

文章编号: 1001-4322(2008)04-0529-04

1.2 m 望远镜自适应光学系统中激光 导引星聚焦非等晕性*

周 钰¹, 熊耀恒²

(中国科学院 国家天文台 云南天文台, 昆明 650011)

摘 要: 分析了云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统上如果配置激光导引星, 由信标上方以及信标下方采样不完整性造成的聚焦非等晕性误差大小。为了减小聚焦非等晕性误差, 可以采用投射多重信标方法。同时讨论了多重信标方法造成的信标位置测量误差和圆锥倾斜误差两种额外误差, 理论分析并数值模拟了当投射 2~5 颗钠导星和瑞利导星时其误差大小。结果表明: 随着导星高度以及导星数的增加, 该方法可以有效地减小聚焦非等晕性误差, 对于钠导星其误差小于 1 rad^2 。

关键词: 聚焦非等晕性; 多重导星; 信标位置测量误差; 圆锥倾斜误差

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A

云南天文台(云台)1.2 m 自适应光学系统(AOS), 利用波前传感器、波前处理器、波前控制器和波前校正器系统进行实时地消除由于大气湍流所造成的像差, 实现对自然星体目标的可见光高分辨率成像。2004 年 12 月 1.2 m AOS 闭环后把角间距为 $0.3''$ 的双星 HE142 清晰地分辨了出来^[1], 因此 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统可以很好地用于天文高分辨率成像观测。

利用观测目标的光作为波前探测, 如果观测目标达不到极限星等, 那么自适应光学系统则需要在等晕区内有足够量的信标, 然而在可见光波段 10 级以上的星体在整个天体中仅有 0.1% 的覆盖率^[2]。为解决这些问题, 1985 年 Foy 和 Labeyrie 提出了瑞利导星和钠导星作为激光导引星(LGS)的概念, 同时也称为人造信标。

云台 1.2 m 自适应光学系统的校正极限星等为 6 等, 如果在其自适应光学系统上配置激光导引星^[3], 观测目标的星等可以达到 11 等, 如果利用观测目标等晕区不暗于 11 等亮度的星体提供波前倾斜测量, 用激光导引星测量大气引起的高价波前畸变, 则可观测 20 等亮度的星体。

本文主要考虑利用激光导引星技术时的聚焦非等晕性对云台 1.2 m 自适应光学系统激光导引星的限制, 数值模拟了有效口径和聚焦非等晕方差。基于这种严重的聚焦非等晕性误差, 采用投射多重导星来减小聚焦非等晕误差以及该方法引起额外的误差。理论上初步论证该方案的可行性。

1 聚焦非等晕性

采用激光导引星技术校正自然星体时, 存在聚焦非等晕性误差。从图 1 中看出, 利用激光导引星所测量的仅是—定高度上的以及到达望远镜口径这一段锥形光路中的波前畸变, 它不包含这个高度以上以及锥形以外的大气湍流所造成的波前畸变, 与从无限远目标来的接近于平行的光束所经过的路径不同, 因此不可避免地产生聚焦非等晕性误差(也称为圆锥效应)。根据 Fried 等人的分析, 由焦面非等晕性所产生的波前探测的均方差 σ_{FA}^2 表示为^[4]

$$\sigma_{FA}^2 = (D/d_0)^{5/3} \quad (1)$$

式中: D 为接收望远镜的口径; d_0 为有效口径。

1.1 有效口径的数值模拟

假设当系统的 Strehl 比大于 0.37, 即剩余波前畸变方差 $\sigma_{FA}^2 < 1$ 时, 认为 AOS 对星像进行了很好的补偿,

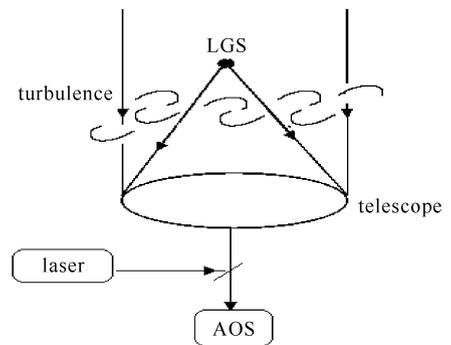


Fig. 1 Diagram of synthetic beacon

图 1 人造信标示意图

* 收稿日期: 2007-11-22; 修订日期: 2008-03-11

作者简介: 周钰(1982—), 女, 博士研究生, 从事自适应光学系统的研究; zhouyu@ynao.ac.cn.

