

偏振滤波白天抑制天光背景作用分析

张锐进^{1,2,3} 鲜浩^{1,2} 饶长辉^{1,2} 张学军^{1,2} 张昂^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 由于天文观测领域大部分自适应光学系统只能在夜晚工作,提出了采用偏振滤波技术抑制天光背景的办法以达到白天探测微弱星体目标的目的。介绍了偏振滤波的原理并估算了抑制天光背景的效果,通过观测角度关系得到了偏振方位角的计算公式,并在丽江观测站 1.8 m 望远镜自适应光学系统平台上进行实验,给出了消像旋模型。实验结果表明,偏振滤波技术能有效抑制天光背景,提高星体目标探测能力,一定程度上提高了自适应光学系统在白天探测弱小星体目标的可能性。

关键词 自适应光学; 偏振滤波; 星体探测; 白天工作

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0501003

Study on Effect of Polarization Filter for Suppressing Sky Background Light in Daytime

Zhang Ruijin^{1,2,3} Xian Hao^{1,2} Rao Changhui^{1,2} Zhang Xuejun^{1,2} Zhang Ang^{1,2}

¹ Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Most of adaptive optics systems work in nighttime. Polarization filter technique is applied to suppress sky background for detecting the weak objects in daytime. The theory of polarization filter is introduced. Different kinds of polaroid sheets are placed between the adaptive optics system and the secondary mirror of 1.8 m telescope in Lijiang observation station. Experimental results indicate that polarization filter technique can suppress sky background light effectively and improve the detectability of adaptive optics system. It is shown that polarization filter technique can be used for observing the stellar stars in daytime.

Key words adaptive optics; polarization filter; celestial body detection; daytime working

OCIS codes 010.1080; 120.5410; 010.1290

1 引言

自适应光学(AO)经过 30 年的不断发展,理论探索和工程应用均已日臻成熟,在天文观测高分辨率成像、激光光束质量改善和医疗等领域都取得了成功的应用^[1~6]。但是在天文观测领域,大部分 AO 系统只能在夜晚条件下工作,如果能将观测时段扩展到晨昏线甚至到白天,将大幅提高观测的工

作效率,对天文观测意义重大。

国内外学者研究了在白天强天光背景条件下如何更好地探测天体目标的方法。Beckers 等^[7]做过一些在白天应用 AO 系统的探索工作,研究了基于超窄带滤波技术的主动波前探测技术,但这在控制上有一定难度。Gonglewski 等^[8]讨论了视场光阑对天光背景的限制问题,但对于白天强背景条件下

收稿日期: 2011-11-15; **收到修改稿日期**: 2011-12-09

作者简介: 张锐进(1984—),男,博士研究生,主要从事大气自适应光学方面的研究。E-mail: zhangruijin@gmail.com

导师简介: 鲜浩(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术与系统研制等方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn

波前探测,效果不是很明显。中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室于2006年提出了“视场偏移原理”的概念并建立了一套白天AO实验系统,但并未对实际天光进行探测^[9~11]。因此,需进一步研究消除天光背景的方法,有效增强目标信号对比度,降低背景噪声的影响,从而延长AO系统的工作时段。

晴朗的天空由于大气散射的作用,存在明显的偏振特性,而大部分星体目标的偏振态可以忽略不计,因此可以采用偏振滤波技术提高目标信号的探测对比度^[12]。本文介绍了偏振滤波技术的原理,并利用丽江观测站1.8 m望远镜AO系统进行了实验验证。实验结果表明,采用偏振滤波技术可以提高AO系统在白天时段的探测能力,提升了AO系统在白天工作的能力。

2 偏振滤波原理

天光背景偏振的产生是由于大气的散射^[13,14],对于Rayleigh粒子散射而言,在入射光为自然光的条件下有偏振度 $P(\theta)$,可表示为

$$P(\theta) = \frac{1 - \cos^2\theta}{1 + \cos^2\theta} = \frac{\sin^2\theta}{1 + \cos^2\theta} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

