

doi:10.3788/gzxb20154412.1227002

量子光通信中偏振光空间姿态传递

杨海马^{1,2,3}, 马彩文², 王建宇⁴, 张亮⁴, 刘瑾¹, 黄元申¹

(1 上海理工大学 光电学院, 上海 200093)

(2 中科院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:通过设计正交偏振光信标器,实现了空间信标姿态的单光路传递,为星地量子光链路的建立提供了条件.通过分析光学器件,尤其是镀膜器件中偏振信标光的传递特性,仿真分析不同入射角、旋转角条件下,出射信标光的偏振模式.分析了由光学器件引入的位相差和不同反射率、透射率对偏振模式的影响.利用琼斯矩阵推导了马吕斯定律在椭圆偏振光入射时的表达形式,建立起测量椭圆偏振光主偏振方位角模型.利用光电位置传感器接收正交信标光,结合光电位置传感器的光点位置检测能力解耦信标光的俯仰角和方位角,利用光电位置传感器的光强探测能力解耦信标光的偏振基矢角,实现了单器件三维信标姿态测量.实验表明,所述系统具有完成信标光三维姿态检测的能力,可用于星地量子光通信、空间信标姿态检测.

关键词:量子通信; 偏振基矢; 正交信标光; 三维姿态; 空间姿态; 光电位置传感器; 跟瞄系统

中图分类号: TN247; TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1227002-9

The Transmission of Polarized Light of Space Attitude in Quantum Communication

YANG Hai-ma^{1,2,3}, MA Cai-wen², WANG Jian-yu⁴, ZHANG Liang⁴, LIU Jin¹, HUAN Yuan-shen¹

(1 School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: By using the design of the orthogonal polarized light beacon, the single optical path transmission of space beacons gesture was achieved, which provided the conditions for the Satellite-Ground quantum optical link. The transmission characteristic of the polarization through the optical device, especially the coated device was analyzed. A simulation was done to analyze the outgoing beacon light under the condition of the different incident angles and rotation angles. The influence by the phase and reflectivity difference in the optical components was analyzed. A mathematical model of the measurement of polarization azimuth by using the Jones matrix was made to analyze the form of the Malus law in the elliptic polarized light incident. Three-dimension attitude can be obtained by a single Position Sensitive Detector sensor which can receive the beacon light, decouple the angle of polarization and the location of incident light. The experiment data shows that the system has the function of measuring three-dimension attitude of the beacon by a single Position Sensitive Detector sensor. This system provides a solution to the fields of the Satellite-Ground Optical Communication and the measurement of space geometry position.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 61302181)和中国科学院知识创新工程重大项目(No. KG CX1-YW-16)资助

第一作者:杨海马(1979-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为智能光电仪器设计及偏振光空间检测. Email: snowym@sina.com

导师:马彩文(1965-),男,研究员,博士,主要研究方向为光电测控技术. Email: cwma@opt.ac.cn

通讯作者:王建宇(1959-),男,研究员,博士,主要研究方向为量子通信及遥感技术. Email: jianyuwang@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2015-04-07; **录用日期:** 2015-08-15

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Quantum communication; Polarization vector; Orthogonal beacon; Three dimensional attitude; Space attitude; Position Sensitive Detector(PSD) sensor; Automatic Train Protection(ATP) system

OCIS Codes: 270.5565; 010.3310; 000.3110; 140.2020; 310.5448

0 引言

在星地量子光通信中,偏振基矢的保持与检测是保证星地量子光通信成功的前提.如何获得信标系统的偏振基矢,合理利用有限的星地光链路,从中获取实时的信标姿态,是保证星地量子光通信成功的关键^[1].

Zeilinger 研究小组的 Bonato 等人分析了卫星运动对光子偏振态的影响,提出了利用光子时分复用基矢的可行性^[2];日本的 Toyoshima 考虑了从空间传递下来的高偏振激光受到空间及运动的影响,设计了一种周期性调制的信标光系统来完成基矢校正工作^[3].上海技物所的张明等进行了量子信道内偏振基矢的补偿研究^[4];哈工大的张光宇等分析了利用半波片补偿跟踪偏振基矢变化过程,分析了光子偏振态的变化^[5].在利用偏振光进行姿态传递领域,范玲等利用调制偏振光进行空间正交方位传递的可行性^[6];申小军等研究了利用偏振光进行空间垂直方位传递过程^[7-8];杨志勇等利用磁光调制进行偏振光方位失调角的测量^[9];陆卫国等研究了利用渥拉斯顿棱镜进行空间方位角的快速测量^[10];王文倩等利用电光效应实现方位信息传递的可行性^[11].在偏振光传输领域,刘福平详细研究了反射引起的偏振模态变化^[12];高明研究了高斯粗糙面散射光的偏振特性,指出入射角和复折射率影响散射光的椭圆度^[13];汪冰等研究了光束通过自由空间、湍流大气或透镜后,经过光阑光束偏振度所受的影响^[14-15].

已有研究工作虽促进了偏振光在姿态检测领域中的应用^[16-20],但在星地量子光通信中仍缺乏如何实现信标光三维姿态同步测量的研究.本文通过设计一组正交偏振信标光,利用光电位置传感器(Position Sensitive Detector, PSD)实现三维姿态(俯仰、方位及偏振基矢角)的在线检测,并分析了偏振光通过光学系统后的模式变化.

1 双频光信标器姿态传递系统

双频光信标器的光路及姿态传递系统见图 1.

