

瑞利信标非等晕性误差测量试验研究

周文超, 胡晓阳, 云宇, 田小强, 黄德权

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:人造信标为自适应光学大气湍流校正提供信标光源,在天文望远镜、激光传输领域可发挥重要作用,但也存在着一些无法克服的局限性,非等晕性误差就是其一。世界各国对非等晕性误差开展了大量的理论研究工作,但鲜有实际测量试验的公开报道。提出了非等晕性误差的测量方法,详细介绍了自主研发的人造信标非等晕性误差测量系统,采用两路高灵敏度 EMCCD 构成哈特曼波前传感器同时测量瑞利信标回光波前与自然星回光波前,分别开展了 8~18km 高度瑞利信标聚焦非等晕性误差测量试验、12km 信标高度 0~100 μ rad 偏角瑞利信标非等晕性误差测量试验,并获取了较为准确的测试结果。

关键词: 大气光学; 瑞利信标; 非等晕性误差; 波前测量

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1943-07

Experiment research on anisoplanatism errors measurement of Rayleigh beacon

Zhou Wenchao, Hu Xiaoyang, Yun Yu, Tian Xiaoqiang, Huang Dequan

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Synthetic beacon technique provides beacon signal for adaptive optical system, which is used to correct the wavefront aberration caused by atmospheric turbulence successfully in astronomical observation and laser transmission. However, anisoplanatic errors is one of some insuperable difficulties. Many academic research works were studied but there were few reports for experiment measurement all over the world. In this paper, the measurement method of anisoplanatic errors was proposed, and the high precision measurement system was independently designed, which concluded two Hartmann wavefront sensors using high sensitive EMCCD detectors to get the wavefront of Rayleigh beacon and the natural star simultaneity. Two basic experiments were finished, one was focal anisoplanatism errors measurement experiment at the altitude from 8 to 18 km of Rayleigh beacon, another measurement experiment is at the Rayleigh altitude of 12 km with the angle varying from 0 to 100 μ rad between the synthetic beacon and the natural star. The exact and reasonable measurement result is gained.

Key words: atmospheric optics; Rayleigh synthetic beacon; anisoplanatism errors; wavefront measurement

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划

作者简介: 周文超(1978-), 男, 硕士, 主要从事激光参数测量方面的研究工作。Email: zwc0710@hotmail.com

0 引言

在天文观测领域，自适应光学技术通过实时探测并校正动态波前误差，克服了大气扰动的影响，使得光学望远镜恢复了其理想的分辨率^[1]。自适应光学大气位相补偿中的关键问题之一是信标光源^[2]，由于受观测目标亮度以及等晕角条件的限制^[3]，一般没有合适的自然导引星可供使用。激光导引星(又称人造信标)概念的提出和发展，为自适应光学解决了参考源问题^[4]。实现人造信标的技术途径主要有瑞利信标与钠信标两种，目前瑞利信标技术已经较为成熟，在实际工作中得到了较多的应用。

人造信标技术也存在一些局限性，非等晕性误差是其中之一。由于目标光与信标光所通过的大气湍流未必相同，这种差异会给校正带来误差，即是自适应光学(AO)系统的非等晕性误差。非等晕性误差主要包括角度非等晕性、聚焦非等晕性、AO系统时间延迟非等晕性、AO系统色散非等晕等等^[5]，国内外研究人员对这些非等晕性进行了长期大量的研究，获得了较多的理论研究成果。研究表明，角度和聚焦非等晕性是限制 AO 系统性能的主要因素，而对于非等晕性误差实际测量，由于人造信标技术工程实现较为复杂，工作鲜有开展。

分析了人造信标非等晕性误差测量系统的技术要求，介绍了高性能瑞利信标回光波面测量系统，详细介绍了瑞利信标非等晕性测量试验并给出了试验结果，可为深入研究信标理论和人造信标技术提供借鉴。

1 瑞利信标非等晕性误差分析

目标可视为无穷远的光源，所发光沿平行方向进入望远镜接收孔径。来自瑞利信标的光是一个锥体，那么信标上方有未采样的大气湍流，信标下方的锥体以外的大气湍流信息同样没有采样，这两部分湍流引起的校正后剩余误差称为非等晕性误差^[2-3]，如图 1 所示。

经典的 AO 理论对单一的聚焦、角度非等晕误差研究较多。图 1 中 $\theta=0$ 时的情况，瑞利信标光与目标光传播方向相同时，此时的非等晕误差为聚焦非等晕误差，去掉 Zernike 像差的平移项、倾斜项和离焦项后的聚焦非等晕方差为：

