

文章编号: 0253-2239(2004)10-1301-4

激光导星共孔径发射接收的偏振分光效率研究*

叶一东 易亨瑜 雒仲祥 彭 勇 向汝建 李建民 苏 毅
(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 在地平式折轴望远镜上开展自适应光学瑞利激光导星实验,研究了信标光束同孔径发射和接收偏振分光技术。基于镜面膜层复振幅反射特性,采用琼斯矩阵描述方法,建立了偏振分光物理模型,研究了共孔径发射和接收偏振耦合分光的效率问题,并与实验结果进行了比较。结果表明,由于镜面膜层对 s 光和 p 光的相位延迟差异,系统偏振分光效率随着望远镜的方位角旋转会发生周期性的变化,同时也受望远镜天顶角变化的影响。在研究光路反射镜相位延迟对往返分光效率影响规律的基础上,提出了提高地平式折轴望远镜激光导星共孔径发射和接收偏振分光效率,消除受望远镜方位角和天顶角变化影响的技术途径。

关键词: 自适应光学; 激光导星; 偏振分光; 分光效率; 地平式折轴望远镜
中图分类号: O436 文献标识码: A

Efficiency of Polarizing Beam Splitting Scheme for Rayleigh Laser Guide Star Transmitted and Received in Common Aperture

Ye Yidong Yi Hengyu Luo Zhongxiang Peng Yong Xiang Rujian
Li Jianmin Su Yi

(*Institute of Applied Electronics, The China Academy of Engineer Physics, Mianyang 621900*)
(Received 29 August 2003; received 11 December 2003)

Abstract: In the experiments of Rayleigh laser guide star (LGS) for adaptive optics on altazimuth Coudé telescope, the technology of LGS launched and received in the common aperture using polarizing beam splitting scheme is researched. Based on the Jones matrix method and the reflect characteristic of coating film on mirror, the physical model of polarizing beam splitting in altazimuth Coudé telescope is built. The efficiency of beam splitting for launching and receiving is simulated with numerical method in computer and compared with experimental result. The result shows that the efficiency of polarized beam splitting is periodically varying with the azimuth or elevation of the telescope because of the phase difference between the s and p polarizing vector reflected by film on the mirrors. The factors of degrading the polarizing beam splitting efficiency are analyzed. And a technical scheme for keeping the efficiency from degrading with the azimuth or elevation varying of the telescope is presented.

Key words: adaptive optics; laser guide star; polarizing beam splitting; efficiency of beam splitting; altazimuth Coudé telescope

1 引 言

在天文学应用中,大口径望远镜的成像分辨率受限于湍流大气的相干长度。为了充分发挥其潜在

性能,需要探测湍流大气导致的成像光束的波面畸变,并采用自适应光学进行校正。发射一束激光,利用 10~20 km 高空大气分子的后向瑞利散射,产生人造激光导星,在波前探测器中接收该导星的返回信号,探测波前畸变信息,这就是瑞利激光导星技术^[1~3]。导星激光器既要有良好的光束质量,又要保证高重复频率和高脉冲能量,有很高的技术难度

* 国家 863 计划资助课题。

E-mail: yidongye@163.com

收稿日期:2003-08-29;收到修改稿日期:2003-12-11

和研制成本。提高激光发射和接收效率,对于提高系统效费比具有重要意义,因此在瑞利信标光学系统中,同孔径发射和接收的分光技术是其最重要的技术环节之一。

利用同一个望远镜孔径完成激光的发射和接收,目前广泛采用的分光方式主要有半透半反镜分光^[4]、高速转镜分光^[6]和偏振分光^[1,5]等三种。其中,半透半反镜分光方式效率太低,高速转镜分光方式工程难度较大。偏振分光方式则较为简单,在一些实验装置中得到较多的使用。由于瑞利后向散射具有很好的保偏特性,Lincoln 实验室在 20 世纪 90 年代初期的瑞利激光导星研究中提出并采用了偏振分光方案^[1]。

