .其余计算参数如表 1.

表 1 1.23m 自适应光学望远镜波前误差计算参数
Table 1 The related parameters in calculation of wavefront errors of the 1.23 adaptive telescope

Parameters	Value
Telescope parameters	
Aperture, D/m	1.23
Transmittance of Telescope system, T_0	0.5
Spatial fitting errors	
α_F	0.28
d/m	0.3868
r_0 (zenith, 500 nm)/m	0.09
Temporal Fitting errors	
f_{3dB}/Hz	81.3
Wind velocity model, $v_n/(m \cdot s^{-1})$	Bufton
Refractive index structure constant, $C_n^2(h)$	AMOS night ^[16]
Wavefront Measurement Errors	
Loss factor, K_q	1.3
The dimension of subaperture projected to input pupil, b/m	0.0923
Wavelength range /nm	500~700
Equivalent wavelength, λ_s/nm	632.8
Integration time, t_i/ms	1.98
Transmittance of wavefront sensor, T_w	0.97
Pixels of subaperture, m	64

从图 3(a)中可以看到, σ_F 随仰角增大而减小; 而 σ_T 则相反; 从图 3(b)可看出, 对应 $c = -1$ 和 1 极限 f_c 发生时, 国际空间站的 e_{best} 在 $46^\circ \sim 48^\circ$ 附近; 从图 3(c)可知, 空间目标在观测过程中一般变化 2 个星等亮度^[17]时, σ_M 在 e_{best} 区间波动最大不超过 20 nm, 远小于 σ_{WFS} , 可忽略。

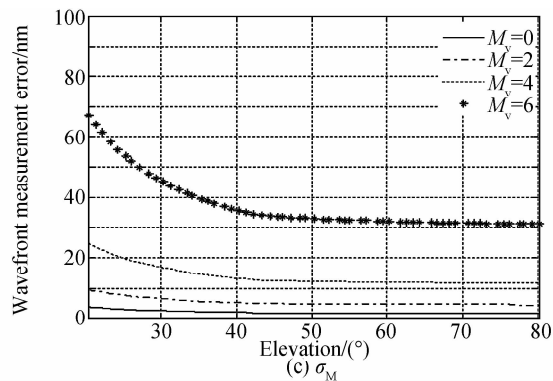
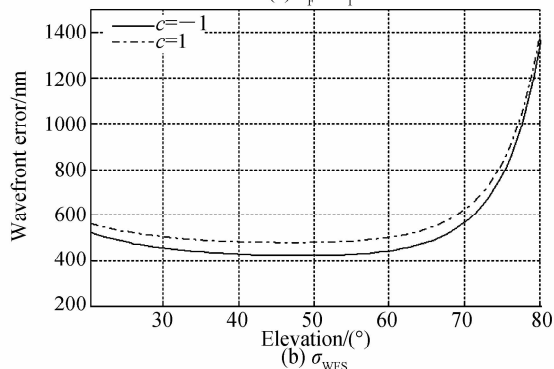
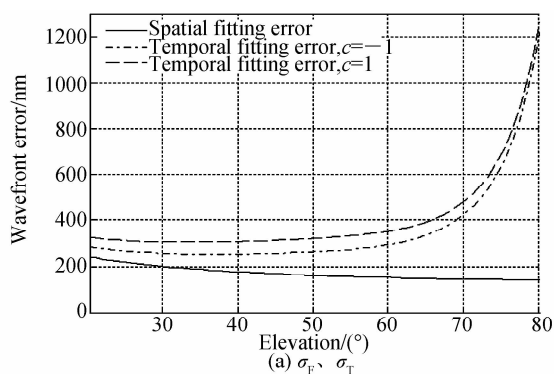
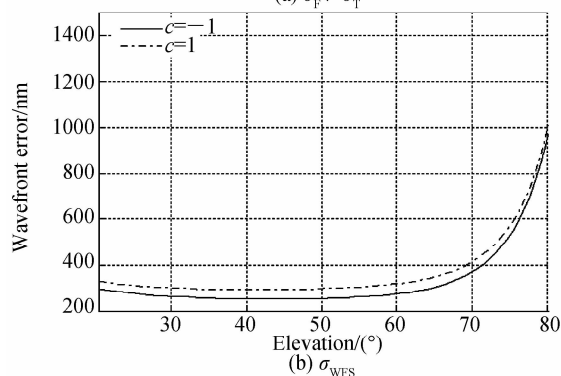
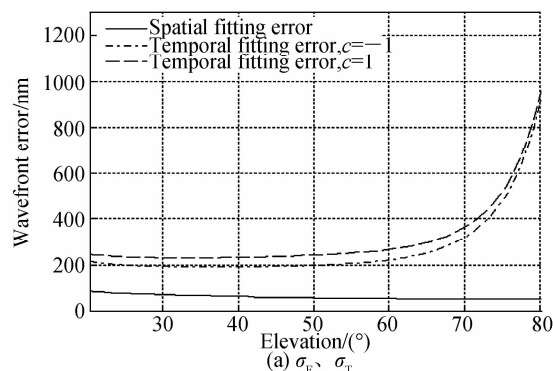