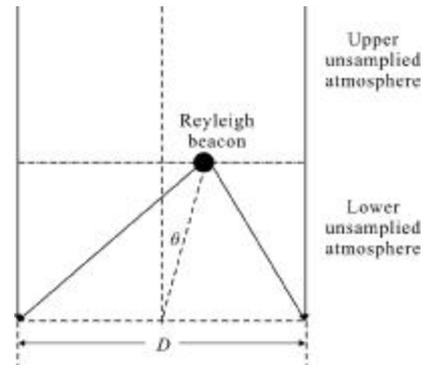


图 1 瑞利信标示意图

Fig.1 Diagram of Rayleigh beacon

$$\sigma_{focal}^2 \approx k^2 D^{5/3} [0.50\mu_{5/3}^-(H)H^{-5/3} - 0.47\mu_2^-(H)H^{-2}] + 0.047k^2 D^{5/3} \mu_0^+(H) \quad (1)$$

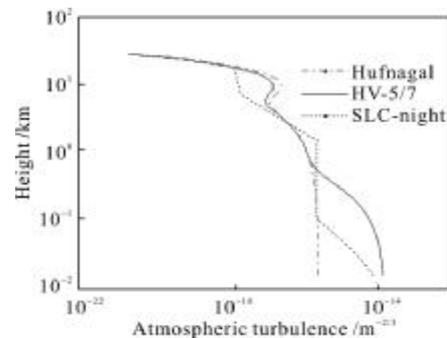
式中： D 为望远镜口径； $k=2\pi/\lambda$ 为波数； H 为信标高度； $\mu_m^+(H) = \int_H^\infty h^m C_n^2(h)dh$ ； $\mu_m^-(H) = \int_0^H h^m C_n^2(h)dh$ ； h 为积分变量； C_n^2 为高度为 h 的折射率结构常数。 C_n^2 代表湍流强度，具体数值依赖当地的地理环境和当时的天气情形。

当图 1 中仅存在由瑞利信标光与目标光传播方向偏差角 θ 引起的非等晕误差，称为角度非等晕误差，去掉了 Zernike 像差的平移项、倾斜项和离焦项后的角度非等晕方差为：

$$\theta_{angle}^2 \approx 2.91k^2 \mu_{5/3}^-(H_c)\theta^{5/3} - 3.5k^2 D^{-1/3} \mu_2^-(H_c)\theta^2 + 0.10k^2 D^{5/3} \mu_0^+(H_c) - 0.0027k^2 D^2 \mu_{-1/3}^-(H_c)\theta^{-1/3} \quad (2)$$

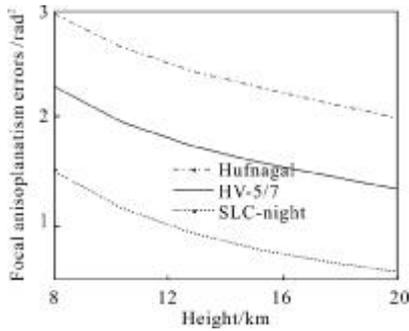
式中： $H_c=D/2\theta$ 。

选择常用的 Hufnagal、HV5/7 及 SLC-Night 大气模型，按照公式(1)和公式(2)对聚焦、角度非等晕误差进行模拟分析，如图 2 所示。



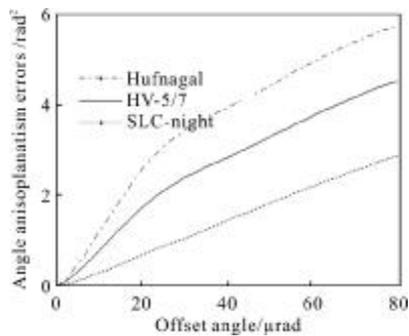
(a) 大气湍流廓线

(a) Atmospheric turbulence mode



(b) 聚焦非等晕方差随高度变化

(b) Focal anisoplanatism errors varying with height



(c) 角度非等晕方差随偏角变化

(c) Angular anisoplanatism errors varying with offset angle

图 2 三种大气模型下非等晕方差

Fig.2 Anisoplanatism of 3 atmospheric turbulence models

实际的 AO 系统可能同时存在聚焦、角度及时间延迟等非等晕误差,并且这几种非等晕误差耦合在一起,一般难以得到解析解或近似解,只有通过数值计算获得结果。

2 非等晕性误差测量系统

通过望远镜在目标星附近发射瑞利信标,可采用共孔径或分孔径进行接收,同时测量自然星回光波面、瑞利信标回光波面,并进行比较,以测量和评价瑞利信标非等晕性,在回光强度合适条件下,逐步改变瑞利信标的发射高度与偏角,可得到瑞利信标非等晕性误差与信标高度、偏角的物理关系。

