

大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响

柳光乾^{1,2} 杨 磊¹ 邓林华^{1,2} 李银柱¹ 刘 忠¹

(¹ 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 讨论了由大气湍流造成的望远镜导行误差, 这一误差将给望远镜光电导行的精度带来较大影响。其中使用单点源目标的导行精度受限于大气相干长度和大气相干时间, 而多点源目标及面源的导行精度还与湍流随高度的变化有关。通过分析和仿真(数值模拟)结果表明, 现代天文观测必须考虑大气湍流对光电导行精度的影响。通过延长曝光时间可以有效降低湍流大气的影响, 同时也降低了光电导行的反馈控制频率。当导行信标为多星或面源则可在一定程度上降低高层大气湍流带来的光电导行误差, 从而可以适度减少光电导行曝光时间, 提高其反馈控制频率。

关键词 大气光学; 天文望远镜; 跟踪精度; 大气相干长度; 等晕区; 数值模拟

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0101002

Influence of Atmospheric Turbulence on the Accuracy of Astronomical Telescope Auto-Guiding System

Liu Guangqian^{1,2} Yang Lei¹ Deng Linhua^{1,2} Li Yinzhu¹ Liu Zhong¹

(¹ Yunnan Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Telescope guiding error caused by atmospheric turbulence is discussed, which affects significantly the accuracy of telescope auto-guiding system. Guiding precision of a single point source target is limited by the atmospheric coherent length and coherent time, and several point source targets and extended celestial bodies guiding precision also have relation to the turbulence height. Furthermore, analysis and simulation (numerical simulation) results show that modern astronomical observations must consider the influence of atmospheric turbulence on the accuracy of the auto-guiding system. Extending the exposure time can reduce the influence of the turbulent atmosphere, but also reduce the feedback control frequency of the auto-guiding system. The guiding beacon of several stars or extended source can reduce partly auto-guiding error caused by high-layer atmospheric turbulence, which can appropriately reduce the exposure time of the auto-guiding system, and improve its feedback control frequency.

Key words atmospheric optics; astronomical telescope; tracking accuracy; atmospheric coherent length; isoplanatic area; numerical simulation

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1330; 030.6600; 030.7060

1 引 言

天文望远镜需要对天文和空间目标进行长时间的连续观测。例如, 夜间观测较暗弱的天文目标时, 相机的曝光时间可能会达到几十分钟乃至数小时, 而白天进行太阳光谱分析时, 也常常会要求望远镜能稳定地以亚角秒精度持续跟踪目标几十分钟, 这

对天文望远镜的跟踪精度提出了较高的要求。望远镜的跟踪精度不仅受限于位置传感器(如圆感应同步器、光栅编码带等)的精度, 也受限于控制、支撑和传动等系统的误差, 还受限于观测环境(温湿度、风速和地基微震)的波动乃至仪器载荷的变化等。为了克服这些因素对望远镜跟踪精度的影响, 现代天

收稿日期: 2012-06-26; **收到修改稿日期**: 2012-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(11003041, 11103077)资助课题。

作者简介: 柳光乾(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事望远镜控制方面的研究。E-mail: lgq@ynao.ac.cn

导师简介: 刘 忠(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事天文光学技术方面的研究。E-mail: lz@ynao.ac.cn

文望远镜均配备了较灵敏的光电导行系统。导行系统最常用的导行信标为天文目标自身或是目标附近的其他天文目标,通过探测信标像位置的变化来得到望远镜的实时指向偏差,将这一偏差反馈给控制系统就可以实施精确的偏差纠正。

多数情况下,对信标的观测必然要经过地球大气,而大气湍流将会造成星像视位置的快速随机变化,这种随机像运动与望远镜的当前跟踪状态无关,不是导行系统希望得到的反馈信号。湍流造成的信标像随机运动频率较高,可采用延长积分时间的办法予以平滑,而积分时间太长又会限制导行的灵敏度和主动控制的带宽。以中国科学院云南天文台 1 m 红外太阳塔(NVST)为例,为了抗风避震,对信标的积分时间应当远小于 1 s,这对充分平滑大气湍流造成的图像随机运动是不够的。因此,对于现代天文望远镜,为了满足其较为苛刻的天文观测要求,认真分析大气湍流对光电导行精度的影响是非常必要的。还需说明的是,虽然自适应光学系统可以降低望远镜对光电导行系统的要求,但由于使用的局限性,目前大多数天文观测尚无法使用自适应光学系统。