式中 θ 为散射角, I_{\max} 为透过偏振片的最大光强, I_{\min} 为透过偏振片的最小光强。从(1)式中可看出,在散射角为 90° 和 270° 时偏振度为100%,在散射角为 0° 和 180° 时无偏振,其他位置是部分偏振光。然而由于分子和粒子的多次散射以及地表的反射,不会有偏振度为100%的点出现。因此,可以把(1)式等效为^[15]

$$P(\theta) = \frac{\sin^2\theta}{1 + \cos^2\theta} P_{\max}, \quad (2)$$

式中 P_{\max} 为偏振最强天区的偏振度。从(2)式中可看出,偏振度只与散射角有关,并且以 180° 为一个周期。对于晴朗无云天空,在散射面与太阳入射光夹角为 90° 的位置上,观测到的偏振度值最大,最强可达到60%以上。一般来说,恒星目标偏振度可以忽略不计。偏振滤波的原理就是利用天光背景和星体目标的偏振特性的差异,调整光路中偏振片的透光轴,使之与背景偏振光的短轴平行,在保留一半星体目标能量的同时,滤除大部分的背景光。因此,偏振滤波技术的关键是计算观测天区天光的偏振方向,即偏振方位角。图1是星体观测角度示意图。其中 O 为观测点位置, S 为太阳位置, G 为观测天区,

θ 是散射角, h_G 是目标高度角, h_S 是太阳高度角, A_S 是太阳方位角, A_G 是目标方位角, ψ 是偏振方位角。

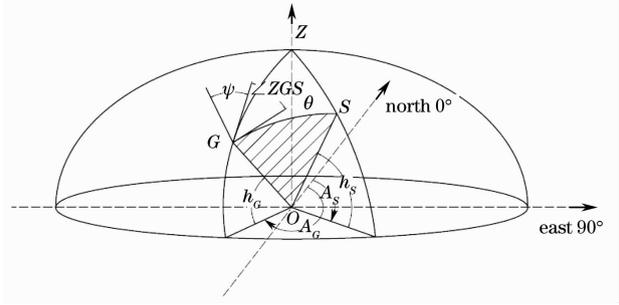


图1 星体观测角度示意图

Fig. 1 Angle schematic diagram of star observation

利用图1所示各点之间的角度关系计算偏振方位角 ψ ,在球面三角形ZGS中,由球面三角形的正弦定理可得^[15]

$$\frac{\sin\angle ZGS}{\sin(90^\circ - h_S)} = \frac{\sin(A_G - A_S)}{\sin\theta}, \quad (3)$$

即

$$\frac{\sin(90^\circ - \psi)}{\sin(90^\circ - h_S)} = \frac{\sin(A_G - A_S)}{\sin\theta}, \quad (4)$$

变换可得

$$\cos\psi = \frac{\sin(A_G - A_S)}{\sin\theta} \cos h_S, \quad (5)$$

式中 θ 是 G 点的散射角,即 $\angle GOS$,可以通过下式计算得到:

$$\cos\theta = \sin h_G \sin h_S + \cos h_G \cos h_S \cos(A_G - A_S). \quad (6)$$