人造信标回光波面测量一般由望远镜、信标激光器、耦合发射系统、弱光探测系统、时序控制系统等组成。除了对望远镜跟踪探测能力具有一定要求之外,对信标激光器波长、能量、光束质量也有明确要求,同时时序控制系统需要控制信标激光器出光、弱光探测系统采集动作并保证时序上的同步,对弱光探测系统的探测能力、探测精度也有较高的技术

要求。

2.1 非等晕性误差测量系统的技术要求

瑞利信标非等晕误差测量需要两路 Hartmann 波前探测器,以实现自然星回光波面、瑞利信标回光波面的同步测量,在波前探测器灵敏度、波前探测器测试精度、杂光抑制与选通等技术上具有较高要求。

2.1.1 波前探测器灵敏度

对于人造瑞利信标,在满足“点”源条件下,全孔径回光光子数计算为^[6-7]:

$$N_t = \frac{E \lambda \eta D^2 \tau_t \tau_r \tau_a \sigma_n \rho_n \Delta R}{16 h c R^2} \quad (3)$$

式中: N_t 为信标回光全孔径光子数; E 为激光器单脉冲能量; λ 为激光波长; η 为探测器量子效率; D 为望远镜口径; τ_t 为系统发射效率; τ_r 为系统接收效率; τ_a 为单程大气透过率; σ_n 为瑞利散射截面; ρ_n 为高度 R 处的大气密度; ΔR 为散射层取样厚度; h 为 Plank 常数; c 为光速; R 为瑞利信标高度。

哈特曼波前测量系统要保证一定的波前探测精度,子孔径内最小光子数需要满足^[8]:

$$N > 117 (d/r_0)^{5/6} \quad (4)$$

式中: N 为子孔径内回光光子数; d 为子孔径尺度; r_0 为大气相干长度。

实际上,由于探测器件性能的限制,对子孔径光子数的要求更高。在望远镜、激光器等系统参数一定的条件下,应尽可能选用高灵敏度探测器。

2.1.2 波前探测器测试精度

人造信标波前探测对空间分辨率、时间分辨率都有一定要求,子孔径通常取 Fried 相干长度 r_0 的量级^[9],积分时间应该短于波前变化的时间,一般在毫秒以下。

由于要对自然星回光波面、瑞利信标回光波面进行同时测量和比较,两路波前探测器推荐使用完全相同的参数设计。自然星可以看作无穷远的点目标,回光接近平行光束,而瑞利信标高度有限,回光为发散光束,因此瑞利信标波前探测器需要同时保证动态范围和探测精度,通常在瑞利信标回光波前探测器前采用自适应调焦系统将发散光束准直为平行光束再进行测量,这样两路波前探测器可完全相同,严格保持一致的测试精度。

2.1.3 波前探测器杂光抑制与距离选通

信标回光强度较弱, 必须考虑背景杂光的抑制问题, 对于共孔径发射接收光路更是如此, 发射信标激光脉冲时的杂散光和近程高度附近的后向散射光都会使得测量系统波前探测器产生信号饱和, 从而接收不到信标回波有用信号。尽管采用了时间选通技术来抑制噪声, 但是暴露在外的探测器光敏面还会受到影响, 情况严重时还会造成探测器损坏或缩短其寿命。如何解决杂散光的影响是共光路系统必须解决的关键问题。此外, 信标距离的选通必须满足一定的同步控制时序关系。

机械快门装置是研究人员提出的有效措施之一。根据需求可设计机械快门的转动频率达上千赫兹, 机械转盘以稳定转速转动, 在一个周期内, 通过安装在盘片两边的光电开关检测到接通信号, 触发激光器出光, 此时探测器处于转盘遮挡状态, 经过一定延迟时间机械开门, 此时信标回波信号正好经过转盘凹槽进入到探测器曝光, 采样结束后快门关门, 下一个机械快门同步基准信号到来后重复动作。机械快门如图 3 所示。

