

# 角反射器对调制偏振光的偏振响应研究

高书苑<sup>1,2</sup>, 石俊凯<sup>2</sup>, 纪荣祎<sup>2</sup>, 黎尧<sup>2</sup>, 周维虎<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

<sup>2</sup>中国科学院光电研究院激光测量技术研究室, 北京 100094;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 偏振调制测距方法利用往返调制偏振光传递待测距离相位信息,角反射器作为其合作目标,其对调制偏振光的偏振响应会影响系统性能。为研究该响应,提出调制偏振光的复信号描述方法,在测量系统的全局坐标系下,结合偏振传递参数获得反射调制偏振光的复信号表示。分析了正入射时未镀膜实心(BK7)和空心(Au膜层)角反射器对调制偏振光的偏振响应特性;比较三种常用金属膜层对调制偏振光的保偏性能,并分析角反射器姿态角对保偏特性的影响。计算结果表明:Ag膜层对调制偏振光的保偏性能优于Au膜层和Al膜层;全局坐标系下调制偏振光振幅比受偏摆角影响显著,相位延迟受俯仰角影响显著。研究结果可为偏振调制测距系统的优化设计提供理论指导。

**关键词** 测量;激光测距;偏振响应;调制偏振光;角反射器

中图分类号 TH711

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1204005

## Polarization Response of Retroreflector to Polarization-Modulated Light

Gao Shuyuan<sup>1,2</sup>, Shi Junkai<sup>2</sup>, Ji Rongyi<sup>2</sup>, Li Yao<sup>2</sup>, Zhou Weihu<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;*

<sup>2</sup>*Laboratory of Laser Measurement Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

<sup>3</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** The polarization modulation ranging method uses the polarization-modulated light to transmit the measured distance phase information and the polarization response of the retroreflector as its cooperative target affects the system performance. In order to study this response, a complex signal description method of polarization-modulated light is presented. In the global coordinate system, the complex signal representation of reflected polarization-modulated light is obtained with the polarization transfer parameters. Under normal incidence, the polarization responses of uncoated solid (BK7) and hollow (Au film) retroreflectors to polarization-modulated light are analyzed, the polarization-preservation performances of three kinds of common metal coatings to the polarization-modulated light are compared, and the influence of attitude angle of the retroreflector on the polarization-preservation properties is analyzed. The calculation results show that the polarization-preservation performance of Ag film is better than those of Au film and Al film. In the global coordinate system, the amplitude ratio of polarization-modulated light is significantly affected by the deflection angle, and the phase delay is significantly affected by the pitching angle. These results can provide a theoretical guidance for the optimal design of a polarization modulation ranging system.

**Key words** measurement; laser ranging; polarization response; polarization-modulated light; retroreflector

**OCIS codes** 120.4630; 120.5700; 080.1753; 260.5430

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-08-13; 录用日期: 2018-08-21

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ09070907)、国家自然科学基金(61475162)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-JSC008)、青岛市创业创新领军人才项目[15-10-3-15-(40)-zch]

\* E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn

# 1 引 言

调制偏振光具有很高的时间分辨率和良好的抗干扰能力,在精密测量<sup>[1-2]</sup>、空间光通信<sup>[3]</sup>、电磁脉冲检测等领域具有很好的应用前景<sup>[4-6]</sup>。偏振调制测距将待测距离对应的相位信息加载到由电光效应产生的高速调制偏振光中,通过求解扫频调制下的偏振干涉光强,获得多个相邻零相差点对应的频率值,进而解算得到距离值<sup>[7-8]</sup>。与传统相位测距法相比,偏振调制测距法具有抗大气扰动强、精度高、无模糊距离等优点<sup>[9-11]</sup>。该方法的测距精度取决于零相差点的频率求解精度,但测量光偏振参数的变化会影响频率获取的准确性。而角反射器作为偏振调制测距系统中的主要反射部件,测量光经角反射器反射后会产生附加相移和振幅比偏差,影响零相差点频率的估计精度<sup>[12]</sup>。

角反射器的偏振响应常用分析方法有琼斯矢量法<sup>[13-15]</sup>、斯托克斯矢量法<sup>[16]</sup>、三维偏振追迹法<sup>[14-15,17]</sup>等。上述方法主要针对角反射器的静态偏振响应特性,无法表征调制偏振光的调制频率、调制深度等特征参量的影响,且模型多建立在角反射器局部坐标系,未考虑实际应用中角反射器姿态角对测量系统的影响。针对偏振调制测距系统的特点,本文利用复振幅比(CAR)信号描述随时间变化的偏振态,在测量系统的全局坐标下建