在图 1 中,双频光信标器的光束由两种不同波长

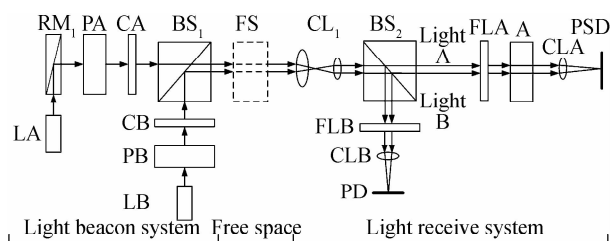


图 1 双频光信标器光路及姿态传递系统框图

Fig. 1 Transfer system block diagram of double frequency beacon light path and attitude

的激光器光束组成.为提高信标光姿态检测效果,降低信标器自身的重量,选用 LD 激光二级管作为信标光源.其中,LA 为波长 635 nm 的红光、出射光功率 25 mW、出射光斑直径 6 mm、发散角小于 1mrad;LB 为波长 532 nm 的绿光、出射光功率 5 mW、出射光斑直径 8 mm、发散角小于 1 mrad.两束激光,LA 经 90°反射镜 RM₁ 反射后(反射的目的是为了合理布局光路,实验中可以不使用该反射镜)与 LB 通过正交放置的偏振片 PA、PB 和补偿片 CA、CB 一起起偏补偿后合束,经合束镜 BS₁ 合束后的光是一束偏振性较好的正交线偏振光.合束镜 BS₁ 的主要功能是进行光束正交整合,向地面姿态解耦系统传递信标器的空间姿态.

信标光经姿态解耦系统跟瞄后,由姿态解耦系统的光学镜组 CL₁、分束镜 BS₂ 会聚到姿态解耦系统的光电探测器上.分束镜 BS₂ 是一种长波通二向色镜(型号为 Thorlabs 的 DMLP567),截止波长 567 nm,目的是对接收的信标光进行分束,形成两束接收光——A 光(以 635 nm 光为主,透射率大于 90%)和 B 光(以 532 nm 光为主,反射率大于 90%).姿态解耦系统分别对 A 光和 B 光进行光电检测.分束后的 A 光经滤光片 FLA(中心波长 635 nm、带通宽度 3 nm)进行二次滤波、检偏器 A(大恒光电 GCL-05,工作波长 500~720 nm,消光比 500:1)检偏后投射到光电位置探测器 PSD 上;B 光经滤光片 FLB(中心波长 532nm、带通宽度 3nm)二次滤波,投射到光电探测器 PD 上(型号为 Thorlabs 的 S120).PSD 探测器(型号为滨松光电子的 S5991)探测 A 光中 635 nm 波长光的光强值和 PSD 面中的光点位置,PD 探测器探测 B 信标光中 532 nm 的光强值. A 光中包含了双频信标器的三维姿态信息,即双频信标器相对于地面姿态解耦系统坐标系的方位、俯仰和主偏振基矢角的信息.

2 偏振光在镀膜界面的传递过程

在图 1 的双频信标光路及姿态传递系统中,利用琼斯矩阵分析信标光的偏振和姿态传递过程.激光器 LA、LB 的出射光一般可以等效为部分偏振光,在右手坐标系下,电矢量可以简化表示为

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $E_x = |A_x| e^{i\delta_x}$ 、 $E_y = |A_y| e^{i\delta_y}$, δ_x 、 δ_y 为 x 、 y 轴上的光分量的绝对相位; A_x 、 A_y 为光分量的振幅值.

总光强 I 可以表示为

$$I = E^* \cdot E \quad (2)$$

其中, $E^* = [E_x^* \ E_y^*]$.

光源 LA、LB 出射光经起偏后,均以光学接收系统的右手坐标系为基准.考虑到空间变换的需要,光学器件的不同分别采用“ p - s ”平行-垂直入射面坐标系、“ t - e ”透光轴-消光轴坐标系、“ f - s ”快-慢轴坐标系表示.采用 R 表示反射型器件的琼斯矩阵, T 表示透射型器件的琼斯矩阵.因为分束镜 BS_2 的存在,接收器 PD、PSD 的坐标系可以等效在相同的一套 XYZ 坐标系内.

LA 的光最终进入 PSD 探测器的表达式为

$$E_{PSDI}^{xy} = T_{CLA}^{xy} \cdot T_A^{xy} \cdot T_{FLA}^{xy} \cdot T_{BS_1}^{xy} \cdot T_{CL_1}^{xy} \cdot T_{FS}^{xy} \cdot T_{BS_1}^{ps} \cdot T_{CA}^{fs} \cdot T_{PA}^{te} \cdot R_{RM_1}^{ps} \cdot E_{LA} \quad (3)$$

其中,方程中各项系数均为各光学部件的琼斯矩阵.

LB 光,最终进入 PD 探测器的表达式按照式(3)的推导过程,可以表示为

$$E_{PDI}^{xy} = T_{CLB}^{xy} \cdot T_{FLB}^{xy} \cdot R_{BS_2}^{xy} \cdot T_{CL_2}^{xy} \cdot T_{PS}^{xy} \cdot R_{BS_1}^{ps} \cdot T_{CB}^{fs} \cdot T_{PB}^{te} \cdot E_{LB} \quad (4)$$

式中,方程等号右边公式中的各项系数为各光学部件的琼斯矩阵.

式(3)、(4)中的坐标系变换关系为:在初始坐标系标定时, RM_1 反射镜的 p - s 坐标系的 p 轴与 PA 的 t - e 坐标系的 t 轴重合; PA、PB 的 t 轴和 CA、CB 的 f - s 坐标系的 f 轴重合; CA 的 f 轴与 BS_1 的入射面 p - s 坐标系的 p 轴重合, CB 的 f 轴与 BS_1 的反射面 s 轴重合.如果 BS_1 的两个波长出射光的消光比受到 BS_1 器件的位相差影响,则可以通过调节四分之一波片构成的补偿片 CA、CB 的入射光轴进行位相差补偿,使得 BS_1 输出的正交偏振光的消光比达到最大值(大于 200 : 1).如果信标器没有运动,则 BS_1 的出射光 p - s 坐标系在光轴上与接收光路的 x - y 坐标系重合.如果信标器在空间上因为运动产生了扭转,则该扭转角会引起信标光主偏振角的变化,称为偏振基矢角的变化,这个变化过程可以表示为

$$E_{FSI}^{xy} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot E_{BS_1}^{ps} \quad (5)$$

式中, θ 为信标器相对地面接收系统扭转引起的偏振基矢角变化值, $E_{BS_1}^{ps}$ 为 BS_1 出射光矢量, E_{FSI}^{xy} 为入射到自由空间时的光矢量.

2.1 镀膜界面的反射和透射

光路中纯透射器件如空气、透镜等,一般可以作为理想器件进行分析,纯反射器件和部分反射、透射器件,需要考虑光学器件对入射偏振光的位相及反射率、透射率的影响.在图 1 中,反射镜 RM、分束镜 BS 的表面反射、折射过程可以表示为图 2 结构.