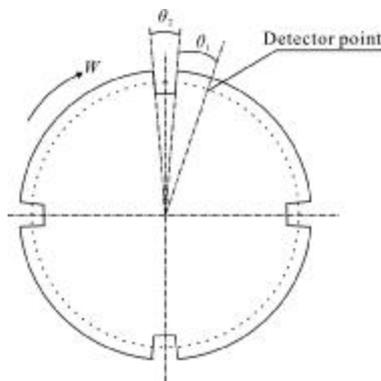


图 3 机械快门示意图

Fig.3 Diagram of mechanical shutter

机械快门有效地遮挡了近程杂光, 基于同步时序关系对选通距离和选通厚度实现精确控制, 也可以结合探测器高精度电子快门进行选通厚度精确控制。瑞利信标所容许的最大散射层厚度满足^[10]:

$$\Delta h = 4.88 \lambda h_0^2 / D r_0 \quad (5)$$

式中: Δh 为选通厚度; λ 为激光波长; h_0 为信标高度; D 为望远镜口径; r_0 为大气相干长度。

2.2 非等晕性误差测量系统

瑞利信标非等晕性误差测量系统结构如图 4 所

示。主扩束器采用卡塞格林望远镜结构, 为保证在 450~650 nm 宽光谱具有高透过率、高像质, 主镜采用抛物面、次镜采用双曲面设计。两块滤光镜对 532 nm 高反, 以实现瑞利信标、自然星回光光谱分光, 自然星回光高透并经反射镜耦合进入自然星回光哈特曼传感器, 反射的 532 nm 信标光入射进入 4F 系统, 在焦点位置安装机械快门装置, 准直后的光束进入信标哈特曼传感器。为保证信标哈特曼传感器测量不同高度瑞利信标波面时高精度、大动态范围的性能, 在信标哈特曼传感器前加入补偿透镜, 减小瑞利信标回光发散程度。

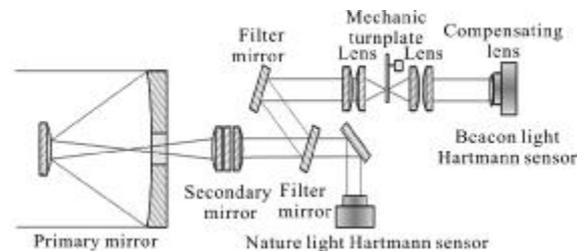


图 4 测量系统示意图

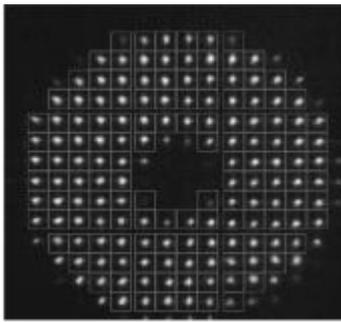
Fig.4 Schematic of measurement layout

两路波前探测器采用完全相同的参数设计, 子孔径阵列为 14×14。机械快门探测到同步基准信号后, 控制信标激光器出光, 并根据发射高度计算两路波前探测器的延时, 信标波面探测器积分时间为 10 μs, 自然星波面探测器积分时间为 400 μs。两路波前探测器同时采集信标回光波面、自然星回光波面, 以实现非等晕性误差的测量和评价。

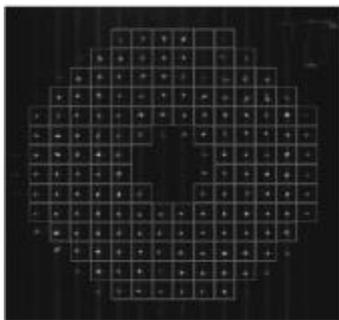
3 试验与测量结果

采用共孔径发射接收模式开展了瑞利信标非等晕性误差测量试验, 主要包括两个试验内容: 在零偏角情况下, 分别发射瑞利信标至 8~18 km, 同时测量瑞利信标波面与自然星波面, 获得瑞利信标聚焦非等晕性误差; 在信标高度为 12 km 条件下, 在 0~100 μrad 偏角范围内同时测量瑞利信标波面与自然星波面, 获得瑞利信标非等晕性误差。

图 5 分别为 8 km 瑞利信标回光、自然星信标回光某同一时刻哈特曼传感器测量得到的点阵图像。瑞利信标高度从 8~18 km, 回光强度逐渐降低, 哈特曼点阵信噪比约从 200 降为 30; 自然星回光哈特曼点阵信噪比约为 80, 可以准确计算哈特曼点阵的质心。