立角反射器的偏振传递函数模型,从时域和频域方面分析光束正入射时,未镀膜实心(BK7)和空心镀膜(Au膜层)角反射器对调制偏振光的偏振响应特性,同时比较常用金属膜层对调制偏振光保偏性能的影响,并分析角反射器姿态角对保偏特性的影响。

## 2 角反射器对调制偏振光的偏振响应模型

### 2.1 调制偏振光的复信号描述

偏振光矢量  $\mathbf{E}$  可以表示为正交线偏振光  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{P}$  矢量的叠加,且矢量  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{P}$  的 CAR 可唯一确定该偏振态,在偏振复平面上的表达式为<sup>[18]</sup>

$$\mathbf{E} = E_y \mathbf{S} + E_x \mathbf{P}, \chi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{|E_y|}{|E_x|} \cdot \exp(i\delta), \quad (1)$$

式中,  $|E_y|$  和  $|E_x|$  分别为  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{P}$  的振幅,  $\delta = \delta_y - \delta_x$  为  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{P}$  的相位差,  $\chi$  为偏振光的 CAR。

当偏振光被线性调制时,偏振光可表示为  $\chi = A \exp(ikft)$ , 其中,  $A$  为  $\mathbf{S}$  光和  $\mathbf{P}$  光的振幅比,  $k$  为调制度,  $f$  为调制频率。在偏振调制应用中,  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{P}$  常为等振幅分量,此时  $A$  为 1。文中,  $f = 9 \text{ kHz}$ , 对应的 CAR 曲线如图 1(a) 所示, 将其投影至复平面后 CAR 投影曲线如图 1(b) 所示。该信号的时域 CAR 曲线在时间轴上表现为匀速变化的螺旋线, 其频域响应为峰值在  $9 \text{ kHz}$  的单峰谱。

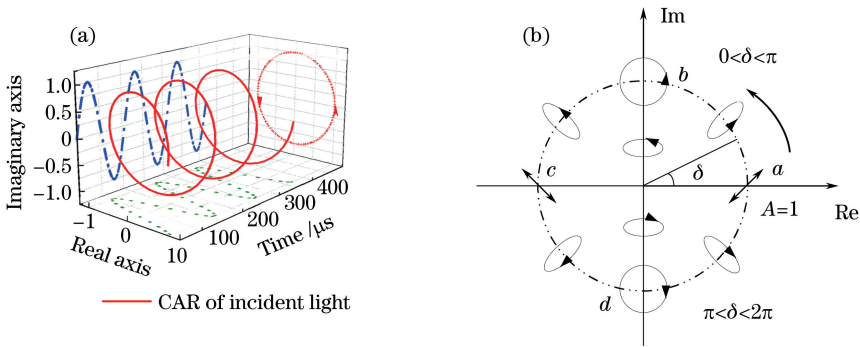


图 1 调制偏振光的 CAR 表示。(a) 调制偏振光的 CAR 曲线; (b) CAR 曲线在复平面的投影

Fig. 1 CAR representation of polarization-modulated light. (a) CAR curve of polarization-modulated light; (b) projection of CAR curve in complex plane

当线性调制偏振光入射到角反射器时,结合琼斯矩阵可以建立角反射器的偏振传递函数,即<sup>[18]</sup>

$$\chi_o = \frac{T_{22}\chi_i + T_{21}}{T_{12}\chi_i + T_{11}}, \quad (2)$$

式中:  $\chi_i$  和  $\chi_o$  分别为入射偏振光和反射偏振光的 CAR;  $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$  分别为角反射器的琼斯矩阵  $\mathbf{J}$  对应的元素,即偏振传递参数。由于角反射器

是瞬时系统,通过入射光的 CAR 可直接计算得到反射偏振光的 CAR。

### 2.2 偏振调制测距系统全局坐标下的偏振传递参数

偏振调制测距系统光路结构如图 2(a) 所示,激光器发出的线偏振光经过偏振分光棱镜(PBS)形成等幅  $\mathbf{S}$  光和  $\mathbf{P}$  光,并在电光相位调制器中形成相位差连

续变化的调制光,经一段待测距离后被角反射器反射并原路返回调制器,两次调制的相位差被 PBS 解调并被探测器接收。系统中 1/4 波片(QWP)用来补偿电光晶体热致双折射引起的偏振旋转。