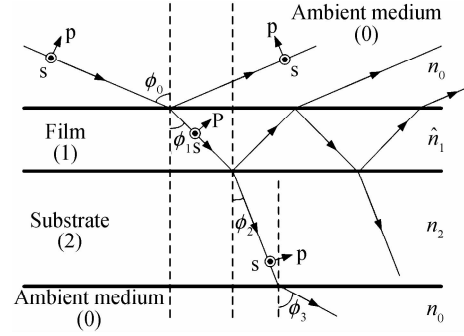


图 2 入射光在镀膜部件表面的反射和透射
Fig. 2 The reflection and transmission on the surface of the coated parts

薄膜可以看作是多层光学膜的等效.光线经薄膜多次反射、透射后,环境介质(0)、薄膜(1)、基片(2)的反射、透射系数可表示为^[8-9]

$$\begin{cases} r_{02} = \frac{r_{01} + r_{12} e^{-i2\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{-i2\beta_1}} \\ t_{02} = \frac{t_{01} \cdot t_{12} \cdot e^{-i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{-i2\beta_1}} \end{cases} \quad (6)$$

对于图 2 结构,界面系统的反射系数主要由 r_{02} 决定,透射系数忽略 r_{20} 项的影响,则有

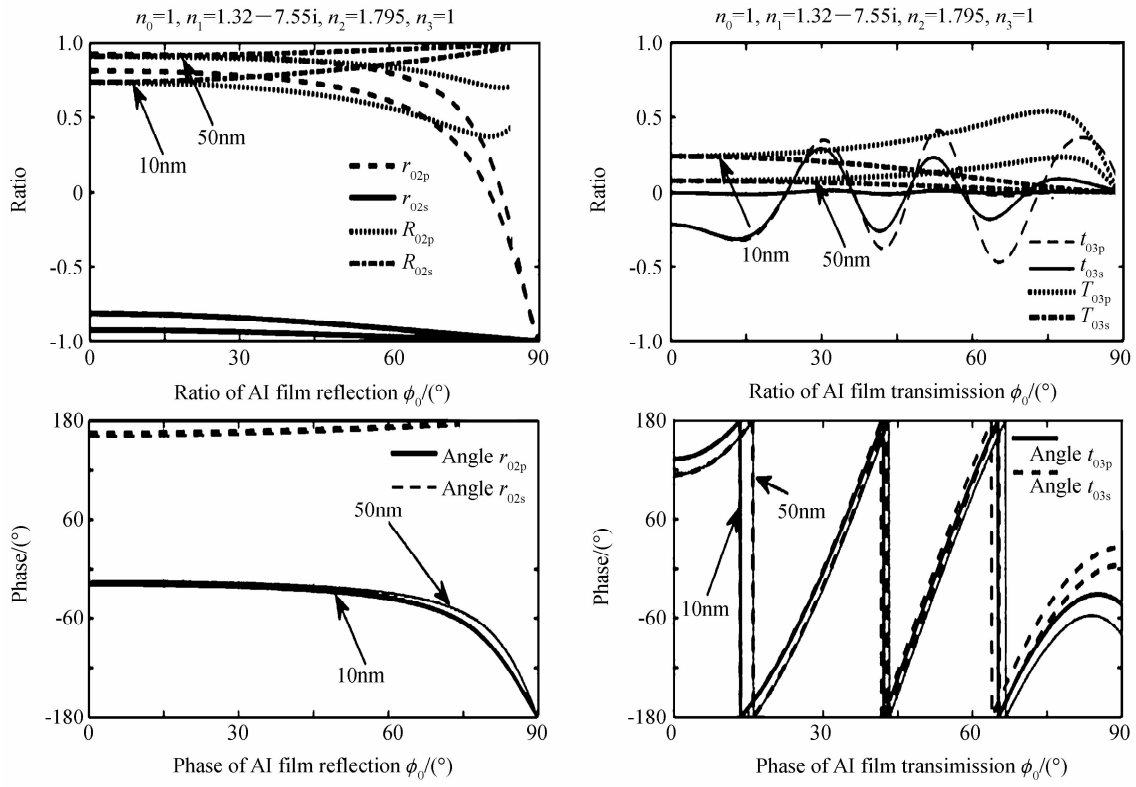
$$\begin{cases} R' = r_{02} \\ T' = t_{02} \cdot t_{20} e^{-i\beta_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, β_2 为基片(2)产生的位相变化.因此,针对图 2 中光学器件的反射、透射对入射偏振光的影响,可以主要考虑发生在 0~2 层界面处的反射系数 r_{02} 和透射系数 t_{02} ,根据 i 层界面处的菲涅尔公式,可知