2 系统结构和问题的提出

在我们的地平式折轴望远镜上,采用了偏振分光方式。导星激光的偏振耦合分光光路见图 1 所示,从激光器出来的线偏振光相对于偏振分光镜(PS)为 s 光,被偏振分光镜反射,再经 $\lambda/4$ 波片(WP)后变为圆偏振光,再经过光学系统发射出去;由瑞利散射返回的光信号按照逆光路经过同样的光学系统,再次到达 $\lambda/4$ 波片,如果返回信号仍保持圆偏振状态,则经过 $\lambda/4$ 波片后变为 p 偏振光,在偏振分光镜上全部透射,进入探测器中,从而实现发射光束和接收光束的高效耦合分光。

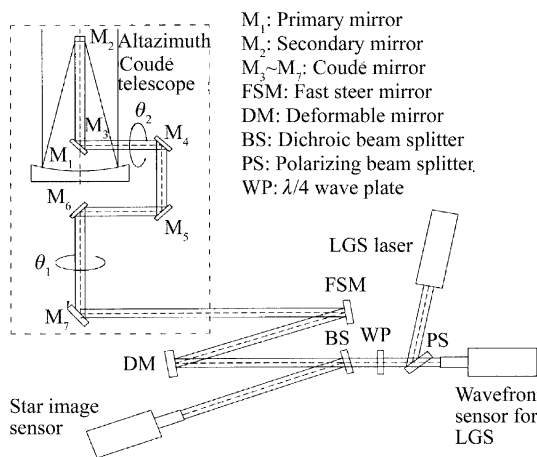


Fig. 1 Polarizing beam splitting scheme for Rayleigh LGS in altazimuth Coudé telescope

但在激光导星实验中发现,对于地平式折轴望远镜,采用偏振分光方式进行激光的发射和接收(见图 1)时,由于机架的方位和俯仰旋转带动反射镜做相应旋转,分光效率随着望远镜的方位角和天顶角变化会发生周期性的改变,使得在某些角度下几乎

接收不到返回光,典型结果见图 2。

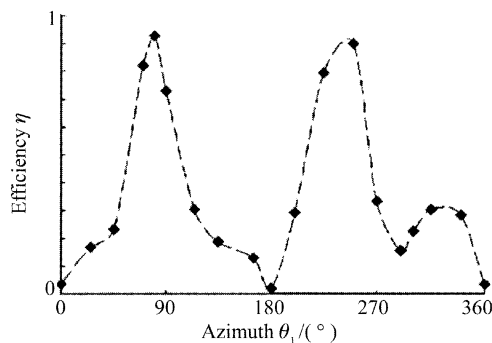


Fig. 2 Normalised efficiency η vs azimuth θ_1 in LGS experiment of altazimuth Coudé telescope (zenith $\theta_2 = 40^\circ$)

关于这个现象目前尚未见文献报道,为了解决上述问题,本文结合实验现象,建立了偏振分光光路物理模型,对地平式折轴望远镜的偏振耦合分光效率进行了研究。

3 地平式折轴望远镜偏振耦合分光的物理模型

由于大气后向瑞利散射具有较好的保偏特性,且跟望远镜的方位角和天顶角无关,因此可以认为光路中镜面的相位延迟使光束偏振态发生改变是导致上述现象的主要原因。

在图 1 所示的激光导星发射接收系统光路中建立右手直角坐标系,在耦合到望远镜之前的光路中,设光线传输方向为 z 轴,竖直向上为 y 轴,水平方向为 x 轴;光束进入折轴望远镜经垂直轴和水平轴改变传输方向后,仍以光线传输方向为 z 轴,与 x 、 y 轴的相对关系保持不变。

镜面反射膜对 p 光和 s 光的复振幅反射系数可分别写为^[7]

$$r_p = \rho_p \exp(j\delta_p), \quad r_s = \rho_s \exp(j\delta_s), \quad (1)$$

式中 j 是虚数单位, ρ 是复振幅反射系数的模, δ 是相位延迟。一般说来,多层介质膜的 δ_p 和 δ_s 并不相等,使得入射到镜面上的偏振光发生偏振态的改变。