图 3 21 单元变形镜, 1.98 ms 曝光时, ISS 校正性能估计
Fig. 3 The performance estimation of the ISS with 21-elements DM and 1.98ms exposure time

上述分析中, 变形镜单元数过少, 波前探测器帧频也不足, 导致空域和时域欠采样, 最终 σ_{WFS} 过大. 实际工程应用中, 通常使变形镜的单元数通常满足式(2)中的 d 约等于站点天顶角处的 r_0 ; 采用合并像素来减少曝光时间, 提高帧频. 当天顶角 r_0 取 0.11m, 变形镜单元数 97; 波前探测器采用 2×2 合并像素可将曝光时间缩短为 1ms, 闭环带宽可提高到 113.4Hz. 此时对 2012 年 12 月 19 日国际空间站的校正性能估计如图 4 所示. σ_F 、 σ_T 、 σ_{WFS} 以及 σ_M 变化趋势与图 3 类似. 与图 3 对比, 随着空域和时域采样频率的提高, σ_F 、 σ_T 、 σ_{WFS} 数值下降. 但是 σ_M 数值增大, 这是由于合并像素提高时域采样频率是以波前探测器空间采样频率下降为代价. 同时, 对比可知, σ_T 相对 σ_F 在 σ_{WFS} 中占主要比例. 工程实践中, 如何降低 σ_F 是研究的重点.



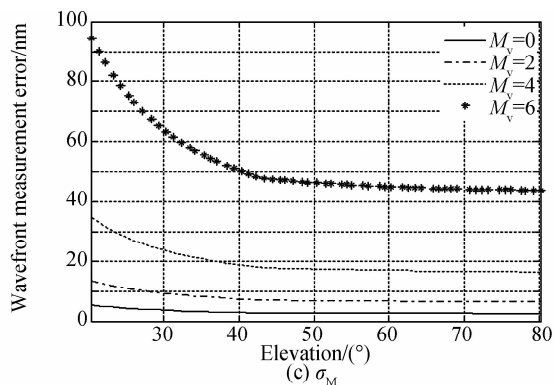


图 4 97 单元变形镜 1 ms 曝光时,国际空间站校正性能估计
Fig. 4 The performance estimation of ISS with 97-elements DM and 1ms exposure time

对其他轨道目标的 e_{best} 估算结果如表 2 所示. 可知,同一目标,不同轨道,对应的 e_{best} 区间不同;不同目标不同;望远镜自适应光学系统参数不同,对应的 e_{best} 区间不同.

表 2 不同目标最佳自适应观测仰角 e_{best} 估算

Table 2 The prediction of e_{best} for different objectives

Spatial objective	e_{best} (degree)	e_{best} (degree)
	Fig. 3	Fig. 4
ISS(2012. 12. 23)	[50. 4, 52. 4]	[42. 2, 47. 2]
ISS(2013. 01. 06)	[35. 3, 37. 3]	[32. 2, 33. 2]
X37B(2012. 12. 19)	[37. 0, 38. 4]	[32. 3, 34. 4]
Tiangong(2013. 01. 06)	[39. 3, 41. 4]	[35, 37. 4]

综上所述可知:对于系统参数固定、轨道既定的空间目标,并不是单纯的仰角越高,观测越好,而是存在一个最佳的观测仰角区间,实际的观测经验也验证了这点.