系统中角反射器可被描述为图 2(b)所示的三

个相互垂直的平面(分别为平面 1、2、3)。利用测量光 P 和 S 振动方向和光轴方向建立系统全局坐标系  $x-y-k$ ,则角反射器相对测量系统的姿态可被描述为绕  $x$  轴旋转的俯仰角  $\alpha$  和绕  $y$  轴旋转的偏摆角  $\gamma$ 。

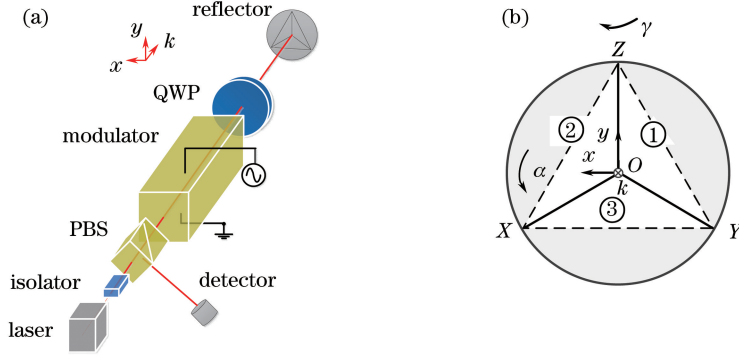


图 2 偏振调制测距系统示意图。(a)偏振调制测距系统光路结构;(b)全局坐标下的角反射器

Fig. 2 Schematic of polarization modulation ranging system. (a) Structural diagram of optical paths in polarization modulation ranging system; (b) retroreflector in global coordinate system

根据角反射器的几何结构可建立入射光矢量  $k_0$  在角反射器坐标系  $X-Y-Z$  的单位向量:

$$k_0 = \begin{pmatrix} -1 + \frac{\sqrt{6}}{2} \tan \alpha + \frac{\sqrt{2}}{2} \tan \gamma \\ -1 - \frac{\sqrt{6}}{2} \tan \alpha + \frac{\sqrt{2}}{2} \tan \gamma \\ -1 - \sqrt{2} \tan \gamma \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3 + 3 \tan^2 \gamma + 3 \tan^2 \alpha}} \quad (3)$$

则入射光的  $S$  分量为

$$S_i = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{6} \cos \gamma - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \gamma \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} \cos \gamma - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \gamma \\ \frac{\sqrt{6}}{3} \cos \gamma - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据反射定律和 Snell 定律,光束的反射琼斯矩阵可表示为

$$T = \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中,  $r_p$  和  $r_s$  分别为  $P$  和  $S$  分量的反射率,  $r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} =$

$\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$ ,  $r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$ ,  $n_1$  和  $n_2$  分别为入射介质和反射介质的折射率,  $\theta_i$  和  $\theta_t$  分别为入射角和折射角。Snell 定律定义的  $P$  矢量和  $S$  矢

量方向会随入射面和反射面变化,因此,需要利用旋转矩阵  $R_q$  将基矢量  $S$  旋转到所定义的方向:

$$R_q = \begin{pmatrix} \cos \beta_q & \sin \beta_q \\ -\sin \beta_q & \cos \beta_q \end{pmatrix},$$

$$\beta_q = \left( \frac{S_{q-1} \times S_q}{|S_{q-1} \times S_q|} \cdot k_q \right) \arccos(S_{q-1} \cdot S_q), \quad (6)$$

式中,  $R_q$  ( $q=1, 2, 3$ ) 表示每次反射前的矩阵旋转,  $\beta$  为旋转角,  $S_0$  为初始入射光的  $S$  分量。三次连续反射的琼斯矩阵为  $\prod_{q=1}^3 (T_q \cdot R_q)$ ,  $q=1, 2, 3$ 。所述偏振态位于右手坐标系中,为直接比较反射偏振光对入射偏振光的变化量,利用旋转矩阵  $R$  剔除坐标转换引入的附加相位延迟,并通过旋转矩阵  $R_1$  将矩阵变换到全局坐标系中,以得到全局坐标下的角反射器琼斯矩阵:

$$J = R_4 \cdot R \cdot \prod_{q=1}^3 (T_q \cdot R_q), R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$\beta_4 = \left( \frac{S_3 \times S_0}{|S_3 \times S_0|} \cdot k_0 \right) \cos^{-1}(S_3 \cdot S_0). \quad (7)$$

在偏振调制测距系统中,光束需均匀照射在角反射器的三个面上,以确保光束原路返回,此时光路中共存在 6 种反射路径。因此,需要分别计算 6 种反射路径下的偏振传递参数。