2 大气湍流与点源信标的视位置误差

除了大气湍流,尚有诸多因素会影响信标视位置的探测精度,例如光子的统计涨落、探测器的噪声以及标定图像位置的算法误差等。已有的实验和文献表明,在典型的天文观测条件下,经过对系统偏差的改正和标定后(例如标定光学系统的畸变,改正 CCD 探测器的平场、暗场和本底等),对信标视位置的探测误差可以控制在 $0.1''$ 左右^[1~5]。以上这些因素将不再讨论,并把由此而导致的信标视位置的探测误差统称为“其他误差”,取值为 $\sigma_0 = 0.1''$ 。

文献[6~9]讨论了大气湍流对天文成像的影响。经过湍流大气后,平面波的振幅和相位都将随机变化,其中波前振幅的随机变化会导致图像的闪烁,而波前相位在有效口径内的随机涨落将导致图像重心的随机运动,Fried^[10]给出了近场近似条件下波前达到角方差的表述:

$$\sigma_a^2 = 0.358D^{-1/3}r_0^{-5/3}\lambda^2, \quad (1)$$

式中 D 为系统的有效口径, λ 为光波的波长, r_0 为大气视宁度参数,也称为 Fried 参数或大气相干长度,该参数同时也是大气湍流强弱的光学表征。文献[11]已证明了波前到达角与点源像重心位置(以角度表示)的一致性。因此,如果光电导行系统以点源星像为信标,那么波前到达角的平均起伏量[均方根

(RMS)]即可表示大气湍流造成的信标视位置误差,用 σ_A 表示这一误差,由(1)式可知

$$\sigma_A = 0.598D^{-1/6}r_0^{-5/6}\lambda. \quad (2)$$

绝大多数光电导行系统都用信标的视位置来纠正跟踪误差,如果对信标的积分时间不大于大气的相干时间 τ_0 (典型值为 $3\sim 5$ ms), σ_A 就可表示由大气湍流造成的光电导行的误差。图 1 为在不同大气视宁度条件下,由大气湍流造成的信标视位置误差与导行系统成像口径的关系。从图中可以看出,良好的大气视宁度有利于提高导行精度,而增大导行系统的成像口径亦可适度降低导行误差。用于夜间观测的现代天文望远镜常采用“偏置导行”方式,其导行信标为望远镜主视场边沿的恒星,导行系统的口径等于天文望远镜的有效口径。更大的导行口径不仅意味着信标星可以更暗弱,也意味着导行精度的提高。以中国科学院云南天文台 2.4 m 望远镜为例,在典型夜晚视宁度条件下($r_0 = 10$ cm),如果采用独立口径为 5 cm 的导行望远镜,其导行精度将下降约 1 倍。但是,并不是所有望远镜都适合采用偏置导行系统,因为望远镜科学目标和特殊结构的要求,仍有非常多的望远镜必须使用单独的导行系统。

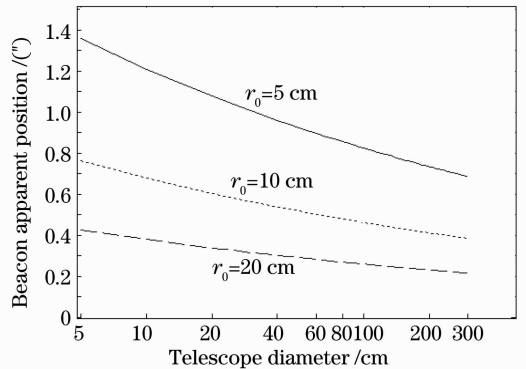


图 1 成像口径与信标视位置误差关系
Fig. 1 Relation between beacon apparent position and telescope diameter