那么此时, d_0 就代表了 AO 校正效果最佳时的最大有效口径。用参量 d_0 来表示聚焦非等晕性带来的误差^[5]

$$d_0 = \{k^2 [0.057\mu_0^+(H) + 0.500 \frac{\mu_{5/3}^-(H)}{H^{5/3}} - 0.452 \frac{\mu_2^-(H)}{H^2}]\}^{-3/5} \quad (2)$$

$$\mu_n^+(H) = \int_H^{+\infty} dh C_n^2(h) h^n, \quad \mu_n^-(H) = \int_0^H dh C_n^2(h) h^n \quad (3)$$

式中: μ_n 称为湍流的 n 阶矩, μ_n^+ 和 μ_n^- 表示部分湍流矩; H 为导星距地高度; h 为积分高度。在以下聚焦非等晕性误差分析中采用 HV-25 模型^[6]

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

其中: $A = C_n^2(0)$ 为系数, 为 $3.189 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $\omega = 25.7 \text{ m/s}$ 。

图 2 是对 d_0 的数值模拟图, 在 $\lambda = 0.5, 1.5, 2.5 \mu\text{m}$, 天顶角 $\xi = 45^\circ$ 时, 相对应的 $d_0(\text{Na}) = 2.5, 5.8, 9.5 \text{ m}$, 与之相比较, $d_0(\text{Rayleigh}) = 0.44, 1.02, 1.66 \text{ m}$ 。因此, 对于激光导引星自适应光学系统而言, 对于波长较长的观测目标其校正效果比较好。

1.2 1.2 m 聚焦非等晕误差的数值模拟

描述云台 1.2 m 激光导引星自适应光学系统所产生的聚焦非等晕误差, 把其误差分为由导星上方和下方湍流两部分造成的^[7-8]。

那么设导星下方聚焦非等晕方差 σ_{low}^2 为

$$\sigma_{\text{low}}^2 = D^{5/3} k^2 \sec(\xi) [0.5 \frac{\mu_{5/3}^-(H)}{H^{5/3}} - 0.452 \frac{\mu_2^-(H)}{H^2} + \dots] \quad (5)$$

式中: k 为导星激光波数。

导星上方聚焦非等晕方差为

$$\sigma_{\text{up}}^2 = 0.057 D^{5/3} k^2 \sec(\xi) u_0^+(H) \quad (6)$$

如图 3 所示, 波长 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 时, 在大气层 20 km 之后, 导星上方所带来的聚焦非等晕方差急剧减小, 虽然, 导星下方误差有上升的趋势, 但是两部分之和总的误差还是趋于明显减小, 而 Na 导星所带来的聚焦非等晕误差比 Rayleigh 导星小。

从以上模拟 1.2 m 自适应光学系统投射一颗导星时的聚焦非等晕误差结果得出, 采用激光导引星技术存在非等晕性误差, 特别是对于瑞利导星而言其误差更为严重。为了解决这一突出问题, 采用投射多重导星方法减小聚焦非等晕误差^[9]。

2 使用多重激光导引星减少聚焦非等晕性

1985 年, Labeyrie 和 Foy 首次正式提出使用激光束阵减小聚焦非等晕性, 如果使用 N_R 颗人造导星, 则聚焦非等晕方差^[10]

$$\sigma_{\text{FA}}^2 \propto N_R^{-5/6} (D/d_0)^{5/3} \quad (7)$$

但是对于投射多重导星, 不可避免地存在以下两种误差: 信标位置测量误差和圆锥倾斜误差。

2.1 信标位置测量误差

到目前为止, 利用一颗导星不能够得到大气倾斜信息, 其主要原因在于波前探测器所采样的激光斑点位置相对于望远镜光轴来说是个未知量。同样当投射多重导星每束激光向上传播时会随机漂移, 因此在一定高度上的聚焦斑点会随机地横向移动, 即不能确定每颗导星的位置, 导致各激光束之间几何位置无规则偏移, 从而不可避免地产生信标位置测量误差, 用 σ_p^2 表示。图 4 为两颗导星距离为 b 时的几何构型示意图。