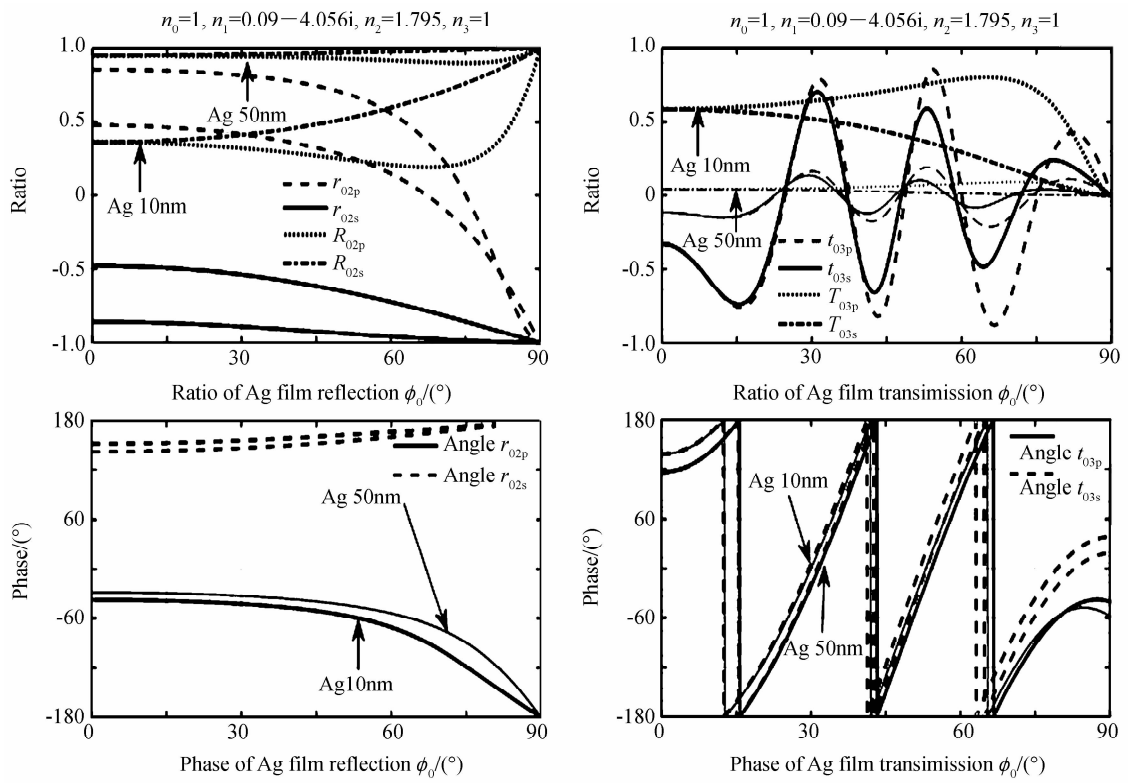
$$\begin{cases} r_{i,i+1p} = \frac{n_{i+1} \cos \phi_i - n_i \cos \phi_{i+1}}{n_{i+1} \cos \phi_i + n_i \cos \phi_{i+1}} \\ t_{i,i+1p} = \frac{2n_i \cos \phi_i}{n_{i+1} \cos \phi_i + n_i \cos \phi_{i+1}} \\ r_{i,i+1s} = \frac{n_i \cos \phi_i - n_{i+1} \cos \phi_{i+1}}{n_i \cos \phi_i + n_{i+1} \cos \phi_{i+1}} \\ t_{i,i+1s} = \frac{2n_i \cos \phi_i}{n_i \cos \phi_i + n_{i+1} \cos \phi_{i+1}} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7),利用 Matlab 分析反射系数 R' 和透射系数 T' 随入射角 ϕ_0 的变化.对于波长 $\lambda = 635$ nm 的激光,分别观察 10 nm、50 nm 厚度的铝膜和银膜的反射-透射系数、反射-透射率的数值及相位变化,如图 3.图 3 中显示的是金属膜复数折射率的实数部分.

同时, s 光、 p 光反射系数的位相差随入射角的增大而增大,透射系数的位相差与反射情况相同; s 光、 p 光反射系数的比值变化存在一个极值点,透射系数的比值变化随入射角增大而增大.对于 10 nm、50 nm 的铝膜和银膜, s 光、 p 光的位相差及反射系数和透射系数变化,如图 4.



(a) Process of Al's film reflection and transmission



(b) Process of Ag's film reflection and transmission

图 3 不同金属膜反射-透射过程分析

Fig. 3 Analysis of different metallic film reflection transmission process

由图 3、图 4 的分析过程可知,偏振光经光学器件反射、透射后,偏振光的模态会产生复杂的变化过程,

利用偏振光进行姿态角度传递时,需要考虑光学器件、镀膜、光束入射角等条件才能准确地获取偏振光的方

位角度信息.

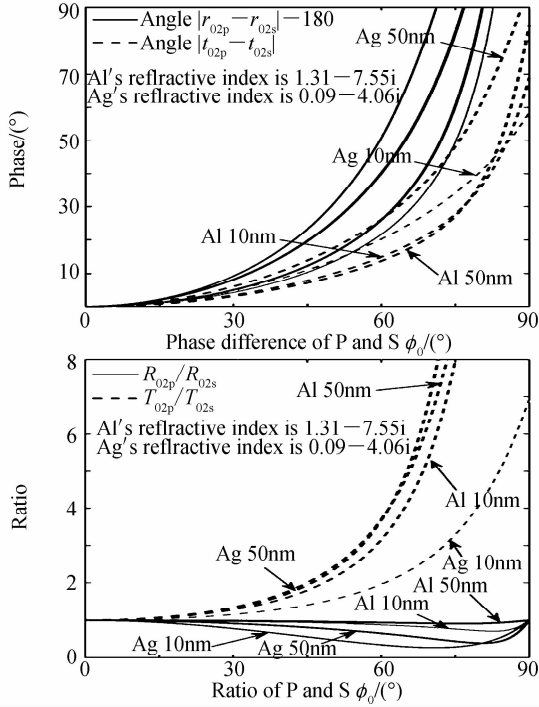


图4 金属膜反射-透射过程位相差及比值变化
Fig. 4 Metallic film reflection and transmission phase difference and ratio change

2.2 椭圆偏光 Malus 定律

马吕斯(Malus)定律解释了线偏振光入射时,经检偏后输出光强与入射光强之间的关系.对于一般意义上的椭圆偏振光,需要考虑椭圆偏振光椭圆率角的影响.这里,设一束振幅为 A ,方位角为 0° ,初始相位角为 δ ,椭圆率角为 ϵ 的椭圆偏光,可以表示为

$$\mathbf{E}_L^{xy} = A e^{i\delta} \begin{bmatrix} \cos \epsilon \\ i \sin \epsilon \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过与椭圆偏光主基矢角成 θ 的检偏器,输出光的幅值变化为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_A^{xy} &= \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{E}_L^{xy} = A e^{i\delta} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \epsilon \\ i \sin \epsilon \end{bmatrix} \\ &= A e^{i\delta} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \cos \epsilon + i \sin \theta \cos \theta \sin \epsilon \\ \sin \theta \cos \theta \cos \epsilon + i \sin^2 \theta \sin \epsilon \end{bmatrix} \\ &= A e^{i\delta} (\cos \theta \cos \epsilon + i \sin \theta \sin \epsilon) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,输出光为线偏振光,符合实际情况.出射光的光强可由式(2)推导为

$$I_A = \mathbf{E}_A^* \cdot \mathbf{E}_A = A^2 (\cos^2 \theta \cos^2 \epsilon + \sin^2 \theta \sin^2 \epsilon) \quad (11)$$

在椭圆率角为 0° ,即被检测光为线偏振光时,式(11)可表示为

$$I_A = A^2 \cos^2 \theta \quad (12)$$

此时是 Malus 定理的定义式.在椭圆率角为 $\pi/4$ 时,即被检测光为圆偏振光时,式(11)变形为

$$I_A = A^2 / 2 \quad (13)$$

此时表示的是自然光的检偏器输出,符合实际的物理现象.式(11)归一化后,测量的光强与椭圆率角的关系,如图5.