3 实验模拟与讨论

实验采用从 Lexitek 公司定制的相干长度 0.3 mm (@632.8 nm),相位分布满足 Kolmogrov 湍流理论^[18]的湍流相位板来模拟空间目标运动时的大气湍流^[19].

空间目标 r_0 随仰角的变化可通过改变湍流相位板通光尺寸来实现,从而可以测试自适应光学系统对空间目标的空间拟合像差效果. r_0 变化的原理为

$$\frac{D}{r_0} = \frac{D'}{r'_0} \quad (8)$$

式中, D 为模拟的望远镜的口径; r'_0 为湍流相位板的相干长度; D' 为湍流相位板上的通光孔径尺寸. 空间目标 f_G 的变化可通过调节湍流相位板的转速来模拟,从而可以测试自适应光学系统对空间目标的时域拟合像差效果. f_G 与湍流相位板转速的关系^[20]为

$$f_G = 0.427 \frac{V}{r'_0} \quad (9)$$

式中, V 为通光孔径中心处的线速度. 空间目标亮度变化可通过调节光源的亮度来实现,然后从波前探测器测量的信噪比反演到目标的视星等,从而可以测试自适应光学系统对不同亮度空间目标的校正效果. 由图

3、4 可知,空间目标亮度变化引起的 σ_M 较小,后续实验不再专门模拟.

利用湍流相位板构造的自适应光学系统测试系统光路图如图 5 所示. 白光光纤光源发出的光经过湍流相位板,形成随机波前. 经透镜 L_1 后变为平行光入射到变形镜上,经变形镜反射后经过透镜 L_2 后再经过分光棱镜,反射光进入 CCD 相机成像,透射光经透镜 L_3 准直后进入 Shack-Hartmann 波前探测器. 实物图如图 6.

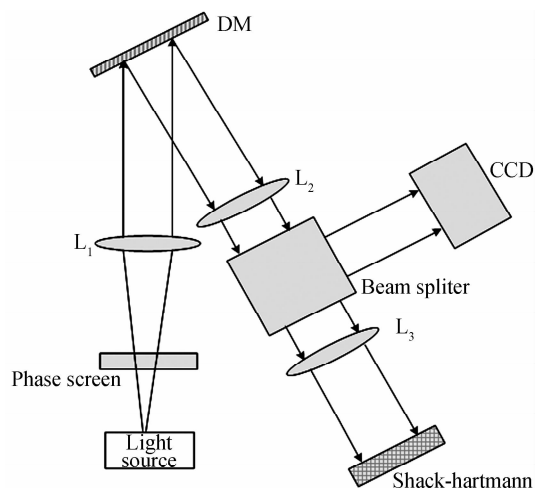


图 5 空间目标自适应光学系统校正模拟实验光路图
Fig. 5 Scheme of the correction simulation of adaptive optics system for spatial objectives



图 6 空间目标自适应光学系统校正模拟实验实物图
Fig. 6 The real object of the correction simulation of adaptive optics system for spatial objectives

对 2012 年 12 月 19 日国际空间站自适应光学系统校正性能影响模拟实验结果为:

1) 空间拟合像差的模拟

由于湍流相位板的通光尺寸有限,这里只对 0.1 m 以上的 r_0 变化进行了模拟. 湍流相位板不转动, f_G 为 0, 此时, Shack-Hartmann 测量到的波前残差即为空间拟合像差结果. 对应的理论估计和实验结果如图 7 所示. 可看出,对国际空间站随仰角变化的空间拟合像差,理论和实验值吻合得基本较好. 些许偏离可能是由于改变通光尺寸时通光孔径内相位分布不同导致的随机误差所引起.