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 BK7 角反射器对调制偏振光的偏振响应

设大气折射率为 1.00,分别计算 BK7 角反射器 ( $n=1.51, \lambda=632.8 \text{ nm}$ ) 在不同反射路径下的

偏振传递参数,获得如图 3 所示的时域和频域响应曲线。图 3(a1)~图 3(a6)为反射光时域响应,由图可见,6 种反射路径对入射调制偏振光的响应差别很大。其中,图(a1)、(a2)和图(a5)、(a6)中振幅比在调制周期内变化显著,图(a5)、(a6)中偏振主轴在前 1/2 周期内偏转较快,图(a1)、(a2)中偏振主轴在后 1/2 周期内偏转较快。图(a3)、(a4)中

的反射光时域响应最接近入射光,表明图(a3)、(a4)的反射路径对入射光的偏振影响最小,这和 Zhu 等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。尽管 6 种路径反射光的 CAR 曲线在复平面投影都呈现覆盖 4 个象限的正圆形,即反射光相位差仍在  $0\sim 2\pi$  内调制,但在复轴和实轴的曲线投影不再是正余弦曲线,表明相位差为非线性调制。

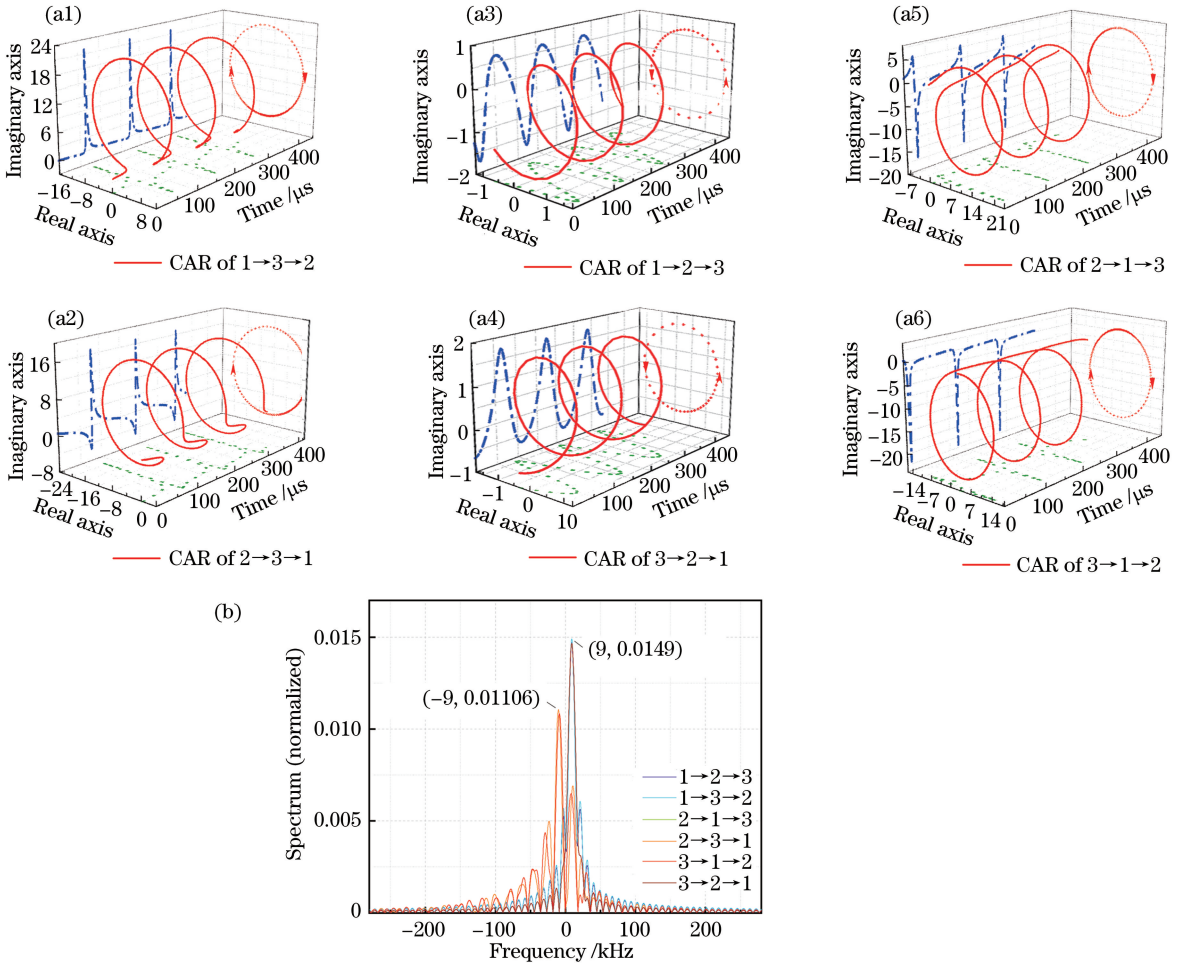


图 3 BK7 角反射器对调制偏振光的响应。(a1)~(a6)时域响应;(b)频域响应

Fig. 3 Response of BK7 solid retroreflector to polarization-modulated light.

(a1)-(a6) Time domain response; (b) frequency domain response

图 3(b)为反射光归一化振幅比后的频率响应曲线图。反射路径分别为 1→2→3, 3→2→1, 1→3→2 时,反射光和入射光谱峰位置一致,但反射路径为 3→2→1, 2→1→3, 3→1→2 时,反射光的调制频率出现了负频率成分和高次谐波分量,表示反射信号的角频率旋向相反且产生高频调制。

### 3.2 金属膜层角反射器对调制偏振光的偏振响应

由于制备工艺简单,金属膜被广泛使用。常用金属膜层有金(Au)、银(Ag)、铝(Al)等材料,在 632.8 nm 波段下,三种材料均具有较小的折射率和

较大的消光系数,因而反射特性相近。选取 Au 膜层( $n_{Au}=0.47+6.02i, \lambda=632.8 \text{ nm}$ <sup>[20]</sup>)对角反射器反射偏振光的时域和频域响应进行分析,结果如图 4 所示。图 4(a1)~图 4(a6)中不同反射路径间的反射光 CAR 曲线形状和旋向一致,表明在时域上反射偏振光的偏振特性受金属折射率影响较小且几乎不受反射路径的影响。CAR 曲线在复平面和实平面的投影为正交的正余弦曲线,表明反射光为近似线性调制。图 4(b)中频谱响应的谱峰位置和入射光谱峰重叠,且无高次谐波成分,可见,Au 膜层角反