设激光器输出的激光为竖直偏振(即 y 方向,相对于平台上的反射镜为 s 光),经过偏振分光镜反射后,仍保持为 s 偏振。其琼斯矢量为 $\mathbf{P}_0 = [0 \ 1]^T$ (上标 T 表示矩阵转置)。

从 $\lambda/4$ 波片到望远镜出口的光路中,根据其镜片旋转状态,可分为三段:第一段包含 BS、DM、FSM 和 M_7 , 镜片不随望远镜旋转;第二段包含 M_6 、 M_5 和 M_4 , 它们随望远镜垂直轴一起旋转,因而反

射主截面(入射光线与镜面法线构成的面)相对于 x 轴的夹角发生与望远镜方位旋转角相同的变化;第三段包含 M_3 、 M_2 和 M_1 , 它们既受望远镜的垂直轴旋转的影响, 也受水平轴旋转的影响。

设第一段的所有反射镜对偏振光的 p 和 s 分量(设相对于镜面 DM 定义 p 和 s 分量)的相位延迟差 $\delta_p - \delta_s$ 为 φ_0 , 其主截面与 xoz 坐标面夹角恒为 0° 或 90° (M7 上为 90°)。设第二段中的反射镜对偏振光

的 p 和 s 分量的相位延迟差为 φ_1 , 其反射主截面与 x 轴夹角 θ_1 ; 第三段反射镜对 p 光和 s 光的相位延迟差设为 φ_2 , 其主截面与 x 轴夹角 θ_2 。当实验平台上的光束从正北方向引入望远镜时, θ_1 和 θ_2 分别为地平式折轴望远镜的方位角和天顶角。从激光器出口, 经上述往返过程回到偏振分光镜前, 光束琼斯矢量的变化为

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} p_p \\ p_s \end{bmatrix} = \mathbf{M}(90^\circ, -45^\circ) \mathbf{M}(\varphi_0, -\theta_0) \mathbf{M}(\varphi_1, -\theta_1) \mathbf{M}(\varphi_2, -\theta_1 - \theta_2) \mathbf{M}(\varphi_2, \theta_1 + \theta_2) \times \mathbf{M}(\varphi_1, \theta_1) \mathbf{M}(\varphi_0, \theta_0) \mathbf{M}(90^\circ, 45^\circ) \mathbf{P}_0, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{M}(\varphi, \theta)$ 为光路中各段镜片等效的琼斯矩阵^[8]:

$$\mathbf{M}(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2) + j\sin(\varphi/2)\cos(2\theta) & j\sin(\varphi/2)\sin(2\theta) \\ j\sin(\varphi/2)\sin(2\theta) & \cos(\varphi/2) - j\sin(\varphi/2)\cos(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$\mathbf{M}(90^\circ, 45^\circ)$ 、 $\mathbf{M}(\varphi_0, \theta_0)$ 、 $\mathbf{M}(\varphi_1, \theta_1)$ 、 $\mathbf{M}(\varphi_2, \theta_1 + \theta_2)$ 分别是发射光路中的 $\lambda/4$ 波片、第一段光路、第二段光路和第三段光路的琼斯矩阵, $\mathbf{M}(\varphi_2, -\theta_1 - \theta_2)$ 、 $\mathbf{M}(\varphi_1, -\theta_1)$ 、 $\mathbf{M}(\varphi_0, -\theta_0)$ 、 $\mathbf{M}(90^\circ, -45^\circ)$ 分别表示信标光返回过程中的第三段光路、第二段光路、第一段光路和 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵。

由于光路中镜面对偏振态的影响, 回光信号回到偏振分光镜处的光可能不是预期的 p 偏振光, 因而只有部分光能经偏振分光镜透射进入探测器中。经偏振分光镜透射进入探测器的光占回到偏振片前的光总能量之比为

$$\eta = \frac{|p_p|^2}{|p_p|^2 + |p_s|^2}, \quad (4)$$

(4)式即为共孔径发射和接收的偏振耦合分光效率。

4 偏振耦合分光效率的数值模拟和分析

对地平式折轴望远镜的激光导星共孔径发射和接收的偏振分光, 由(1)式~(5)式, 数值计算可得各种参量条件下的偏振分光效率。本文的计算取波长 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ 。