按照 Sasiela 的分析^[11], 有

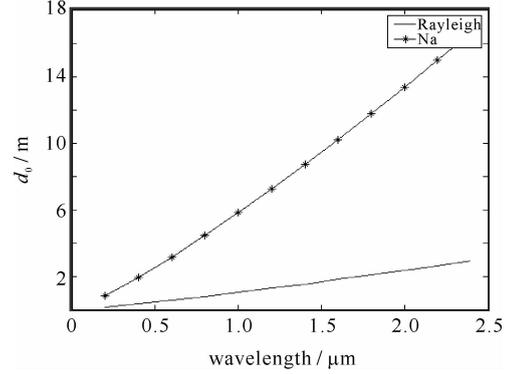


Fig. 2 Effective diameter vs observing wavelength of Na laser beam and Rayleigh laser beam
图 2 钠导星和瑞利导星的有效口径数值随波长变化

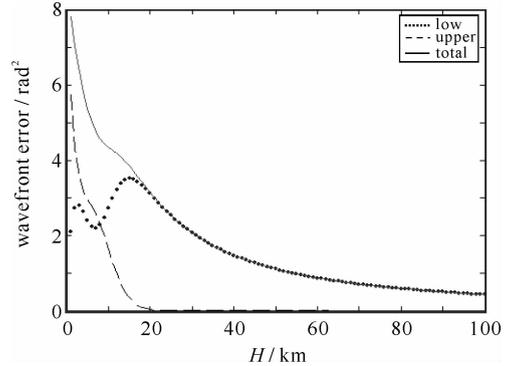


Fig. 3 Phase-variance from cone effect
图 3 聚焦非等晕性误差的大小

$$\sigma_p^2 = k^2 D_B^2 D^{-1/3} \int_0^{h_c} dz C_n^2(z) 0.6675 \left[\left(\frac{bz}{DL} \right)^2 \left(1 - \frac{z}{L} \right)^{-1/3} - 2.067 \left(\frac{bz}{DL} \right)^4 \left(1 - \frac{z}{L} \right)^{-7/3} - 1.472 \left(\frac{bz}{DL} \right)^{14/3} \left(1 - \frac{z}{L} \right)^{-3} \right] + k^2 D_B^2 D^{-1/3} \int_{h_c}^{H_B} dz C_n^2(z) 0.76 \left[\left(1 - \frac{z}{L} \right)^{5/3} - 0.6637 \left(\frac{bz}{DL} \right)^{-1/3} \left(1 - \frac{z}{L} \right)^2 - 0.0031 \left(\frac{bz}{DL} \right)^{-7/3} \left(1 - \frac{z}{L} \right)^4 \right] \quad (8)$$

$$D_B = b = D/N_R, \quad h_c = \frac{H_B}{(b/D) + 1}, \quad L = H_B \sec(\xi) \quad (9)$$

式中: b 为两激光斑点之间的距离; N_R 为导星数; D 为全口径大小; H_B 为导星高度; 高度 h_c 把激光束传输大气分为两部分。

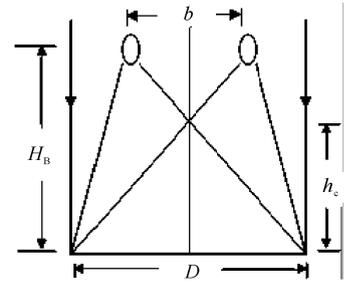


Fig. 4 Geometry path for beacon position errors
图 4 信标位置误差示意图

图 5 是瑞利导星和钠导星不同观测波长、不同导星数 $N_R = 2, 3, 4, 5$ 时的信标位置误差的模拟计算结果。从模拟结果看出, 由信标位置的不确定性产生的倾斜误差远远小于聚焦非等晕误差, 但相对于钠导星而言瑞利导星产生的误差还是偏大, 当其投射足够多的导星时, 瑞利导星产生的误差值将很大程度上的减小。