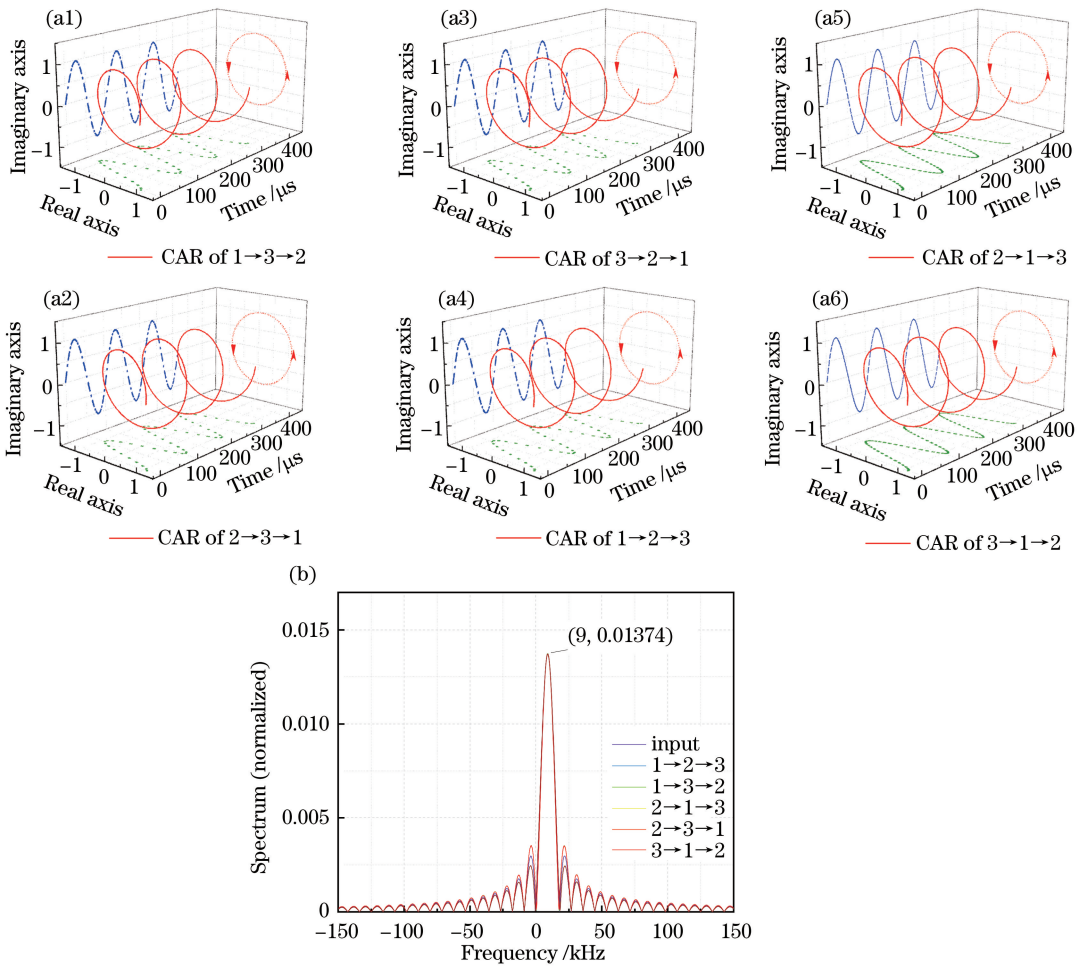


图 4 Au 膜层角反射器对调制偏振光的响应。(a1)~(a6)时域响应;(b)频域响应

Fig. 4 Response of Au film hollow retroreflector to polarization-modulated light.

(a1)-(a6) Time domain response; (b) frequency domain response

射器对调制偏振光的调制频率有较好的保偏效果。

由图 3 和图 4 可知,CAR 信号分析方法可以完整地描述不同角反射器对调制偏振光的时频偏振响应特性。空心金属膜层角反射器对调制偏振光的保偏效果优于实心 BK7 角反射器,因而更适用于偏振调制测距系统。

### 3.3 金属折射率对调制偏振光保偏特性的影响

偏振调制测距方法对测量光路中调制偏振光的

振幅比和相位延迟提出了很高的要求,因此,需要对反射器的膜层进行优化选择。将常用金属折射率 ( $n_{Au}=0.47+6.02i, n_{Ag}=0.2+17.2i, n_{Al}=1.44+3.63i, 632.8 \text{ nm}$ )<sup>[20]</sup> 代入模型计算比较正入射时的反射光振幅比和相位延迟。