

文章编号: 1002-2082(2008)05-0679-05

# 共路外差法分析牛顿望远镜偏振特性

张绪国, 江月松, 黎芳

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 应用共路外差干涉法分析了牛顿望远镜的偏振特性。根据菲涅耳定律求出了入射光s-偏光和p-偏光入射到望远镜各点的反射率公式。给出了共路外差干涉法测量牛顿望远镜偏振特性的实验装置原理图。采用632.8 nm的外差光源,分析了牛顿望远镜对s-偏光和p-偏光反射系数、相位差以及对入射光偏振度的影响,根据入射角度的不同绘制了相应的变化曲线。结果表明:镀有铝膜的牛顿望远镜对入射光偏振特性影响较小,s-偏光和p-偏光反射系数相差不到0.01,偏振度变化不超过0.07,适用于激光遥感偏振成像的接收系统。

**关键词:** 光学测量; 共路外差; 反射系数; 相位差; 偏振度

中图分类号: TH744.3

文献标志码: A

## Analysis of polarization characteristic of Newton telescope with common-path heterodyne method

ZHANG Xu-guo, JIANG Yue-song, LI Fang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The polarization characteristic of Newton telescope is analyzed with the common-path heterodyne interferometry. The reflectance formulas of both s-polarized light and p-polarized light incident on each point of the telescope were derived based on the Fresnel law. The schematic diagram of the experimental setup for measuring phase difference and analyzing the polarization characteristics of Newton telescope with the common-path heterodyne interferometry is given. The influences of Newton telescope on s-polarized light and p-polarized light reflectance, phase difference and incident light polarization degree are analyzed with 632.8 nm heterodyne laser source. The curves corresponding to reflectance, phase difference and polarization degree at different incident angles were drawn. The results show that the Newton telescope coated with aluminum produces little influence on the polarization characteristic of incident light, the reflectance difference between s-polarized and p-polarized lights is less than 0.01, and the variation range of the polarization degree is less than 0.07. Therefore, it is suitable for the receiving subsystem of the laser remote polarization imaging system.

**Key words:** optical measurement; common-path heterodyne; reflection coefficient; phase difference; polarization degree

收稿日期: 2007-09-03; 修回日期: 2007-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(40571097); 航空基础科学基金(2005ZF51073)

作者简介: 张绪国(1982-),男,山东济宁人,硕士,主要从事激光遥感偏振成像理论和实验研究。

E-mail: zxg\_ltt@163.com

## 引言

一般光学系统要求对不同偏振状态的光有相同的传输率,而且经过光学系统后光的偏振状态不发生变化,但是对于斜入射的光往往在光学元件的表面会发生一定程度偏振状态的改变。在激光偏振遥感成像中,为了使由目标反射的光经过接收系统后偏振状态改变最小,通常要对整个系统尤其是接收系统的偏振特性进行分析<sup>[1]</sup>。激光遥感成像接收系统一般采用望远镜,这就要求望远镜对接收到的目标后向散射光的影响最小<sup>[2]</sup>。

本文提出利用共路光外差干涉法测量牛顿望远镜偏振特性的方法。共路外差干涉法可以用来测量温度、压力、微小位移的变化,由于参考光束和测量光束在同一光路中,所以不易受到环境扰动与光源强度变化的影响,通常可解析的干涉条纹相位变化约为百万分之一波长,因此具有极高的测量精度和抗干扰能力<sup>[3-4]</sup>。文中分析了共路光外差测量牛顿望远镜偏振特性的原理,给出了牛顿望远镜反射系数、相位差以及散射光偏振度变化与入射角之间的变化关系,结论表明采用镀有铝膜的牛顿望远镜作为激光偏振成像的接收系统是可行的。

## 1 基本原理

### 1.1 牛顿望远镜反射特性

牛顿望远镜反射光路图如图1所示,一平行光束入射到牛顿望远镜主镜,然后反射到副镜上,经过副镜反射后射出。

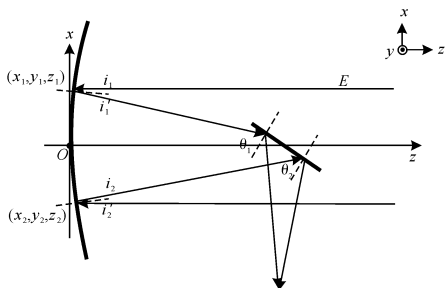


图1 牛顿望远镜反射光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram for reflected beam path of Newton telescope