(a) 瑞利信标哈特曼点阵
(a) Synthetic beacon spots

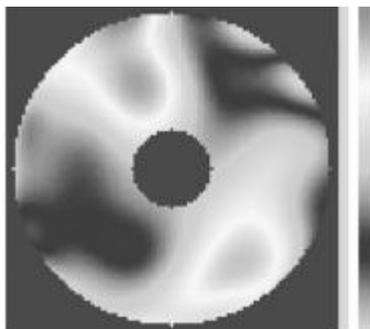


(b) 自然星回光哈特曼点阵
(b) Nature light spots

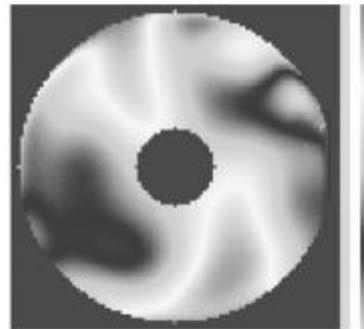
图 5 8 km 瑞利信标和自然星回光哈特曼点阵
Fig.5 Array distribution of 8 km synthetic beacon spots and nature light spots

图 6 分别为 8 km 瑞利信标回光、自然星信标回光某同一时刻测量得到的波面以及两者的位相差(均去除平移项、倾斜项和离焦项),可以看出两者波面空间上具有一定的相关性。

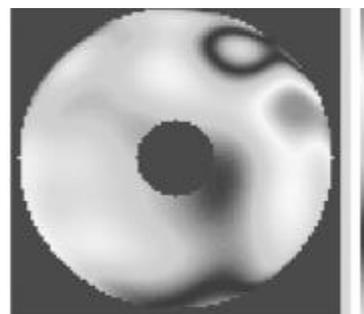
图 7 为测量得到的瑞利信标聚焦非等晕性误差随信标高度的变化曲线,图中同时给出了当地大气模型下的理论计算结果。试验时的大气相干长度约为 9 cm,等晕角约为 7 μ rad。图中可以看出,瑞利信



(a)瑞利信标回光波面
(a) Rayleigh synthetic beacon wavefront



(b)自然星信标回光波面
(b) Nature star wavefront



(c)两者波面之差
(c) Difference

图 6 同一时刻瑞利信标波面、自然星波面以及二者位相差
Fig.6 Wavefront distribution of Rayleigh synthetic beacon and nature star and phas difference at ame time

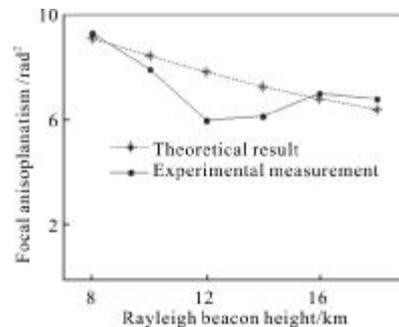


图 7 非等晕性方差与瑞利信标高度变化关系的测量结果
Fig.7 Test result of focal anisoplanatism varying with Rayleigh beacon height

标在 8 km 高度时对应的非等晕性方差约 9 rad²,随着信标高度的提升,瑞利信标聚焦非等晕性误差总体上呈减小趋势,基本符合物理规律。曲线上 16 km、18 km 测试数据大于 14 km 测试结果,经分析与试验时大气参数客观变化、信标高度提升后子孔径信噪比下降引起测量误差增大等因素有关。

图 8 为在 12 km 高度不同偏角下测量得到和理论计算的非等晕性误差。可以看出,随着瑞利信标偏

角的增大,瑞利信标非等晕性误差总体上呈上升趋势,基本符合物理规律,经过与大气参数对比分析,个别数据点“背离”规律与试验时大气条件的客观变化有关。

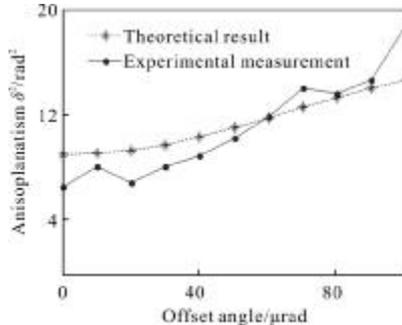


图 8 瑞利信标 12 km 高度不同偏角非等晕性方差测量结果

Fig.8 Test result of anisoplanatism varying with offset angle

图 9 为瑞利信标 12 km 高度, 50 μrad 偏角的瑞利信标波面、自然信标波面和两者之差的各阶 Zernike 系数方差,可以看出非等晕方差主要集中在前 30 阶。