反射光振幅比的结果如图 5 所示,图 5 中入射光振幅比为 1,但反射光振幅比相对于入射光周期性偏摆,表明反射使调制偏振光的偏振分量发生变化,这种变化在偏振调制测距

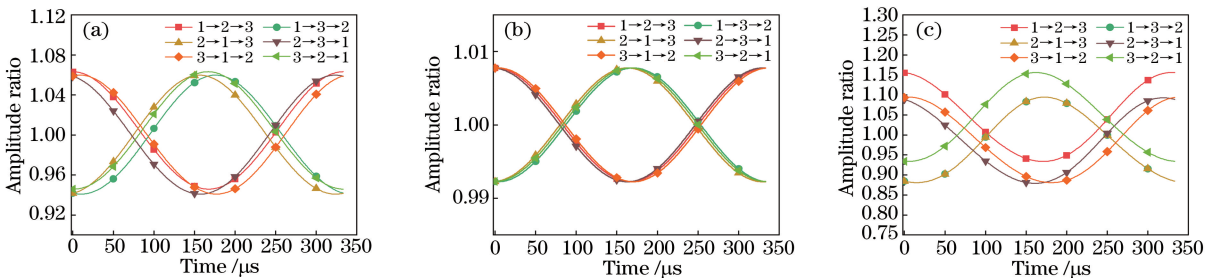


图 5 金属膜层对反射偏振光的振幅比影响。(a) Au;(b) Ag;(c) Al

Fig. 5 Effect of metal film on amplitude ratio of polarization-modulated light. (a) Au; (b) Ag; (c) Al

系统中受到调制晶体作用时会加剧晶体热致双折射导致的附加相位延迟,引起零相差点频率值偏移,最终影响测距精度。Au, Ag 和 Al 三种膜层对反射偏振光的最大振幅比偏移分别为 6.00%, 0.80%, 16.0%, 可见 Ag 膜层对振幅比的影响显著小于 Au 和 Al 膜层。因此,采用 Ag 膜层角反射器更有利于提高偏振调制测距方法的稳定性。在全局坐标系下,入射光为线偏振光时,反射光的振幅比偏移最大。