由于望远镜口径的限制,延长对信标的积分时间可以更有效地提高导行精度。严格的分析较为复杂,下面对此进行一个初略估算。

假设导行系统口径为 5 cm,大气视宁度 $r_0 = 10$ cm,由(2)式可算出 $\sigma_A = 0.76''$ 。信标的视位置是一个随机变量,其均方根误差为 σ_A ,经过足够长的时间 $\delta t (\gg \tau_0)$ 后,对信标视位置的测量可视为另一次独立实验,取 N 次测量值进行算术平均,信标视位置的测量误差 $\sigma_{(A)}$ 就将下降为 $\sigma_A / N^{1/2}$ 。实验表明,当大气相干时间 τ_0 为 5 ms 时,取 δt 为 50 ms

是合适的,0.5 s 内可进行约 10 次独立测量,若不计每次测量的其他误差,信标的平均视位置测量误差 $\sigma_{(A)} \approx 0.24''$,这相当于将导行系统口径增大 10^3 倍。易于证明,相同条件下,进行 0.5 s 连续曝光后的视位置测量误差将小于该值。经典的光电导行系统常常对信标进行长达数秒钟的积分,此时,大气湍流造成的光电导行误差几乎可以忽略不计。

但是现代天文望远镜对光电导行的灵敏度提出了更高的要求,为了保持优良的视宁度,这些望远镜去掉了经典的望远镜圆顶(如图 2 所示),其跟踪精度将不可避免地受到风的影响。为校正风压带来的实时指向偏差,要求光电导行系统的反馈时间远小于 1 s。仍然以 NVST 为例,该望远镜的科学目标要求其闭环跟踪精度好于 $0.3''$,而为了改正风压起伏造成的望远镜指向偏差,光电导行系统每秒钟要完成多次反馈。NVST 导行望远镜的口径约为 5 cm,如果近地面湍流等效于 10 cm 的视宁度参数,估算表明,由湍流带来的导行误差将达到 $0.4''$ 以上,而在典型白日视宁度($r_0=5$ cm)条件下,这一误差将更大。



图 2 工作于敞开状态的 1 m 红外太阳塔
Fig. 2 1 m infrared solar telescope working under open dome

以上分析不仅适用于点源信标,也适用于角直径不显著大于大气等晕区(典型值为 $3'' \sim 5''$)的面源信标,如果仅考虑近地面的湍流效应,以上分析也将适用于采用多星或较大面源为信标(如太阳)的情形。

3 面源或多目标的导行

由于大气的等晕区很小,当采用多星或太阳作为导行信标时,湍流造成的信标各子区域的实时像

运动是不一致的,各子区域随机运动的相关程度取决于相互之间的距离。因此,对多星或面源进行平均位置测量能获得更高的精度。

图 3 中来自信标各子区域的光波必然经过不同的大气路径,各条路径将经过不同的高层大气和几乎相同的近地面大气,因此,分析面源或多目标导行受大气的影晌时,将大气分为近地面层和高层进行考虑。其近地面层引起的导行误差可以用(2)式近似描述。高层大气会导致不同目标的相对运动,文献[12~21]研究了高层大气湍流强度对这种相对运动的影响。光电导行采用信标的平均位置作为反馈控制信号,当信标为太阳时,太阳像的重心就代表了平均位置,而重心与目标的强度分布密切相关,因此采用数值模拟的方法研究湍流大气对太阳重心运动的影响。