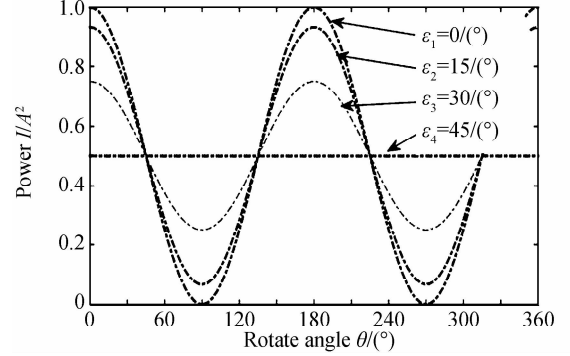


图5 归一化光强与椭圆率角关系

Fig. 5 Normalized intensity and the ellipticity angle relation

图5表明,当椭圆率角变大时,光强幅值变化范围变小.在偏振光姿态检测中,因为旋转运动和光学器件本身位相差造成的椭圆率的变化,都会引起探测器光强最大、最小值的起伏,要想根据光强起伏判断偏振光的偏振角度,需要综合考虑各种影响因素.

3 二维 PSD 测量信标的三维姿态

二维 PSD 探测器除了可以进行 x 、 y 方向上的光点位置检测外,四个电极的光电流总和也代表了入射到探测器的总光强,利用 PSD 探测器的这个性质,可以实现在一个 PSD 器件上进行三维偏振光空间姿态检测的目的.

信标光进入 PSD 探测器的电分量为 \mathbf{E}_{PSDI}^{xy} ,进入 PD 探测器的电分量为 \mathbf{E}_{PDI}^{xy} .在保证信标光入射角近轴入射时,光路本身造成的位相差和反射、透射率将会保持恒定.此时,入射偏振光偏振基矢角的检测,只需考虑信标光旋转造成的影响,其余干扰因素可以进行查表修正.

在图1中,进入 PSD 探测器的是激光器 A 的部分光强 I'_A ,进入 PD 探测器的是激光器 B 的部分光强 I'_B .PSD 接收端的探测光强与信标光旋转的方位角间满足式(11)的形式,并与 PD 接收端的光强间存在比例关系,此时有

$$\begin{cases} I'_A = A'^2 (\cos^2 \theta \cos^2 \epsilon + \sin^2 \theta \sin^2 \epsilon) \\ I'_B = B'^2 \\ \eta = A'^2 / B'^2 \end{cases} \quad (14)$$

A' 为接收的信标光 A 光的幅值, B' 为接收的信标光 B 光的幅值,合并公式(14)并简化后,得到

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \arccos \left[\frac{1}{\cos 2\epsilon} \cdot \left(\frac{2I'_A}{\eta I'_B} - 1 \right) \right] \quad (15)$$

通过闭环控制光源 A、B 光的光强,可获得固定的光强比,此时 $\eta=5$,则在式(15)中,由于出射光源 A、B 的光强比值固定,只要实时测量分束镜 BS_2 分束后的

A、B 光进入各自探测器的光强 I_A 、 I_B ，就可以获得当前入射偏振光的主方位角 θ 。

4 实验数据及分析

在图 1 的系统中，核心是利用 PSD 探测器进行信标光的三维姿态测量。由于偏振光经过光学器件后，出射光偏振模式会发生变化。因此，系统进行三维姿态检测时，为保证精度需要分为两个过程。第一步，利用二维 PSD 探测器的光点位置检测能力，引导信标姿态解耦系统跟踪指向信标光，当信标光引入到近轴视场时，利用信标光强判断信标光的偏振基矢角度，从而完成信标光的三维姿态解耦过程。

PSD 探测器位置分辨能力检测，系统见图 6。

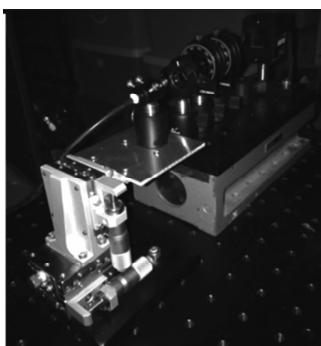


图 6 PSD 位置分辨率系统
Fig. 6 PSD position resolution system

在暗室中进行固定点稳态测试时，PSD 的输出数据如图 7。

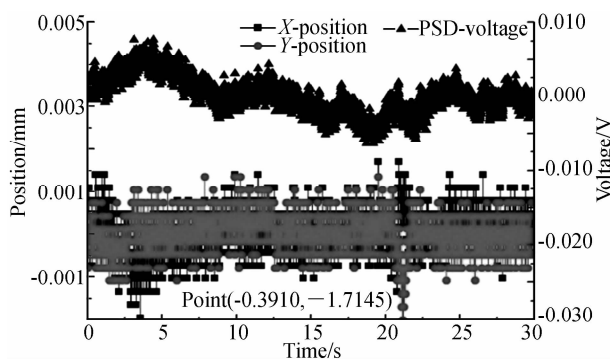


图 7 PSD 位置稳定性数据
Fig. 7 PSD position stability data

从图 7 中可以看出，PSD 的稳态数据 X、Y 坐标值可以稳定在 $\pm 1 \mu\text{m}$ ，与光强成正比的 Voltage 值，可以稳定在 $\pm 5 \text{ mV}$ 。PSD 探测器的输出电压值和 PD 光功率计之间成良好的线性关系见图 8。