不同金属膜层对反射调制偏振光相位延迟偏移量的影响如图 6 所示。图中,正入射时,反射光相对

入射光的相位延迟在调制周期内变化, Au, Ag 和 Al 膜层引起的最大相位延迟偏移分别为  $-1.22^\circ$ 、 $0.03^\circ$ 、 $5.74^\circ$ , 此时入射光均为线偏振光; Ag 膜层对反射光相位延迟的影响显著小于其余两种膜层。Au, Al 膜层引起的相位延迟偏移量在某些反射路径下相反,但偏移量绝对值较大。偏振调制测距方法中,反射光的相位延迟影响探测信号的对比度,进而影响测量精度。但探测的偏振干涉光强信号是往返调制偏振光相位延迟的偶函数,为提高探测信号的对比度,相位延迟的绝对值是应考量的因素,因此, Ag 膜层更有利于提高系统测量精度。

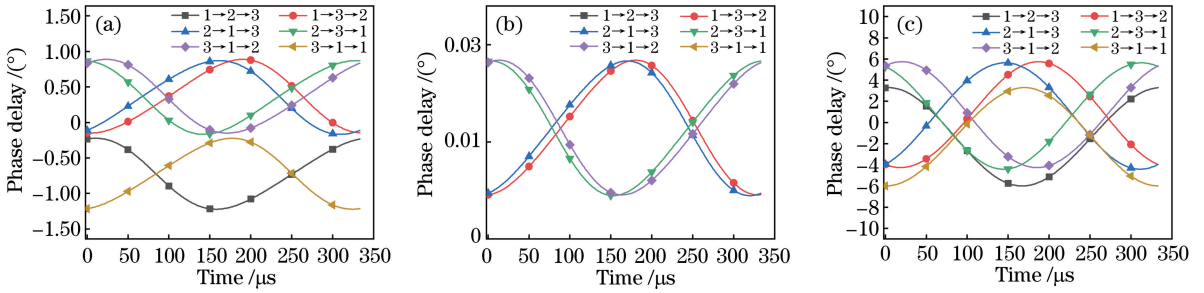


图 6 金属膜层对反射偏振光的相位延迟偏移的影响。(a) Au; (b) Ag; (c) Al

Fig. 6 Effect of metal film of different on phase delay of polarization-modulated light. (a) Au; (b) Ag; (c) Al

由图 5 和图 6 可知, Ag 膜层角反射器对调制偏振光的振幅比和相位延迟偏移影响最小, 选用 Ag 膜层角反射器有利于提高偏振调制测距系统的信号对比度和测量稳定性。

### 3.4 角反射器姿态角对调制偏振光的保偏特性影响

大尺寸测量过程中, 测量光常以任意角度入射角反射器, 入射角是影响反射光调制偏振态的重要因素之一。现有分析多以角反射器的棱边建立坐标系, 具有模型简单的优点。但在偏振调制测距系统中, 往返测量光的调制解调均是在以测量光轴为坐

标轴的系统全局坐标系下进行, 在全局坐标系下分析角反射器的偏振响应有利于实现测量系统的优化。引入角反射器的俯仰角和偏摆角, 利用(3)~(7)式建立 Ag 膜层角反射器不同姿态角下偏振模型, 分别计算俯仰角和偏摆角对幅值比和相位延迟的影响, 计算结果如图 7~10 所示。图 7、8 中横坐标为入射光相位差, 纵坐标为角反射器俯仰角。由图 7 可知, 俯仰角不变时, 反射光振幅比偏移量随入射相位差的变化而变化, 且偏移量在入射线偏振时最大; 俯仰角在  $\pm 10^\circ$  内变化时, 振幅比偏移量小于 1%,