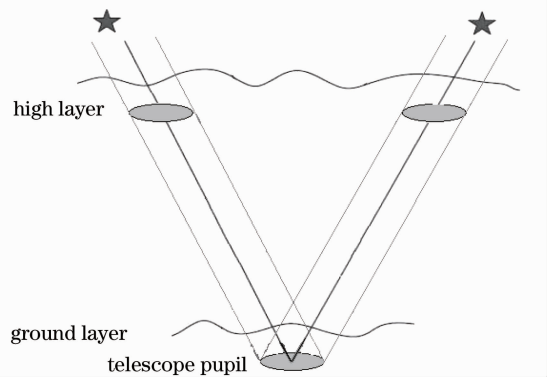


图 3 不同导行信标经过大气的路径
Fig. 3 Paths of different guiding beacons through atmosphere

3.1 大气分层以及相位屏的生成

根据研究目的不同,对大气分层方法也不相同,在研究大气湍流对面源导行精度的影响时,由于面源各个不同子区域经过不同的高层大气和几乎相同的近地面层大气,将大气分为上下两层,既近地面层大气和高层大气。参照文献[7,22]的方法,并考虑到天文望远镜安放高度通常距地面约 20 m,把近地面层大气的垂直高度范围取为 20~200 m,高层大气的垂直高度范围取为 0.2~18 km。研究表明,通常情况下,大气湍流对波前的影响可以等效为若干薄随机相位屏。因此,将近地面层大气和高层大气分别等效为一层薄随机相位屏,并且把近地面层大气的等效随机相位屏位置设在望远镜的入瞳上,高层大气的等效随机相位屏的位置采用文献[23]所给的等效高度计算方法求解。对于某层大气,根据等效高度上下光程方差为最小的原则,计算如下:

$$\int_{H_{i-1}}^{h_i} C_n^2(h)(h-h_i)^{2/3} dh = \int_{h_i}^{H_i} C_n^2(h)(h_i-h)^{2/3} dh, \quad (3)$$

式中 C_n^2 为大气折射率结构常数模型, h_i 为等效高度, H_{i-1} 为该层大气底部离地面高度, H_i 为该层大气顶部离地面的高度。由于目前还没有 1 m 红太阳塔所在地的分层大气实测模型, C_n^2 采用更适应于白天的 HV-21 理论模型^[7]:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (21/27)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (4)$$

式中 A 为大气湍流强度, 典型值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。经计算, 高层大气的等效随机相位屏的位置距地面高度约为 2.1 km。波长取 550 nm 时, 根据 C_n^2 的 HV-21 模型, 可获得近地面层大气的视宁度 r_{01} 为 8.06 cm, 高层大气的视宁度 r_{02} 为 7.55 cm, 整体大气的大气视宁度 r_0 为 5.15 cm。

随机相位屏的生成是数值模拟中比较重要一部份, 随机相位屏的方法可分为两类, 一类是将波前在一组正交完备的基上展开, 常用的是基于 Zernike 多项式的 K-L 函数展开法^[24,25], 另外一类是由 McGlamery 提出的基于频域的谱反演法。这两种方法各有优缺点, Zernike 方法生成的相位屏低频特性较好, 高频不足, 生成的相位屏精度与 Zernike 项数成正比, 较大相位屏生成速度慢, 傅里叶变换法生成的相位屏低频特性不足^[26], Lane 等^[27]进行了改进。由于太阳视角直径为 $32'$, 高层大气的等效随机相位屏在 2.1 km 高度时, 相位屏尺寸已经达到 20 m, 采用 Zernike 生成的相位屏方法计算量大。因此, 相位屏生成采用 Lane 的谱反演法, 其主要理论关系如下: 首先将相位表示为一组傅里叶序列, 即

$$\phi(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{n,m} \exp[i2\pi(u_n x + v_m y)], \quad (5)$$

式中 (u_n, v_m) 为离散的频域坐标, 系数 $c_{n,m}$ 的方差为

$$\langle |c_{n,m}|^2 \rangle = \Phi_\phi(u_n, v_m) \Delta u_n \Delta v_m, \quad (6)$$

式中 $\Phi_\phi(u_n, v_m)$ 为二维离散的湍流大气相位功率谱密度。

N_p 个相位屏叠加得到的次谐波低频补偿相位屏表示为

$$\phi_{SH}(x, y) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 c_{n,m} \exp[i2\pi(u_n x + v_m y)]. \quad (7)$$

由于相位屏的模拟结果与所选用的相位功率谱密度及所设定的参数有很大关系, 采用 Kolmogorov 谱:

$$\Phi_\phi^K(k) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3} = 0.49 r_0^{-5/3} k^{-11/3}, \quad (8)$$