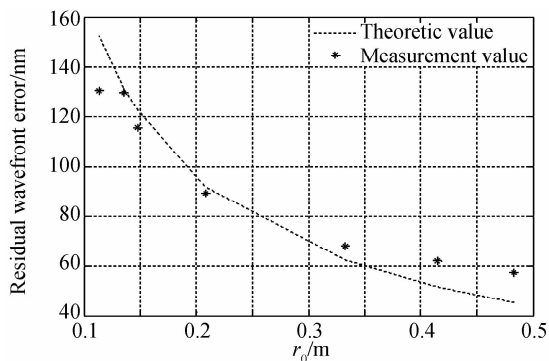


图7 自适应光学系统对国际空间站空间拟合像差结果
Fig.7 The spatial effect of the adaptive optics system for the International Spatial Station

2) 时域拟合像差的模拟

当测试时域拟合像差效果时,通光孔径内 r_0 值固定,空间拟合像差相对固定不变.因此,从波前探测器测量到的波前残差中减去相对固定的空间拟合像差即为模拟的空间目标的时域拟合像差结果. Shack-Hartmann 积分时间 1.98ms,依据香农定理,对于 f_G 超过 250Hz 的波前变化欠采样.因此,为有效采样波前变化,将 f_G 缩放至 250Hz 以内进行理论估计和实验测试,对比结果如图 8 所示.从图中可以看出,随着仰角的增大,模拟的国际空间站校正后时域拟合像差增加;同时,测试的实验结果同理论估计变化趋势吻合较好,但数值存在一定偏差,这可能是由于理论模型的准确性引起.

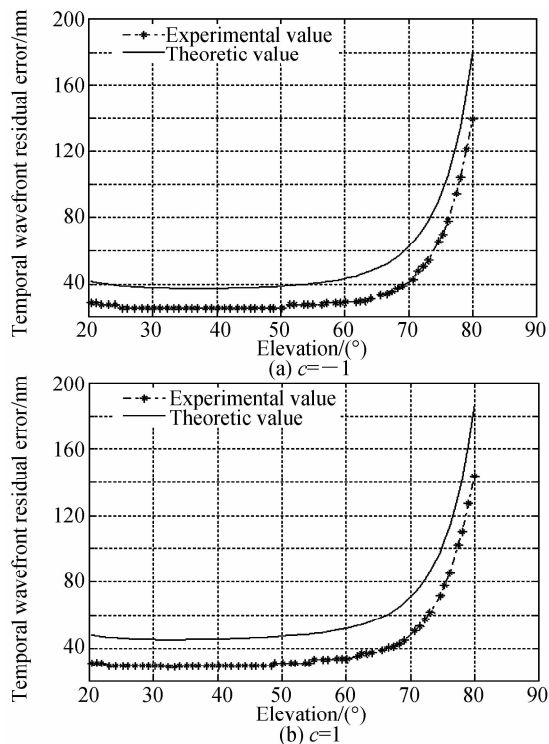


图8 自适应光学系统对国际空间站时域拟合像差结果
Fig.8 The temporal effect of the adaptive optics system for the International Spatial Station

实验可说明,构造的实验系统可在室内对自适应光学系统对不同轨道空间目标的空间和时域校正结果进行合理测试,并据此进行自适应光学系统对空间目标校正性能的预先估计.

5 结论

通过自适应光学望远镜对空间目标进行实际观测时,最关心最佳观测性能的获取.通过自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析,建立了空间目标最佳自适应观测仰角的估算模型.利用该模型,可提前预估观测性能,估算出最佳自适应观测仰角,从而可以针对性地调节曝光时间、增益、闭环带宽等参数,获取最佳观测效果.另外,利用湍流相位板构造了可验证上述模型的测试系统,可在室内评估测试自适应光学系统对不同轨道空间运动目标的校正性能.但该实验的缺陷是无法同时调整大气相干长度和格林伍德频率和亮度,需要分步来实现.