由(5)式和(6)式得到偏振角 ψ ,并由(2)式和(6)式得到偏振度 P 。

根据(1)式,可以得到目标信号对比度和偏振度之间的关系如图2所示。当天光背景偏振度为60%时,目标信号对比度可达到初始对比度的4倍。

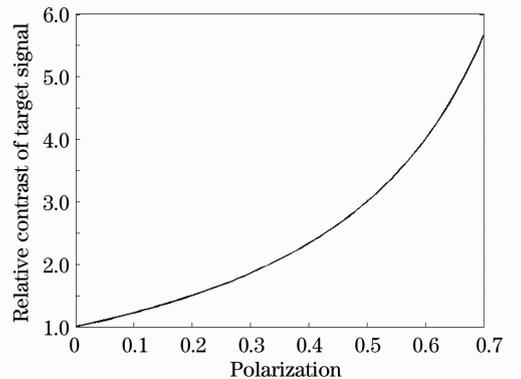


图2 目标信号相对对比度和背景偏振度的关系曲线

Fig. 2 Curve of the contrast between object and sky background versus P

3 实验与结果分析

实验在丽江观测站 1.8 m 望远镜 AO 系统上进行,图 3 是系统光路图,偏振片位于哈特曼传感器之前,用电控旋转装置装载偏振片,偏振片的旋转角度控制程序采用 VC 编写,程序界面如图 4 所示, TM 表示倾斜镜, DM 表示变形镜。

由于光学系统是折转光路,光通过各元器件时会使原始天光的偏振态发生改变。为了验证折转光路对偏振光的影响,先期实验中通过选择不同的观测区域、不同高度角和方位角的目标进行探测发现,到达哈特曼传感器和成像 CCD 的光偏振轴随入射光偏振轴的变化而变化,而实验过程中发现,最大的偏振轴误差来源于望远镜本身在观测不同方位角和高度角目标时产生的像方视场旋转。由于 1.8 m 望远镜系统是地平式结构,且 AO 成像系统位于库德光路,因此当望远镜指向不同的方位角和高度角时,成像 CCD 靶面在望远镜入瞳(即望远镜主镜)上的投影是随方位角和高度角的变化而旋转的,即存在像方视场旋转,在实验开始之前必须做消旋处理。

望远镜调试小组通过实验的方法得到 1.8 m 望远镜的消旋模型^[16]。具体计算方法为:假定初始像的参考位置为 (A_0, E_0) ,则望远镜位于任意方位角 A 和高度角 E 时在哈特曼传感器 CCD 上引入的像方视场旋转的大小为 $(A - A_0) - (E - E_0)$,方向为顺时针方向,成像传感器 CCD 上引入的像旋大小相同,方向为逆时针方向。在消除了望远镜自身的像旋以后,光的偏振轴变化规律与公式计算结果基本相符。