假设牛顿望远镜主镜抛物面的抛物面方程为

$$x^2 + y^2 = 2pz \quad (1)$$

反射镜与 $(y, z)$ 平面成 $45^\circ$ 角。当入射光束平行 $z$ 轴

入射到望远镜主镜上点 $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $x_1 \geq 0$ , 入射角

$$i = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\frac{p}{2} - \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{2p}} \right] \quad (2)$$

经望远镜主镜反射后,入射到副镜的入射角为

$$-\theta_1 = 90^\circ - \sin^{-1} \left[ \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \left( \frac{p}{2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right)}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + \left( z_1 - \frac{p}{2} \right)^2}} \right] \quad (3)$$

对于 $(y, z)$ 平面以下的光束,即 $x < 0$ ,入射角 $i_2$ 取负值, $\theta_2$ 也取负值(入射角若是从界面法线方向顺时针旋转所测得的值,则为正;反之为负)。根据菲涅耳方程可得s-偏光和p-偏光的振幅反射系数<sup>[5]</sup>为

$$\gamma_p = \frac{n^2 \cos i - \sqrt{n^2 - \sin^2 i}}{n^2 \cos i + \sqrt{n^2 - \sin^2 i}} \quad (4)$$

$$\gamma_s = \frac{\cos i - \sqrt{n^2 - \sin^2 i}}{\cos i + \sqrt{n^2 - \sin^2 i}} \quad (5)$$

经过望远镜主镜和副镜反射后总的反射系数可表示为

$$\gamma_s^{12} = \gamma_s^1 \cdot \gamma_s^2 \quad (6)$$

$$\gamma_p^{12} = \gamma_p^1 \cdot \gamma_p^2 \quad (7)$$

式中: $\gamma_s^1$ 和 $\gamma_s^2$ 为主镜和副镜对应的s-偏光的振幅散射系数; $\gamma_p^1$ 和 $\gamma_p^2$ 为主镜和副镜对应的p-偏光的振幅反射系数。把 $i$ 和 $\theta$ 带入上式就可以求出望远镜总的反射系数。一般望远镜上镀有金属膜,折射率 $n$ 为复数,即 $n' = n + ik$ ,因此(6)式和(7)式为复数,通过(4)式可以看出 $\gamma_s$ 和 $\gamma_p$ 的模为1,所以(6)式和(7)式可以表示为

$$\gamma_s^{12} = e^{i\delta_s}, \quad \gamma_p^{12} = e^{i\delta_p} \quad (8)$$

式中: $\delta_s$ 表示s-偏光振幅反射系数的相位; $\delta_p$ 表示p-偏光振幅反射系数的相位;s-偏光相对于p-偏光的相位差为

$$\varphi = \delta_s - \delta_p \quad (9)$$

### 1.2 共路光外差干涉测量牛顿望远镜偏振特性实验装置及原理

全反射共路光外差法可以通过测量相位差来测量物体的角度和折射率等<sup>[6]</sup>,在全反射共路外差干涉法的测量相位差基础上提出了共路外差干涉测量望远镜偏振特性的方法。实验装置原理图如图2所示,外差光源发出的光经过分束器后,反射光形成参考光,透射光经过透镜和小孔(滤除杂散光)

及扩束透镜后入射到牛顿望远镜主镜,形成测量光束,经副镜反射后射出,被光电探测器接收。

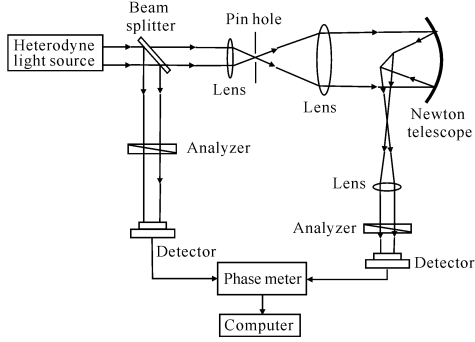


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

入射到望远镜上的光束可以分为 p-偏光和 s-偏光,由于不同入射角反射系数(见(4)式和(5)式)的不同,p-偏光和 s-偏光入射到望远镜的不同点经过反射后幅度和相位将发生变化,通过参考光束和测量光束相位差的比较就可以得出测量光束 s-偏光和 p-偏光相位差的变化。

由光电探测器接收的光信号经过相位差计可以得到 s-偏光和 p-偏光的相位差,同时光电探测器也可以测得 s-偏光和 p-偏光的光强变化。通过相位差和光强的变化就可以求出望远镜对入射光偏振特性的影响。