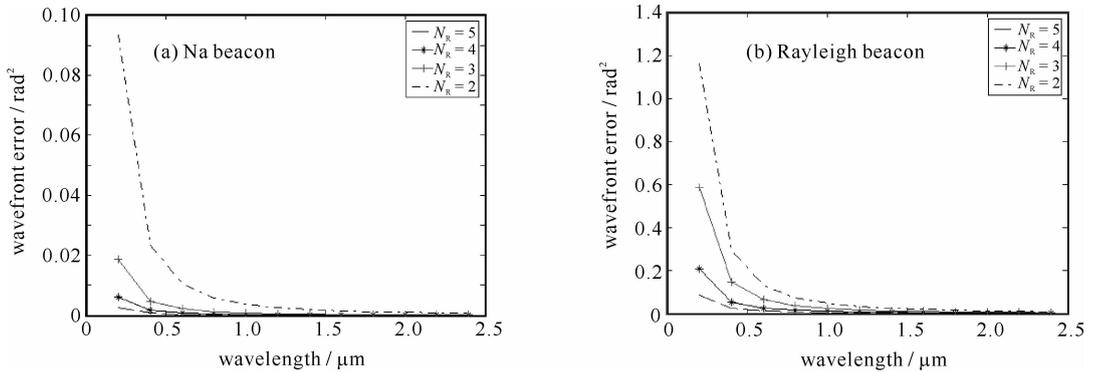


Fig. 5 Change of position error with number of beacons and wavelength for Na beacon and Rayleigh beacon

图 5 Na 导星和 Rayleigh 导星位置误差随导星数和波长变化

2.2 圆锥倾斜误差

多重导星的另一额外误差来源于圆锥倾斜误差^[12]。对于多重导星系统, 其每个信标的波前倾斜量是随机起伏的且不完全相关的, 为区分角非等晕性波前整体倾斜量, 用圆锥倾斜误差表示。圆锥倾斜误差的大小依赖于各个导星之间的波前倾斜相关性, 以下是当导星数 $N_R = 2, 3, 4, 5$ 时, σ_{Li}^2 为导星下方倾斜畸变方差, σ_{Ut}^2 为导星上方的倾斜畸变方差, 总的倾斜畸变方差 σ_{ct}^2 可以表示为

$$\sigma_{ct}^2 = \sigma_{ut}^2 + \sigma_{Li}^2 = 0.368k^2 D_B^{5/3} u_2^-(H)/H^2 + 0.38k^2 D_B^{5/3} u_0^+(H) \quad (12)$$

图 6 为当分别采用多颗导星 $N_R = 2, 3, 4, 5$ 时, 由导星下方未测量的误差, 与图 7 中总的误差相比, 得出其主要误差来源于导星上方。采用 5 颗导星, 波长 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 时, 瑞利导星的误差减小到 1 rad^2 , 而钠导星下方产生的误差几乎可以忽略不计, 其总的圆锥倾斜误差远远小于 0.1 rad^2 。