通过数值计算研究了偏振耦合分光效率 η 随望远镜的方位旋转角 θ_1 和天顶旋转角 θ_2 的变化规律, 图 3 给出了两组典型模拟结果。对比图 3 可见, 当各段镜片对 s 光和 p 光的相位延迟较小(远小于 $\lambda/4$) 时, 偏振分光效率较高。

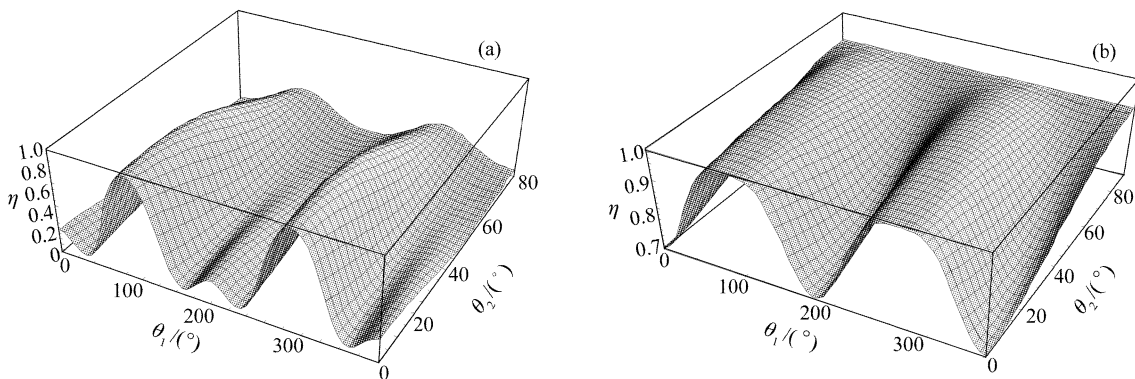


Fig. 3 Beam splitting efficiency η as the function of azimuth θ_1 and zenith θ_2 . (a) $\varphi_0 = 0.31\lambda, \varphi_1 = 0.92\lambda, \varphi_2 = 0.95\lambda$, (b) $\varphi_0 = 0.05\lambda, \varphi_1 = 0.025\lambda, \varphi_2 = 0.025\lambda$

进一步的大量模拟计算表明, 当光路中各段镜面相位误差都在 $\lambda/2$ 的整数倍附近时, 可得到较高的系统分光效率, 且随望远镜角度起伏较小; 当光路中各

段镜面相位误差都恰好为 $\lambda/2$ 的整数倍时, 分光效率达到最高(理论值为 100%), 且不随望远镜旋转而变化。图 4 为各段镜面相位误差都在 $\lambda/2$ 的整数倍附

近的一个典型例,给出了 $\varphi_0 = (2 + 0.04)\lambda/2$, $\varphi_1 = (1 + 0.03)\lambda/2$, $\varphi_2 = (1 + 0.05)\lambda/2$ 时, η 随望远镜方位角和天顶角旋转的变化 (η 在 0.85~1 之间)。

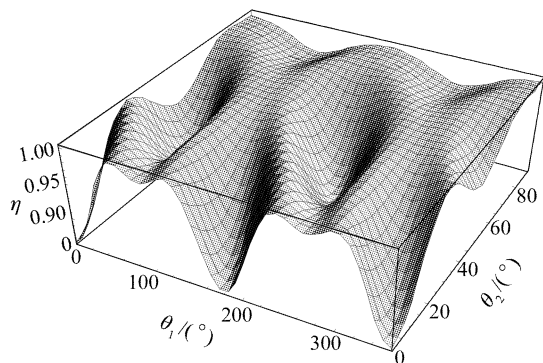


Fig. 4 Efficiency η as the function of azimuth θ_1 and zenith θ_2 when $\varphi_0 = (2 + 0.04)\lambda/2$, $\varphi_1 = (1 + 0.03)\lambda/2$, $\varphi_2 = (1 + 0.05)\lambda/2$