式中 k 为波数。

3.2 大气对太阳导行精度影响的数值模拟

太阳的视角直径远大于大气等晕区, 取等晕区大小为典型值 $5''$, 则至少需要将太阳像细分为 147456 个子区域, 对高层大气的等效随机相位屏进行与等晕区匹配的采样, 在高度为 2.1 km 处, 采用间距为 5 cm、与导行镜的口径大小相当的采样点。如果对每个子区域的相位屏求傅里叶变换以获取对应的点扩展函数 (PSF), 将太阳像各不同的子区域与对应的 PSF 求空变卷积来得到经过高层大气后的太阳像, 其计算量非常庞大。由于只分析大气对太阳像重心的影响, 这种影响主要来自于大气等效相位屏的倾斜分量, 因此, 首先计算高层大气的等效随机相位屏各子区域的二维倾斜变化, 用网格表示的某一局部二维倾斜变化如图 4 所示, 然后采用该二维倾斜变化网格对太阳像上对应子区域进行相应的图像变形, 从而获得经过高层大气后的太阳像。

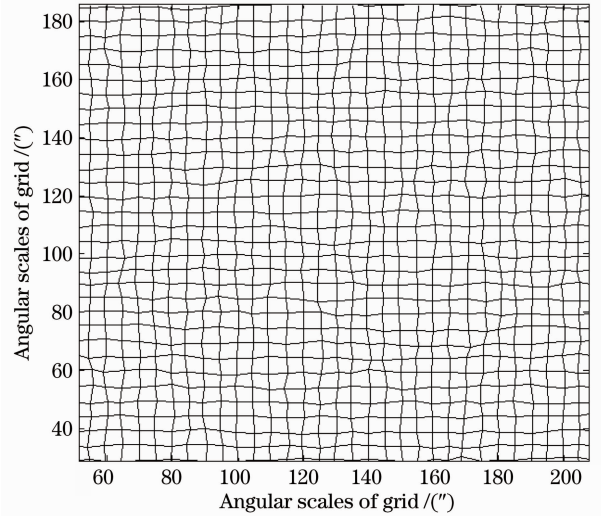


图 4 高层大气相位屏波前倾斜二维变化
Fig. 4 Wavefront tip-tilt grid for high layer atmospheric phase screen

由于太阳像各不同子区域经过几乎相同的近地面大气, 因此经过高层大气后的太阳像卷积上近地面层大气等效相位屏的 PSF 后, 就获得经过整个大气后的太阳像, 最后统计 100 幅太阳像的重心 RMS 值, 得到面源 (太阳) 与点源 (单星) 受大气的影响, 结果对比如表 1 所示。

表 1 大气对点源和面源影响的数值模拟对比

Table 1 Comparison of atmospheric influence on point and extended source by numerical simulation

	Point source (star) / (")	Extended source (sun) / (")
High layer atmosphere influence (centroid RMS)	0.745	0.261
Ground layer atmosphere influence (centroid RMS)	0.723	0.718
Total atmosphere influence (centroid RMS)	1.024	0.748

4 结 论

高层大气对面源(太阳)影响的重心 RMS 值是 0.261", 对点源(单星)影响的重心 RMS 值是 0.745", 由此可见高层湍流大气导致的面源各子区域的实时像运动的非一致对面源导行起到一种平滑作用。近地面层湍流大气对面源和点源的位置影响基本没有差别, 导行信标经过该层大气后, 面源重心 RMS 值增大为 0.748", 点源重心 RMS 值增大为 1.024"。总体来讲, 面源作为目标则可在一定程度上降低高层大气湍流带来的导行误差, 这对于 NVST 希望加快光电导行的反馈频率来抑制风的干扰是有利的。