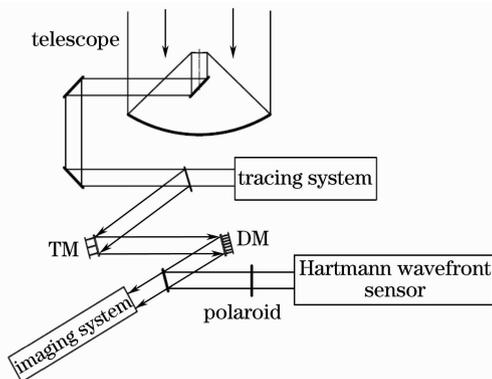


图 3 AO 系统光路图

Fig. 3 Schematic diagram of AO system

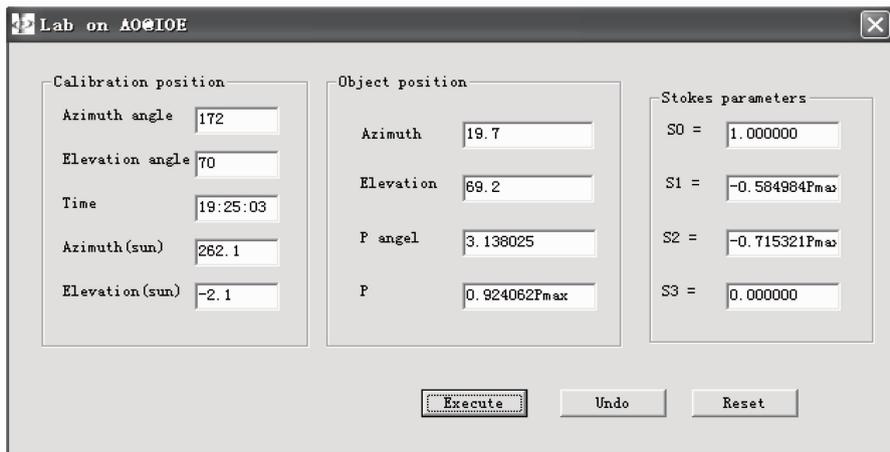


图 4 程序界面

Fig. 4 Interface of control program

需要说明的是,在图 4 的控制程序界面中,“Calibration position”是在实验之前为了消除望远镜系统像方视场旋转而标定的偏振片零点的位置,“Azimuth (sun)”,“Elevation (sun)”和“Object position”为所示时间的太阳和目标所在位置,通过(5)式计算出偏振角。为了正确控制旋转角度,“P angel”是消像旋以后的偏振方位角,即电机驱动偏振片旋转的角度,并非观测天区背景光的真实偏振方位角。用公式法来计算不能直接得到偏振度,只能得到此处偏振度与最强偏振天区的偏振度 P_{\max} 的比较值。

1.8 m 望远镜是 AO 天文望远镜,与普通天文望远镜相比,其 AO 系统能够有效地校正大气湍流带来的波前畸变。AO 系统结构如图 5 所示,目标光通过湍流大气进入望远镜系统,此时获得的像是模糊不清的,在 AO 系统中,波前传感器实时探测出波前畸变,此信号经波前控制器处理后产生出控制信号加到波前校正器上,产生与所探测到的波前畸变大小相等符号相反的波前校正量,使目标光波前由于受到大气扰动而产生的畸变得实时补偿,从而获得接近衍射极限的成像质量。1.8 m 望远镜 AO 系统的波前校正器有倾斜镜和变形镜,波前传

传感器选择应用普遍的哈特曼波前传感器,它将光束孔径划分成许多子孔径,测量波前相位斜率并利用波前复原算法计算出波前相位误差。作为 AO 校正波前的第一步,子孔径的波前测量是关键,如果进入子孔径的目标光受到的大气扰动过大,将导致波前控制器的响应带宽不够从而影响校正的光束质量,本文采用偏振滤波的目的是在自适应校正之前提高光束质量,减轻 AO 系统的校正压力。

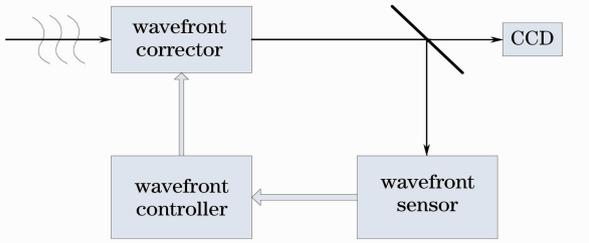


图 5 AO 系统组成

Fig. 5 Components of AO system

实验开始时间为 2011 年 4 月 8 日 19 点 40 分,此时太阳位置为 $(278.5^\circ, -1^\circ)$,探测的星体目标为 Alhena,星号 HIP31681,星等 1.93 等,位置为 $(229.5^\circ, 74.7^\circ)$,与太阳位置夹角是 81° ,在整个观测过程中星体目标所在天区偏振度在 $0.9P_{\max}$ 以上。实验具体步骤:首先通过捕获、粗跟踪和精跟踪三级跟踪探测使目标进入哈特曼波前传感器,当然进入哈特曼波前传感器的还有天光背景,此时控制偏振片旋转到偏振滤波最强位置,并闭环倾斜镜校正倾斜像差,使目标信号较稳定地出现在子孔径中,如图 6(a) 所示;通过调整阈值,使子孔径中的暗噪声和背景光刚好消失,如图 6(b) 所示;旋转偏振片至垂直位置,由于对天光背景的抑制作用消失,子孔径中重新出现背景光,以致 AO 系统无法闭环,如图 6(c) 所示;不改变任何阈值设置,随着时间推移,太阳高度角减小,天光背景绝对亮度随之变弱,子孔径中的背景光再一次恰好消失,如图 6(d) 所示。