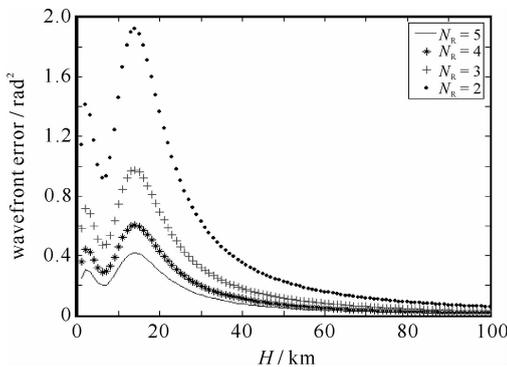


Fig. 6 Error below beacons
图 6 导星下方倾斜畸变方差

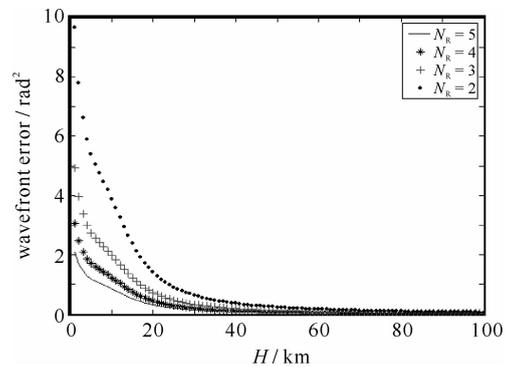


Fig. 7 Tilt error of multiple beacons vs altitude
图 7 多重导星导致的倾斜误差

3 结 论

本文对聚焦非等晕性进行数值模拟分析,由于波前传感器有限的子孔径数,在本文中模拟了采用投射 2~5 颗导星。根据公式(7)得出,聚焦非等晕方差与导星数 $N^{-5/6}$ 数成正比例,从而投射多重导星可以显著减小聚焦非等晕误差。虽然多重导星方法有其不完整性,会引起额外的位置测量误差和圆锥倾斜误差,这些误差限制了多重导星系统的精度,但是从以上模拟投射多颗导星分析数据看出,随着导星数的增加,也即相邻两颗导星之间的距离减小,这两种误差的大小也随之减小,特别是对于钠导星而言。

参考文献:

- [1] 饶长辉,姜文汉,张雨东,等. 云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(3):295-302. (Rao C H, Jiang W H, Zhang Y D, et al. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3):295-302)
- [2] 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. (Xiong Y H. Laser guide stars for adaptive optical systems. *Progress in Astronomy*, 2000, **18**(1):1-8)
- [3] 张卫,雒仲祥,向汝祥. 人造信标波前探测[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(3):375-377. (Zhang W, Luo Z X, Xiang R J. Wavefront measurement of artificial beacon. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3):375-377)
- [4] Fried D J, Belsher J F. Analysis of fundamental limits to artificial-guide-star adaptive-optics-system performance for astronomical imaging[J]. *J Opt Soc Am*, 1994, **A11**(1):277-287.
- [5] Tyler G A. Rapid evaluation of d_0 : the effective diameter of a laser-guide-star adaptive-optics system[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, **11**:325-338.
- [6] Yan H X, Li S S, Chen S. Preliminary numerical simulation investigation of the cone effect in an adaptive optics system using a laser guide star[C]//Proc of SPIE. 2004, **5639**:53-64.
- [7] 范承玉,宋正方. 激光导引星非等晕性的限制[J]. 中国激光, 1996, **23**(8):722-726. (Fan C Y, Song Z F. The limit of anisoplanatism to laser-guide-stars. *Chinese Journal of Lasers*, 1996, **23**(8):722-726)
- [8] Parenti R R, Sasiela R J. Laser-guide-star systems for astronomical applications[J]. *J Opt Soc Am*, 1994, **11**(1):288-309.
- [9] Murphy D V, Primmerman C A, Zollars B G, et al. Experimental demonstration of atmospheric compensation using multiple synthetic beacons[J]. *Opt Lett*, 1991, **16**(22):1797-1799.
- [10] Neyman, Christopher R. The use of laser guide stars in astronomy[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002:47-60.
- [11] Sasiela R J. Wave-front correction by one or more synthetic beacons[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, **11**:379-393.
- [12] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescope[M]. England: Oxford University Press, 1998:230-243.

Focus anisoplanatism for 1.2 m telescope laser guide stars in adaptive optics system

ZHOU Yu¹, XIONG Yao-heng²

(National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

Abstract: A precise simulation the focus anisoplanatism error of Yunnan observatory 1.2 m 61-element laser guide star adaptive optics system, which caused by laser beacon at a finite range travels a different path than does the light from natural star at a infinite range. This error can be eliminated by use of laser guide stars. However, there are two sources of error limit multiple beacon adaptive optical system, beacon position measurement error and conic tilt error. Analysis the two errors when project two to five laser guide stars. The result showed that with the increase of high and number of laser beam, especially the focus anisoplanatism of Na laser guide stars could reduced to 1 rad².

Key words: Focus anisoplanatism; Multiple laser guide stars; Beacon wander error; Conic tilt error