参 考 文 献

- Mao Wei, Ji Kaifan, Li Binhua *et al.*. Celestial Measuring Based on CCD [M]. Kunming: Yunnan Technology Press, 2003. 60~75
冒蔚, 季凯帆, 李彬华等. CCD 天体测量学[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003. 60~75
- Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104
丁晓华, 李由, 于起峰等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104
- J. Arines, J. Ares. Minimum variance centroid thresholding [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7): 497~499
- Li Zhan, Peng Qingyu, Han guoqiang. Comparison of digital centering algorithms based on CCD images [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2009, **50**(3): 340~348
李展, 彭青玉, 韩国强. CCD 图像数字定心算法的比较[J]. *天文学报*, 2009, **50**(3): 340~348
- Hu Keliang. Research on the Application of Guide System with Area CCD Camera and Embedded System in High Temporal and Spatial Resolution Observation of Solar Magnetic Field [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004
胡柯良. 面阵 CCD 导行和嵌入式系统在高时空分辨率太阳磁场观测中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004
- B. H. Tatarskii. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong *et al.* Transl.. Beijing: Science Press, 1978
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳等译. 北京: 科学出版社, 1978
- M. C. Roggemann, B. Welsh. Imaging Through Turbulence [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996
- F. Roddier. The Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy[M]. E. Wolf, ed., Progress in Optics XIX, 1981
- J. W. Goodman. Statistical Optics [M]. New York: Wiley Classics Library Edition, 2000. 361~457
- D. L. Fried. Statistics of a geometric representation of wave-front distortion [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(11): 1427~1435

- Liu Zhong, Dai Yichun, Jin Zhenyu *et al.*. The centroid of speckle image and the wavefront tilt [J]. *Astronomical Research & Technology - Publications of National Astronomical Observatories of China*, 2009, **6**(2): 119~124
刘忠, 戴懿纯, 金振宇等. 斑点图的重心与波前倾斜 [J]. *天文研究与技术-国家天文台台刊*, 2009, **6**(2): 119~124
- M. A. Kallistratova, A. I. Kon. Fluctuations in the angle of arrival of light waves from an extended source in a turbulent atmosphere[J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1966, **9**(6): 636~639
- L. C. Andress, R. L. Phillips. Laser Beam Propagation Through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005. 492~493
- G. B. Scharmer, T. I. M. VanWerkhoven. S-DIMM+ height characterization of day-time seeing using solar granulation[J]. *Astron. & Astrophys.*, 2010, **513**(A25): 1~12
- M. Sarazin, F. Roddier. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astron. & Astrophys.*, 1990, **227**(1): 294~300
- J. M. Beckers. Increasing the size of the isoplanatic patch with multi-conjugate adaptive optics [C]. ESO Conference and Workshop Proceedings, 1988. 693~703
- Chang Xiang, Li Rongwang, Xiong Yaoheng. Predicted space-varying point spread function model for anisoplanatic adaptive optics imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1201001
常翔, 李荣旺, 熊耀恒. 基于自适应光学成像非等晕效应的空变点扩展函数估计模型[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1201001
- Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational racking technology for atmospheric laser communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505005
刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505005
- Chen Jingyuan. Geometric anisoplanatism of adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 922~927
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
- M. Warner, V. Riot, J. Sebag. LSST telescope guider loop requirements analysis and predicted performance [C]. *SPIE*, 2010, **7738**: 77381U
- Li Rongwang, Chang Xiang, Xiong Yaoheng. Numerical simulation of wander of ranging laser beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101001
李荣旺, 常翔, 熊耀恒. 测距光束光斑漂移的数值仿真[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1101001
- A. J. Jankevics, A. Wirth. Wide field of view adaptive optics [C]. *SPIE*, 1991, **1534**: 438~448
- E. P. Waliner. Optimizing the locations of multiconjugate wavefront correctors[C]. *SPIE*, 1994, **2201**: 110~116
- R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211
- N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation and Zernike polynomials[C]. *SPIE*, 1990, **1237**: 670~678
- B. M. Welsh, C. Dainty. Fourier series based atmospheric phase screen generator for simulating anisoplanatic geometries and temporalevolution[C]. *SPIE*, 1997, **3125**: 327~338
- R. G. Lane, A. Glindemann, J. Dainty. Simulation of Kolmogorov phase screen [J]. *Waves in Random Media*, 1992, **2**(3): 209~224