PSD 的位置分辨率及精度测量，由手动二维位移台产生 X 向、Y 向 $10 \mu\text{m}$ 的步进位移，XY 向位置数据的输出，如图 9。其中，XY 位移台最小位移格数代表 $10 \mu\text{m}$ 。

图 9 中的数据表明 PSD 具有优良的位置精度和

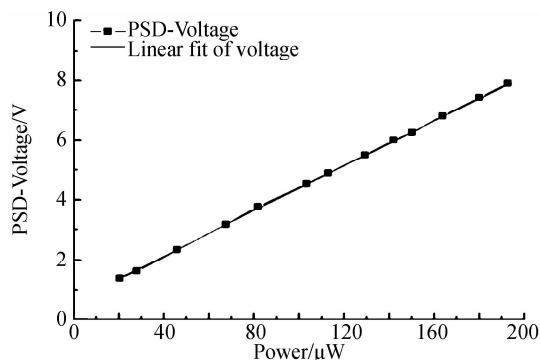
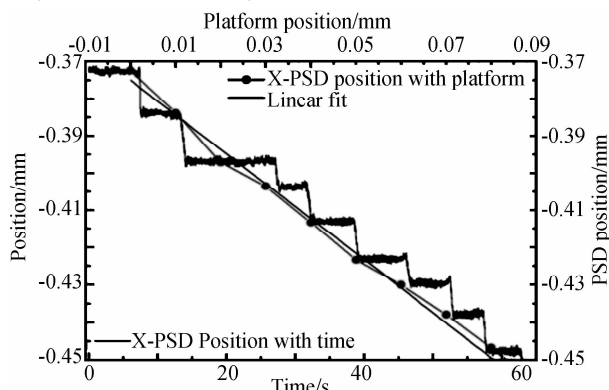


图 8 PSD 电压输出与 PD 光强输出关系
Fig. 8 Relationship between PSD voltage and PD power
位移分辨率。由于手动位移台的移动存在手动误差，PSD 的增量绝对精度在小范围时，可以验证优于 $10 \mu\text{m}$ ，分辨率优于 $2 \mu\text{m}$ 。



(a) X-PSD position with time

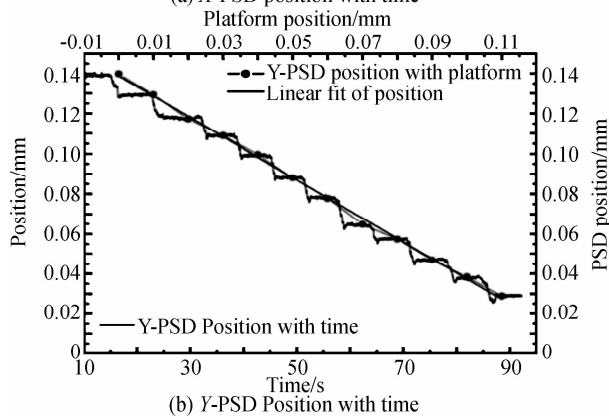


图 9 PSD XY 位移测试

Fig. 9 PSD XY displacement testing

图 10 为验证 PSD 探测器偏振光强检测能力的实验系统。

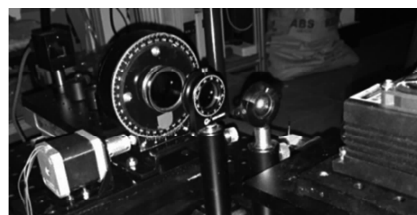


图 10 PSD 偏振光强测试
Fig. 10 PSD polarization testing

在图 10 中,旋转电机带动检偏器旋转,PSD 获得检偏后的位置、光强输出.输出光强变化和 PSD 位置坐标间的关系,如图 11.

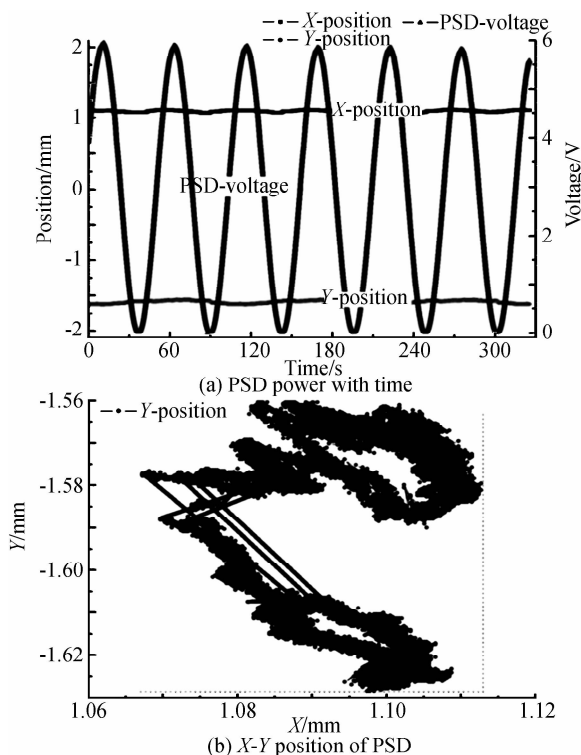


图 11 PSD 偏振测试数据

Fig. 11 The data of PSD polarization testing

从图 11 可以看出,PSD 作为光强探测器使用时,总强度信息反应了偏振角度的变化,XY 轴的数据反

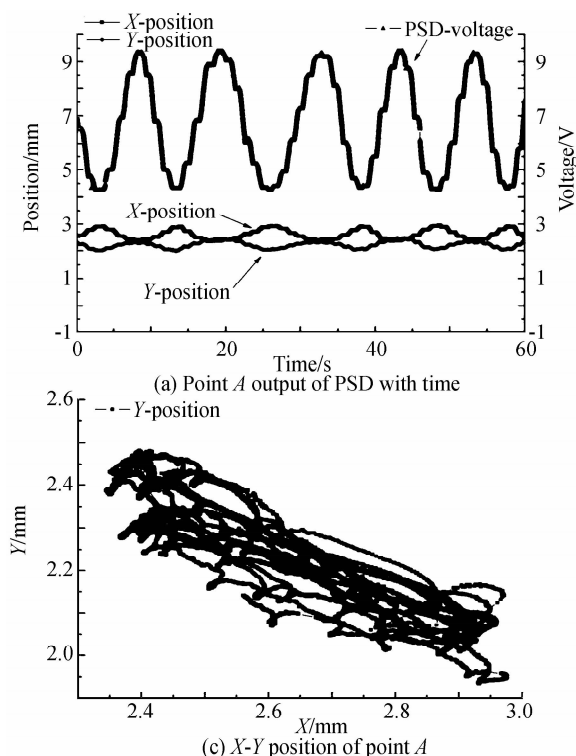


图 13 信标光点位置坐标与偏振光强

Fig. 13 The beacon light spot position and intensity of polarization

应了光点的波动. XY 值的波动范围在 $\pm 30 \mu\text{m}$ 范围内,此范围的光点变化经分析主要由一维偏振转台上检偏器安装的不垂直性造成.图 11 的数据表明,利用 PSD 器件作为信标光三维姿态测量用传感器是完全可行的.