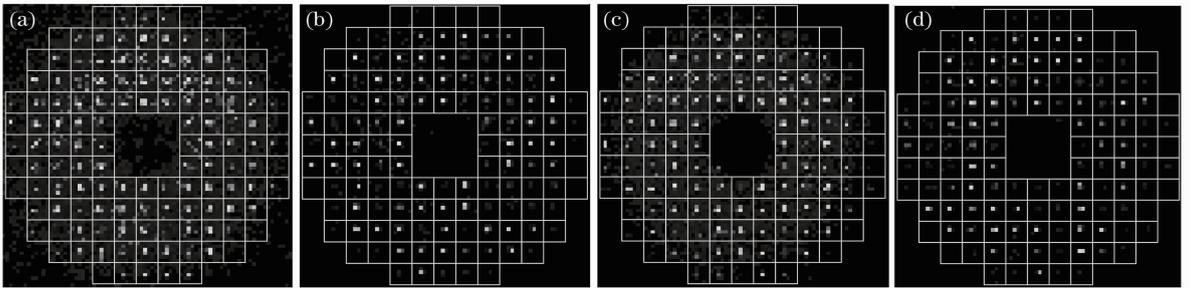


图 6 子孔径图像各时间点截图

Fig. 6 Images of sub-aperture at different time

在图 6 中,图 6(a) 为 19 时 41 分截图,图 6(b) 为 19 时 43 分截图,图 6(c) 为 19 时 45 分截图,图 6(d) 为 19 时 52 分截图。图 6(d) 与 (b) 类似,但由于偏振片旋转角度不同,两者时间差了 9 min,期间太阳高度角变化了近 2° ,这一定程度上说明了偏

振滤波抑制天光背景的作用。

实验中还对该天区的偏振度进行了测量计算,旋转偏振片得到最大和最小的透射光强,利用(1)式,得到偏振度 P 。为了更好地测量 1.8 m 望远镜 AO 系统所测得的天区最大偏振度,实验中并未选

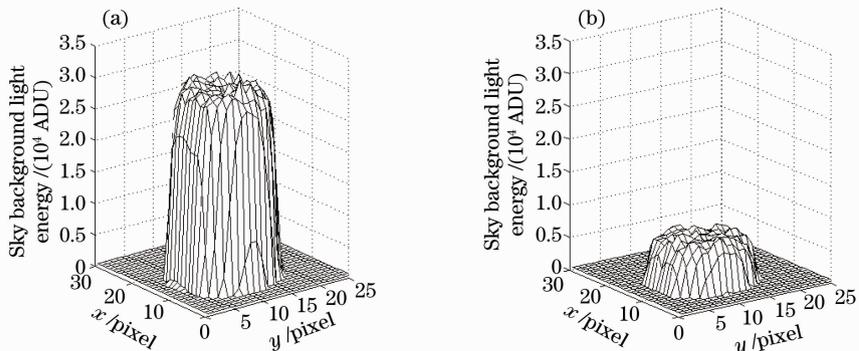


图 7 天光背景(a)最大透过光强和(b)最小透过光强比较

Fig. 7 Comparison of the (a) maximal and (b) minimal transmitted light of sky background

择星体目标,而是对某一天区位置进行探测,实验时间为2011年4月21日20点01分到20点02分,太阳位置为 $(282^\circ, -3^\circ)$,目标天区位置为 $(4^\circ, +56^\circ)$,CCD相机曝光时间10 ms,相机增益2688.根据(2)式计算,此天区天光背景偏振度为 P_{\max} ,为天空最强偏振位置.实验通过计算偏振角位置,快速测量背景光最大和最小透过光强,所得背景光强如图7所示.实验测得原始天光背景光强平均为65000ADU(ADU为数字CCD读出的单位数),背景光通过偏振片时,最大透过光强平均为31000ADU,最小透过光强平均为7500ADU,由(1)式得到偏振度 $P = \frac{31000 - 7500}{31000 + 7500} = 61\%$,基本符合对天区中最大偏振度的理论分析.