参考文献

- [1] ZHAO Xin, MA Cai-wen. Research on nonsmooth H^∞ control for the adaptive optics system [J]. *Acta Photonica Sinica* [J], 2014, **43**(9):0901003.
赵欣,马彩文.自适应光学系统的非光滑 H^∞ 控制研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9):0901003.
- [2] GUO You-ming, MA Xiao-yu, RAO Chang-hui. Optimal closed-loop bandwidth of tip-tilt correction loop in adaptive optics system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(6): 069502-1-5.
郭友明,马晓燮,饶长辉.自适应光学系统倾斜校正回路的最优闭环带宽[J]. *物理学报*, 2014, **63**(6): 069502-1-5.
- [3] LIU Chao, CHEN Shan-qiu, LIAO Zhou, et al. Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(10):2605-2610.
刘超,陈善球,廖周,等.自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(10):2605-2610.
- [4] LI Da-yu, HU Li-fa, MU Quan-quan, et al. A high-resolution liquid crystal adaptive optics system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):506-508.
李大禹,胡立发,穆全全,等.高精度 LCOS 自适应光学成像系统的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3):506-508.
- [5] LIN Xu-dong, LIU Xin-yue, WANG Jian-li, et al. Flatten calibration of deformable mirror based on the measurement of the interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 511-515.
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.
- [6] LIANG Chun, SHEN Jian-xin, TONG Gui, et al. A self-reference method for measuring Hartmann-Shack wavefront sensor parameter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 780-784.
梁春,沈建新,童桂,等.Hartmann-Shack 传感器机构参数的自基准标定[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4):780-784.
- [7] TYLER D, PROCHKO A. Adaptive optics design for the advanced electro-optical system (AEOS) [R]. 1994, 1-56.
- [8] YAN Ji-xiang, YU Xin, ZHAO Da-zun. Partial correction in temporal domain of adaptive optics [J]. *Optical Technique*, 1995, (3): 2-8.

- 阎吉祥,俞信,赵达尊. 自适应光学的时域部分校正[J]. 光学技术, 1995, (3): 2-8.
- [9] LI Xin-yang, JIANG Wen-han. Analysis of the residual servo variance for an adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1328-1334.
李新阳,姜文汉. 自适应光学系统的控制残余方差分析[J]. 光学学报, 2000, **20**(10):1328-1334.
- [10] RAO Chang-hui, JIANG Wen-han, LING Ning, *et al.* Temporal correction effectiveness of adaptive optical system for light wave atmospheric propagation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):933-938.
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.
- [11] GUO You-ming, MA Xiao-yu, RAO Chang-hui. Modified effective bandwidths of adaptive optical control systems for compensation in Kolmogorov turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **62**(13):134207.
郭友明,马晓燮,饶长辉. 自适应光学控制系统对 Kolmogorov 湍流补偿的修正有效带宽[J]. 物理学报, 2013, **62**(13): 134207.
- [12] TYSON R. Principles of Adaptive Optics[M]. New York: CRC Press, 2011.
- [13] HUANG Hong-hua, YAO Yong-bang, RAO Rui-zhong. Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3):357-360.
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.
- [14] BRENNAN T, MANN D. Estimation of optical turbulence characteristics from Shack Hartmann wavefront sensor measurements[C]. SPIE, 2010, **7816**:781602-1-16.
- [15] LI Xin-yang, JIANG Wen-han, WANG Chun-hong, *et al.* Power spectra analysis of the disturbed wavefront in laser beam horizontal atmospheric propagation II: wavefront phase and greenwood frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8):1035-1042.
李新阳,姜文汉,王春红,等. 激光实际大气水平传输湍流畸变波前的功率谱分析 II: 波前相位与格林伍德频率[J]. 光学学报, 2000, **20**(8):1035-1042.
- [16] SMITH F. The infrared & electro-optical systems handbook [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [17] CHEN Wei-zhen, ZHANG Chun-hua, ZHOU Xiao-dong. A study on luminosity features and signal noise ratio of space target[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(12):716-719.
陈维真,张春华,周晓东. 空间目标的光度特性及其成像信噪比研究[J]. 红外技术, 2007, **29**(12):716-719.
- [18] RHOADARMER T, ANGEL J. Low-cost, broadband static phase plate for generating atmosphericlike turbulence [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(18): 2946-2955.
- [19] THOMAS S. A simple turbulence simulator for adaptive optics[C]. SPIE, 2004, **5490**:766-773.
- [20] WEI Pei-feng, LIU Xin-yue, LIN Xu-dong, *et al.* Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive optics system testing[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(3):371-377.
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.