图 3、图 4 表明,当望远镜天顶角一定时,偏振分光效率随方位角周期变化,与图 2 给出的实验结果的变化规律是一致的,验证了理论模型和计算的合理性。同时表明,分光效率还受望远镜天顶角 θ_2 的影响。

图 5 给出了取 $\varphi_0 = 0$, $\varphi_2 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0$ 时, η 随垂直轴镜相位差 φ_1 和望远镜方位角 θ_1 变化曲线。它表明:即使第一段和第三段光路的镜片对 p 光和 s 光没有相位差,垂直轴镜片的相位差变化对往返效率的影响仍呈周期性变化,当该段光路中的镜片相位差为 $\lambda/2$ 的整数倍时,才能完全消除对偏振光的往返效率的影响。当该段光路中的镜片相位差为 $\lambda/2$ 的整数倍附近时,可以大大减小对偏振光的往返效率的影响。

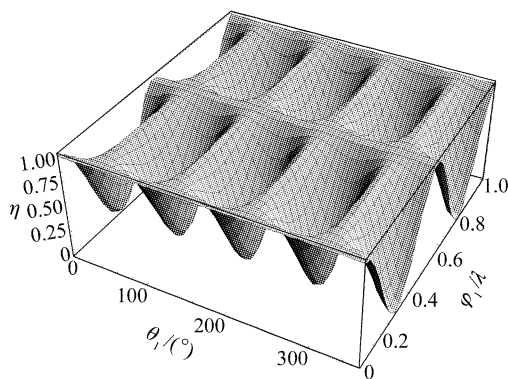


Fig. 5 Efficiency η as the function of phase φ_1 and azimuth θ_1 when $\varphi_0 = 0$, $\varphi_2 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0$

结论 偏振耦合分光方式对于共孔径发射和接收系

统具有简单高效的优点,在一些激光雷达系统和激光导星实验装置中得到应用。但在地平式折轴望远镜中,随着望远镜方位和仰角的变化,光路中反射主截面相对于光束偏振面的夹角也随之旋转,使得光束的偏振态随望远镜方位角和俯仰角旋转发生变化,导致分光效率发生周期性变化,最严重情况下甚至收不到返回光。

研究表明,使各段镜片对 p 光和 s 光的反射总相位差均为 $\lambda/2$ 的整数倍,才能完全消除镜面旋转对偏振光的往返效率的影响。从工程上讲,要完全做到这一点几乎是不可能的,但通过对光路中各段反射镜设计的综合考虑和分配,使光路中旋转状态相同的各段镜片对 p 光和 s 光的反射相位差在 $\lambda/2$ 的整数倍附近,可以大大减小偏振态改变对分光效率的影响,从而使地平式折轴望远镜的偏振分光技术得以实用。

此外,镜面膜层对不同偏振态的入射光的反射率也会略有差别^[7],但对于本文中的高反射率膜层而言,这种影响与相位延迟导致的偏振分光效率变化相比,是可以忽略的。

参 考 文 献

- Zollars B G. Atmospheric-turbulence compensation experiments using synthetic beacon. *The Lincoln Laboratory J.*, 1992, **5**(1): 67~91
- Fugate R Q, Ellerbroek B L, Higgins C H *et al.*. Two generations of laser guide star adaptive optics experiments at the Starfire Optical Range. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(1): 310~324
- Yan Jixiang, Zhou Renzhong, Yu xin. Laser guide star used in noncompletely correcting adaptive telescope. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1992, **12**(12): 1140~1144 (in chinese)
- Forden G E. *The Airborne Laser*. IEEE Spectrum, 1997, **34**(9): 40~46
- Duck T J, Sipler D P, Salah J E. Monostatic Lidar at $f/200$: A New Instrument at Millstone Hill / MIT Haystack Observatory. *Proceeding of the 20th International Laser • Radar Conference*, France, July 10~14, 2000
- Argall P S, Jacka F. High-pulse-repetition-frequency lidar system using a single telescope for transmission and reception. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2619~2628
- Born M, Wolf E. *Principles of Optics, Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. New York: Pergamon Press, 5th edit, 1975
- Lu Yaxiong, Lü Baida. *Matrix Optics* (矩阵光学). Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989 (in Chinses)