## 2 分析与讨论

### 2.1 望远镜对入射光的反射系数和相位差的影响

采用波长为 632.8 nm 的激光外差光源,激光器发出的光可以分为 s-偏光和 p-偏光,经分束后分别形成测量光束和参考光束,测量光束入射到镀有铝膜的牛顿望远镜主镜表面(对于入射光波长为 632.8 nm 的激光,铝的反射率为  $n=1.25+7.5i$ )经过副镜反射,最后由光电探测器接收<sup>[7]</sup>。牛顿望远镜的口径 144 mm,焦距 180 mm,代入(1)式可得

$$z = \frac{1}{720}(x^2 + y^2) \quad (-72 \leq x \leq 72; -72 \leq y \leq 72) \quad (10)$$

由(2)式、(3)式、(6)式和(7)式可以得到 s-偏光和 p-偏光的反射系数与入射点位置之间的关系,如图 3 所示。对于不同入射角,牛顿望远镜引起的相位差如图 4 所示。

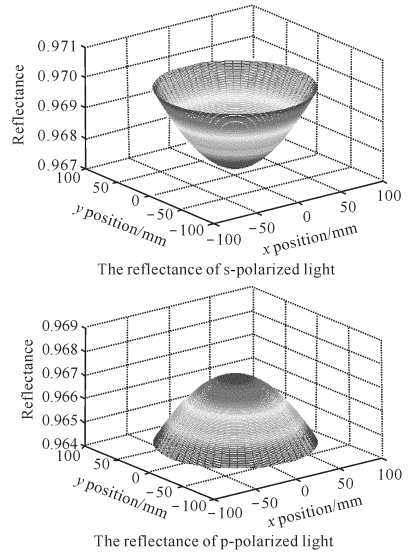


图3 牛顿望远镜主镜上各点对 s-偏光和 p-偏光反射系数的影响

Fig. 3 Effect of each point of Newton telescope primary mirror on s-polarized light and p-polarized light

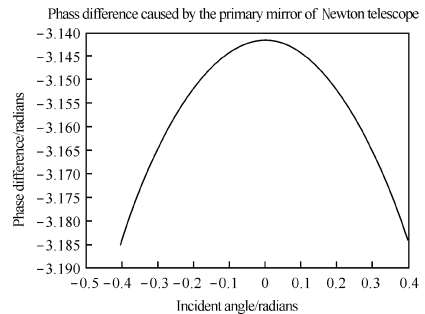


图4 不同入射角引起的相位差

Fig. 4 Phase difference caused by different incident angle

由图 3 可知,对于入射到望远镜的光,望远镜对 s-偏光和 p-偏光有不同的反射系数,但是相差很小,最大不超过 0.01,因此反射后 s-偏光和 p-偏光的强度差别很小,基本上具有相同的反射率。

由图 4 可知,当入射光以不同角度入射到牛顿望远镜主镜时,反射后 s-偏光和 p-偏光相位会发生约为  $\pi$  变化,对于线偏振光其偏振状态基本上基本不发生改变;对于左旋或右旋椭圆偏振光,其偏振方向会发生改变,右旋椭圆偏振光变成左旋,左旋

椭圆偏振光变成右旋。对于望远镜的副镜同样会有相似的特点,也会发生约为  $\pi$  的相位变化,因此相互抵消。入射光经过整个望远镜系统,s-偏光和p-偏光强度都会减小,但是s-偏光和p-偏光强度差别较小;主镜和副镜对偏振方向的影响相互抵消,入射光偏振的旋转方向基本不发生变化。综上可知,望远镜对入射光偏振状态影响较小。

### 2.2 望远镜对入射光偏振度的影响

Stokes 矢量可以表示任意偏振状态的光,假设望远镜接收到的光的 Stokes 矢量<sup>[8]</sup>为

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中:  $S_0$  表示总光强;  $S_1$  表示水平或垂直线偏振光;  $S_2$  表示  $\pm 45^\circ$  线偏振光;  $S_3$  表示右旋或左旋

圆偏振光;  $E_{0x}$  和  $E_{0y}$  表示光波 2 个垂直分量的幅度;  $\delta$  表示相位差。其偏振度可以表示为

$$P_d = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (12)$$

由望远镜接收的光经过反射后出射光的 Stokes 矢量为

$$S' = \begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s^2 E_{0x}^2 + r_p^2 E_{0y}^2 \\ r_s^2 E_{0x}^2 - r_p^2 E_{0y}^2 \\ 2r_s r_p E_{0x} E_{0y} \cos\delta \\ 2r_s r_p E_{0x} E_{0y} \sin\delta \end{pmatrix} \quad (13)$$