4 结 论

本文介绍了偏振滤波技术的原理,给出了观测天区偏振方位角的计算模型,并基于此模型编写VC程序控制步进电机以旋转偏振片到正确位置.在晨昏线进行了偏振滤波星体探测实验,给出了1.8 m望远镜消像旋的计算模型,排除了像旋作用对偏振方位角计算精度的影响,展示了偏振滤波对天光的抑制效果,计算了1.8 m望远镜所测得的天区最大偏振度,计算结果符合理论分析.理论和实验结果表明,在晨昏线时间段利用偏振滤波技术有效地提高了星体目标探测能力,增加了AO系统在白天探测弱小星体目标的可能性.

参 考 文 献

- Jiang Wenhan, Li Mingquan, Tang Guomao *et al.*. Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(1): 15~20
- Jiang Wenhan, Xian Hao, Yang Zeping *et al.*. Applications of Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 228~235
姜文汉, 鲜浩, 杨泽平等. 哈特曼波前传感器的应用[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 228~235
- Jiang Wenhan, Li Huagui, Huang Shufu *et al.*. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. *SPIE*, 1990, **1271**: 81~93
- Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Temporal power spectra analysis of low-order modes of atmospheric turbulence wavefront[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1223~1230
饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 大气湍流波前低阶模式的时间功率谱分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1223~1230

- Shen Feng, Jiang Wenhan. Modal decomposition of anisoplanatic error of atmospheric turbulence for a laser guide star[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 348~355
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
- Rao Changhui, Shen Feng, Jiang Wenhan. Analysis of closed-loop wavefront residual error of adaptive optical system using the method of power spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 68~73
饶长辉, 沈锋, 姜文汉. 自适应光学系统波前校正残余误差的功率谱分析方法[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 68~73
- J. M. Beckers, A. Cacciani. Using laser beacons for daytime adaptive optics[J]. *Experimental Astronomy*, 2001, **11**(2): 133~143
- J. D. Gonglewski, R. G. Highland, D. C. Dayton *et al.*. Daylight imaging through atmospheric turbulence[C]. *SPIE*, 1996, **2827**: 152~161
- Li Chaohong, Xian Hao, Rao Changhui. Field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics system[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(19): 2821~2823
- Li Chaohong, Xian Hao, Jiang Wenhan *et al.*. Analysis of wavefront measuring method for daytime adaptive optics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 4289~4296
李超宏, 鲜浩, 姜文汉等. 用于白天自适应光学的波前探测方法分析[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 4289~4296
- Li Chaohong, Xian Hao, Jiang Wenhan *et al.*. Field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 22
李超宏, 鲜浩, 姜文汉等. 用于白天自适应光学的视场偏移哈特曼波前传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(2): 22
- Y. Y. Hassebo, B. Gross, M. Oo *et al.*. Polarization-discrimination technique to maximize the lidar signal-to-noise ratio for daylight operations [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(22): 5521~5531
- Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Star observation based on polarization information in daytime[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 222~226
叶松, 方勇华, 孙晓兵等. 一种基于偏振信息的恒星白天观测方法[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(3): 222~226
- Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(1): 111~115
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1): 111~115
- Zhao Kaichun, Chu Jinkui, Yao Hongyi *et al.*. Simulation and prediction for Rayleigh skylight polarization distribution[J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(s1): 288~291
赵开春, 褚金奎, 姚弘轶等. Rayleigh大气天空光偏振分布仿真与预测[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, **39**(s1): 288~291
- Ju Qinghua, Xiong Yaoheng. Study on field of rotation of 1.2 m alt-az telescope and elimination of image-rotation [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(3): 259~263
鞠青华, 熊耀恒. 1.2 m地平式望远镜视场旋转研究与消旋[J]. *天文研究与技术*, 2008, **5**(3): 259~263