信标器三维姿态测试实验中,信标光的旋转系统及实验系统见图 12.分度盘的最小分辨角度为 $1'$,旋转范围 $0 \sim 360^\circ$.实验过程抽取了两组实验结果,第一组的信标光进入 PSD 的光点位置在 PSD 平面的 Point A(2.50,2.30)点位置处,信标器旋转;第二组的信标光在 PSD 平面的 Point B(-0.45,1.45)点位置处,信标器旋转.

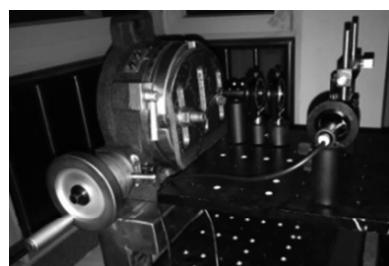
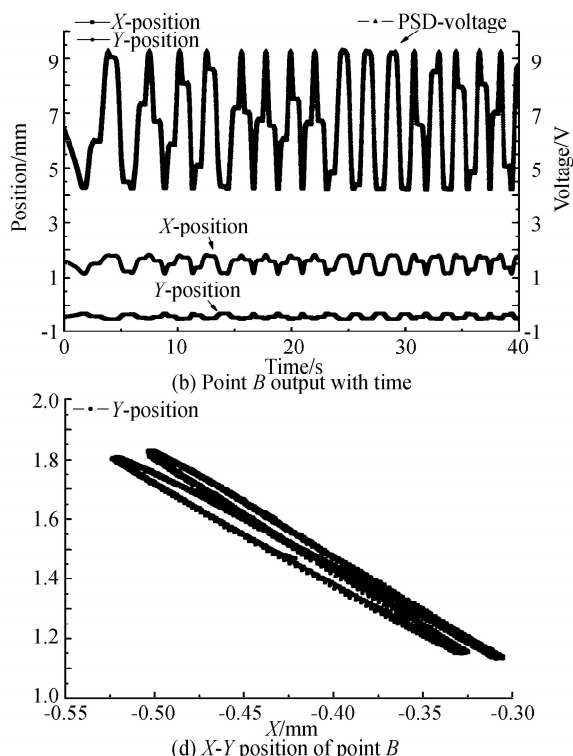


图 12 实验简图

Fig. 12 The experimental schematic diagram

在图 12 中,通过逆时针旋转信标器后,射入 PSD 光点位置与总光强变化间的关系,如图 13.在图 13(a)、图 13(c)中,光点位置的波动范围在 $0.7 \sim 0.7 \text{ mm}$ 区域内;在图 13(b)、图 13(d)中光点波动范围在 $0.25 \sim 0.8 \text{ mm}$ 区域内.之所以位置波动较大,是因为在实验



系统 12 中,信标旋转装置为手动旋转,造成信标器在旋转过程中有一定偏心应力变化,引起了测试误差。

图 13(a)中的 PSD 光强数据用于偏振光方位角检测时,利用式(15)(此时 I'_B 为已知常数)将探测值换算为偏振基矢角度后,可以得到最终的一组结果,如图 14。

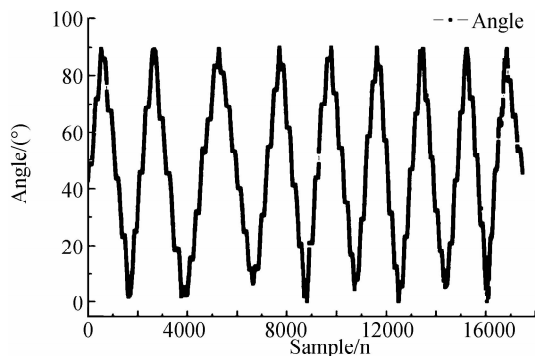


图 14 偏振基矢角度

Fig. 14 The polarization vector angle

图 14 反应了椭圆偏振光空间旋转时,PSD 的偏振光方位角输出。由图 14 可知,椭圆偏振光空间旋转一周后,输出光强对应的偏振基矢角会在 $0\sim 90^\circ$ 内周期性重复四次。

图 14 的方位角测角精度,受到 PSD 接收偏振光的光强范围限制。当偏振光强为 PSD 探测范围 $0\sim 10$ V 的 ζ 倍时,分析此时方位角的检测精度。 $\zeta=1$ 时,PSD 偏振光实际输出范围为 $0\sim 10$ V; $\zeta=0.6$ 时,PSD 偏振光输出范围为 $0\sim 6$ V。取 PSD 输出电压的最小分辨值为 5 mV,可以获得式(15)最大、最小偏振角度的分辨精度,如图 15。

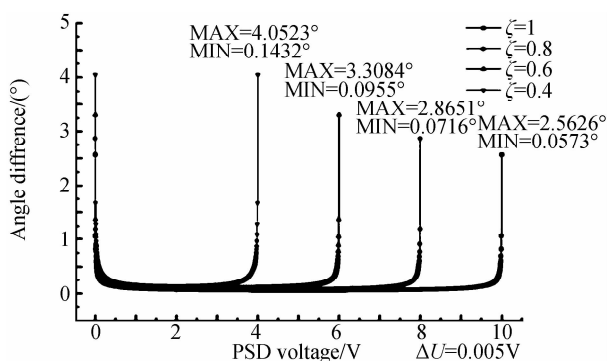


图 15 偏振基矢角度理论精度

Fig. 15 Theoretical accuracy of polarization vector angle

4 结论

通过光束合束,产生一组双频正交信标光,传送光信标器的三维姿态,经地面姿态解耦系统角度解耦,实现了信标光的俯仰、方位和偏振基矢角的三维同步测量。分析了光学器件金属膜等复折射率薄膜的反射、透射特性和出射光偏振模式变化,为偏振光应用提供了