由(6)式、(7)式、(12)式和(13)式可求得出射光的偏振度  $P_d'$ 。对于入射光是完全偏振光的情况,根据(12)式和(13)式可以求出出射光也是完全偏振光,其偏振度为 1。对于偏振度为  $P(P < 1)$  的部分偏振光经过望远镜后,出射光偏振度随入射角的变化曲线如图 5 所示。

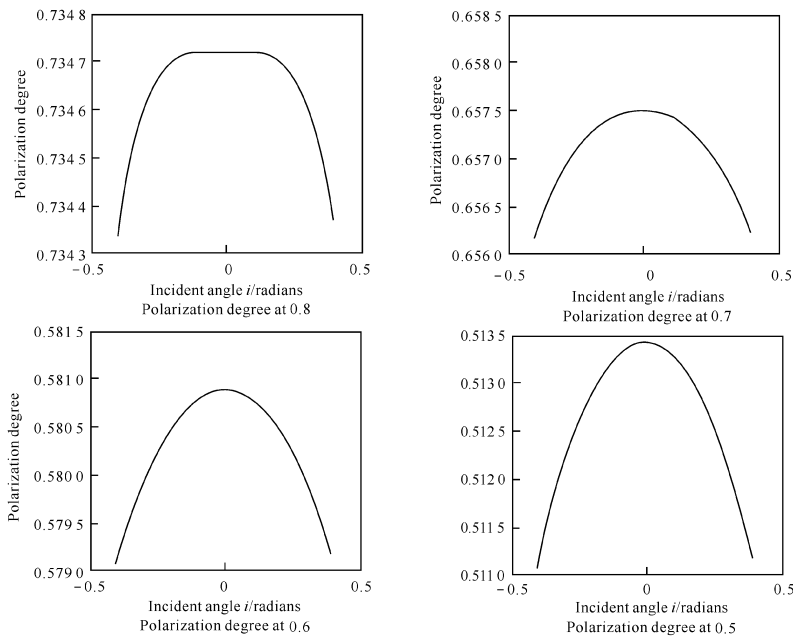


图 5 由牛顿望远镜引起的偏振状态的变化

Fig. 5 Variation of polarization state caused by Newton telescope

由图 5 可知,偏振度变化很小,而且主要集中在望远镜的边缘部分,靠近望远镜中心的部分对入射光偏振度影响较小。靠近望远镜边缘的部分入射角较大,对光的偏振状态影响也就越大,但是望远镜对入射光偏振度的影响最大不超过 0.07,而且入

射光的偏振度大小不同,望远镜对入射光偏振度的影响也不同。

### 3 结论

采用共路外差干涉法测量牛顿望远镜的偏振

特性实验装置简单,具有共路外差干涉测量的优点,精度高、抗干扰能力强。对入射的特定光束,可以直接通过光电探测器和相位差计得到反射光的强度和相位差变化,从而由光强和相位差的变化来分析望远镜各点对入射光偏振状态的影响。通过对镀有铝膜的牛顿望远镜进行分析,可知在激光遥感偏振成像系统中采用镀有铝膜的望远镜是合适的。

#### 参考文献:

- [1] CHIPMAN R A. Polarization analysis of optical systems[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(2): 90-99.
- [2] 赵一鸣,江月松. 非球形粒子散射光的去偏振特性研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(3): 358-362.  
ZHAO Yi-ming, JIANG Yue-song. Depolarization characteristics of scattered light emitted from spherical particles [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(3): 358-362. (in Chinese)
- [3] 赵慧洁,张广军. 影响激光外差高精度计量的几个关键因素[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, 28(2): 221-224.  
ZHAO Hui-jie, ZHANG Guang-jun. Factors affecting the precision of heterodyne interferometer [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(2): 221-224. (in Chinese)
- [4] 马宗峰,张春熹,张朝阳,等. 光学外差探测信噪比研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 889-892.  
MA Zong-feng, ZHANG Chun-xi, ZHANG Chao-yang, et al. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 889-892. (in Chinese)
- [5] 郁道银,谈恒英. *工程光学* [M]. 北京:机械工业出版社,1999.  
YU Dao-yin, TAN Heng-ying. *Engineering optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)
- [6] CHIU M H, SU D C. Angle measurement using total-internal-reflection heterodyne interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(6): 1750-1753.
- [7] VAN STRYLAND E W, WILLIAMS D R, WOLEF W L. *Handbook of optics: II* [M]. New York: McGraw-Hill INC, 1995.
- [8] COLLETT E. *Polarized light, fundamentals and applications* [M]. New York: Marcet Dekker, 1993.