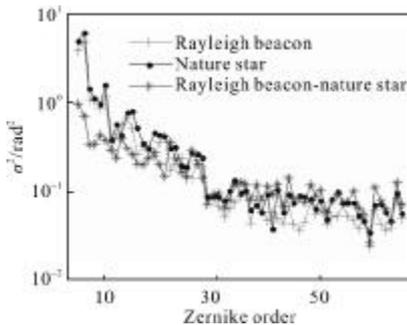


图 9 Zernike 各阶系数非等晕方差分量

Fig.9 Different zernike modal decomposition of anisoplanatic errors

为评估非等晕性误差对望远镜成像的影响,把瑞利信标波面与自然星波面差进行了远场变换,得到了积分帧的远场光斑如图 10 所示,光斑的峰值

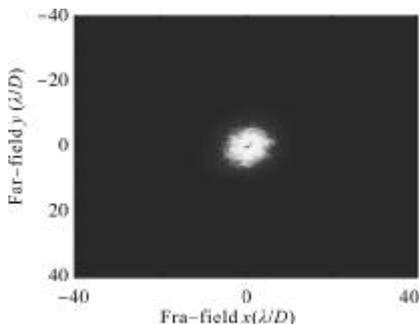


图 10 非等晕性误差的远场积分光斑

Fig.10 Integral far-field by anisoplanatic errors

Strehl 比为 0.062,半高全宽 FWHM 为 $4.97\lambda/D$,可见瑞利信标非等晕误差对望远镜成像效果影响较大,不容忽视。

4 结论

分析了瑞利信标非等晕性误差,介绍了瑞利信标非等晕性误差测量系统的技术设计,开展了瑞利信标高度 8~18 km、偏角 0~100 μrad 范围内非等晕性误差的测量试验,获得了高分辨瑞利信标回光波面与非等晕性误差定量结果,评估了非等晕性误差对于成像观测的影响。

参考文献:

- [1] Zhou Yu, Xiong Yaoheng, He Shaohui. Analysis of a rotating shutter for the laser guide stars of the adaptive optics system on the YNAO 1.2 m telescope [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2011, 8 (2): 192-195. (in Chinese)
周钰,熊耀恒,何少辉.基于 1.2 m 望远镜自适应光学系统激光信标转盘式机械快门的研究[J].天文研究与技术, 2011, 8(2): 192-195.
- [2] Wang Yingjian. Anisoplanatism in adaptive optics using synthetic beacons[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(2): 195-198. (in Chinese)
王英俭.人造信标自适应光学系统中的非等晕性[J].强激光与粒子束, 1995, 7(2): 195-198.
- [3] Zhou Yu, Xiong Yaoheng. Analysis of anisoplanatic errors in adaptive optical systems based on natural guiding stars[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2009, 6(1): 8-11. (in Chinese)
周钰,熊耀恒.基于自然引导星的自适应光学系统非等晕性分析[J].天文研究与技术, 2009, 6(1): 8-11.
- [4] Shen Feng, Jiang Wenhan. Model decomposition of anisoplanatic error of atmospheric turbulence for a laser guide star [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23 (3): 348-355. (in Chinese)
沈锋,姜文汉.激光导引星大气湍流波前非等晕性误差的像差模式分解[J].光学学报, 2003, 23(3): 348-355.
- [5] Chen Jingyuan. Geometric anisoplanatism of adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 922-927. (in Chinese)
陈京元.自适应光学系统的几何非等晕性 [J].光学学报, 2010, 30(4): 922-927.

- [6] Zhang Wei, Luo Zhongxiang, Xiang Rujian. Wavefront measurement of artificial beacon [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3): 375-377. (in Chinese)
张卫, 雒仲祥, 向汝键. 人造信标波前测量[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(3): 375-377.
- [7] Yan Jixiang, Yu Xin. Laser energy of sodium guide stars required for adaptive telescope [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1996, 16(6): 616-620. (in Chinese)
阎吉祥, 俞信. 自适应光学人造钠导星对激光能量的要求[J]. *北京理工大学学报*, 1996, 16(6): 616-620.
- [8] Su Yi, Wan Min. *High Energy Laser System* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 219-222. (in Chinese)
苏毅, 万敏. *高能激光系统* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 219-222.
- [9] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and short exposures [J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [10] Xiong Yaoheng. Laser guide stars for adaptive optical systems[J]. *Progress in Astronomy*, 2000, 18(1): 1-8. (in Chinese)
熊耀恒. 用于自适应光学系统的激光引导星[J]. *天文学进展*, 2000, 18(1): 1-8.