直观的数值仿真结果。拓展了 Malus 定律在椭圆偏振光检测中的应用。通过实验,验证了利用 PSD 器件进行信标三维姿态检测的可行性,为偏振光通信及信标 ATP 跟踪系统设计提供一种新颖的设计思路。

参考文献

- [1] ZHANG M, ZHANG L, WU J C, *et al.* Detection and compensation of basis deviation in satellite-to-ground quantum communications[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(8):9871-9886.
- [2] BONATO C, ASPELMAYER M. Influence of satellite motion on polarization qubits in a space-earth quantum communication link[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(21):10050-10059.
- [3] TOYOSHIMA M, TAKENAKA H, SHOJI Y, *et al.* Polarization measurements through space to ground atmospheric propagation paths by using a highly polarized laser source in space[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25):22333-22340.
- [4] ZHANG Ming. Research of the basis detection and compensation in free-space quantum key distribution [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2014. 张明. 自由空间量子密钥分发中偏振检测与基矢校正的研究 [D]. 上海:中科院上海技术物理研究所, 2014.
- [5] MA Jing, ZHANG Guang-yu, RONG Yi-wen, *et al.* Theoretical analysis of polarization tracking based on half-wave plate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 24-28. 马晶,张光宇,戎亦文,等. 基于半波片的偏振跟踪理论分析. 物理学报, 2006, **55**(1):24-28.
- [6] FAN Ling, SONG Fei-jun. Azimuthal information transmitting system based on modulated polarization light [J]. *Optical Technique*, 2007, **36**(s): 166-168. 范玲,宋菲君. 基于调制偏振光的空间正交方位信息传递系统 [J]. 光学技术, 2007, **36**(s):166-168.
- [7] SHEN Xiao-jun, MA Cai-wen, DONG Xiao-na, *et al.* A kind of disconnected mechanically azimuth measuring and synchronizing system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 892-896. 申小军,马彩文,董晓娜,等. 一种无机械连接的方位测量同步系统[J]. 光子学报, 2001, **30**(7): 892-896.
- [8] DONG Xiao-na. The research on technique of passing azimuth angle vertically [D]. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2001. 董晓娜. 方位垂直传递技术 [D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001.
- [9] YANG Zhi-yong, HUANG Xian-xiang, ZHOU Zhao-fa, *et al.* New high-precision method of measuring apatial azimuth based on magneto-optic modulation polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11):166-170. 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 基于磁光调制偏振光的方位失调角高精度测量新方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(11):166-170.
- [10] LU Wei-guo, WU Yi-ming, GAO Li-min, *et al.* Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3):539-545. 陆卫国,吴易明,高立民,等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(3):539-545.
- [11] WANG Wen-qian, LV Fu-yun, SHENG Qiu-qin, *et al.* Theory analysis of azimuth information transmission by using electro-optic effect [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(5):603-606. 王文倩,吕福云,盛秋琴,等. 利用电光效应实现方位信息传递的理论分析与误差分析[J]. 量子电子学报, 2003, **20**(5):603-606.
- [12] WANG An-ling, LIU Fu-ping, ZHU Xiao-feng, *et al.* The reflection properties of multilayer anti-counterfeiting optical

- films for vertical-polarized wave[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0831002.
- 王安玲,刘福平,朱晓峰,等. 多层光变防伪膜的非均匀垂直偏振光反射特性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8):0831002.
- [13] GAO Ming, SONG Chong, GONG Lei. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(12):1213002.
- 高明,宋冲,巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2013, **40**(12):1213002.
- [14] WANG Bing, FEI Jin-cheng, CUI Zhi-feng, *et al.* Research of degree of polarization of PCELG beam propagating through a circular aperture[J]. *Laser technology*, 2013, **37**(5):672-678.
- 汪冰,费津程,崔执凤,等. PCELG 光束通过光阑传输后偏振度的研究[J]. *激光技术*, 2013, **37**(5):672-678.
- [15] LI Gao-ping, WANG Lei, XIE Yi. Research on measurement technology for degree of polarization of optical lens [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2009, **29**(5):55-57.
- 黎高平,王雷,谢毅. 光学镜头偏振度测试技术研究[J]. *宇航计测技术*, 2009, **29**(5):55-57.
- [16] LI Cui-li, SUN Xiao-bing, WANG Han, *et al.* Accuracy analysis of simultaneous polarized measurement based on polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(4): 0412004.
- 李翠丽,孙晓兵,王涵,等. 基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析[J]. *光学学报*, 2014, **34**(4): 0412004.
- [17] DONG Juan, LI Yan-qiu. Effect of assembly and manufacturing error for wide-viewing-angle quarter waveplate on polarimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(6): 0612006.
- 董娟,李艳秋. 宽视场角 1/4 波片装调和加工误差对偏振检测的影响[J]. *光学学报*, 2013, **33**(6):0612006.
- [18] QIU Cheng-feng, HONG Jin, SUN Xiao-bing, *et al.* Reflection polarization properties of aluminum mirror[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(4):312-315.
- 邱成锋,洪津,孙晓兵,等. 镀铝镜偏振特性研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(4): 312-315.
- [19] WANG Li-juan, HUANG Zuo-hua, CHEN Feng-chao. Polarization status of polarized light passing through convex lens[J]. *Optics&Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(6): 24-26.
- 王礼娟,黄佐华,陈凤超. 偏振光通过透镜的偏振状态分析[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(6):24-26.
- [20] MA Li-xiang, LI Fan-ming, NIU Ji-yong, *et al.* Polarization model based on complex refractive index and its applications [J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(10):1138-1141.
- 马利祥,李范鸣,牛继勇,等. 基于复折射率的偏振模型及其应用[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(10):1138-1141.