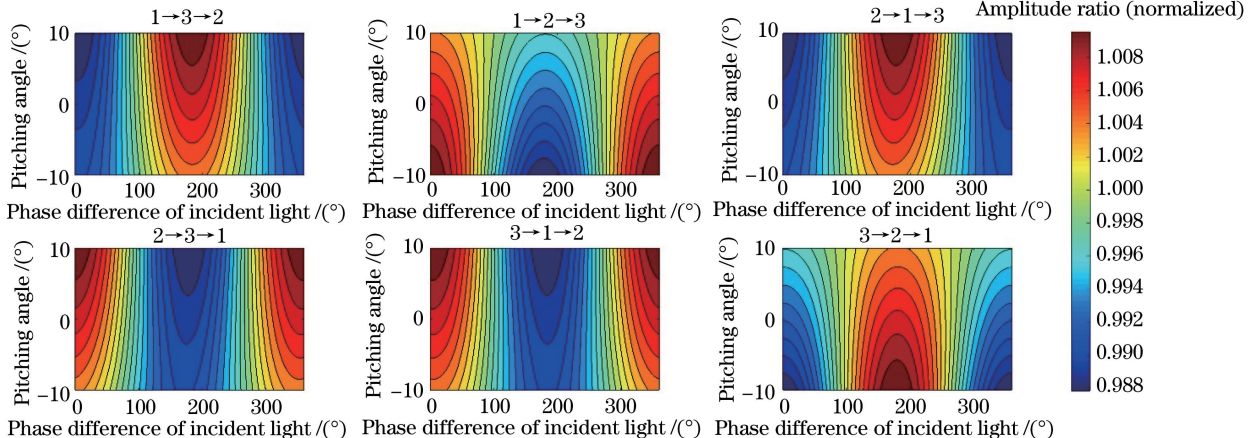


图 7 Ag 角反射器俯仰角对反射偏振光振幅比偏移的影响

Fig. 7 Effect of pitching angle of Ag film retroreflector on amplitude ratio of polarization-modulated light

且不同反射路径振幅比的偏移量相互抵消。可见角反射器俯仰角对振幅比偏移影响较小,且俯仰角对偏移量的影响远小于入射相位差对偏移量的影响。

图 8 表明反射光相位延迟偏移受俯仰角的影响较小,不同反射路径下角反射器的偏移量相近,再次验证金属角反射器的保偏效果较优。

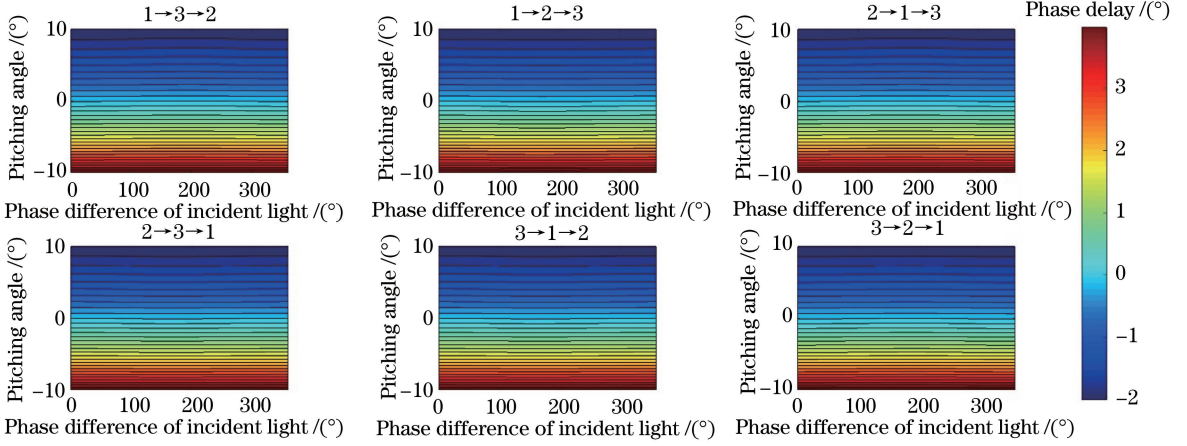


图 8 Ag 膜层角反射器俯仰角对反射偏振光相位延迟偏移的影响

Fig. 8 Effect of pitching angle of Ag film retroreflector on phase delay of polarization-modulated light

角反射器偏摆角变化对反射偏振光的影响如图 9、10 所示,其中横坐标表示偏摆角,纵坐标表示入射调制偏振光的相位差。如图 9 所示,偏摆角不变时,反射光振幅比随入射光相位差周期性变化,偏移量在入射圆偏振时达到最大;偏摆角在  $\pm 10^\circ$  内变化时,振幅比偏移量小于  $\pm 5\%$ ,且偏移量随偏摆角的增大而增大。偏摆角大于  $5^\circ$  时,各反射路径间的

振幅比偏移趋势一致,因而反射路径间偏移量的自抵偿失效。对比图 7 可知,偏摆角对振幅比偏移的影响远大于俯仰角,因而控制角反射器偏摆角小于  $5^\circ$  更有利于提高偏振调制测距系统的稳定性。如图 10 所示,偏摆角固定时,入射光相位差对反射光影响很小,且偏摆角对反射光相位延迟的影响远小于俯仰角的影响。

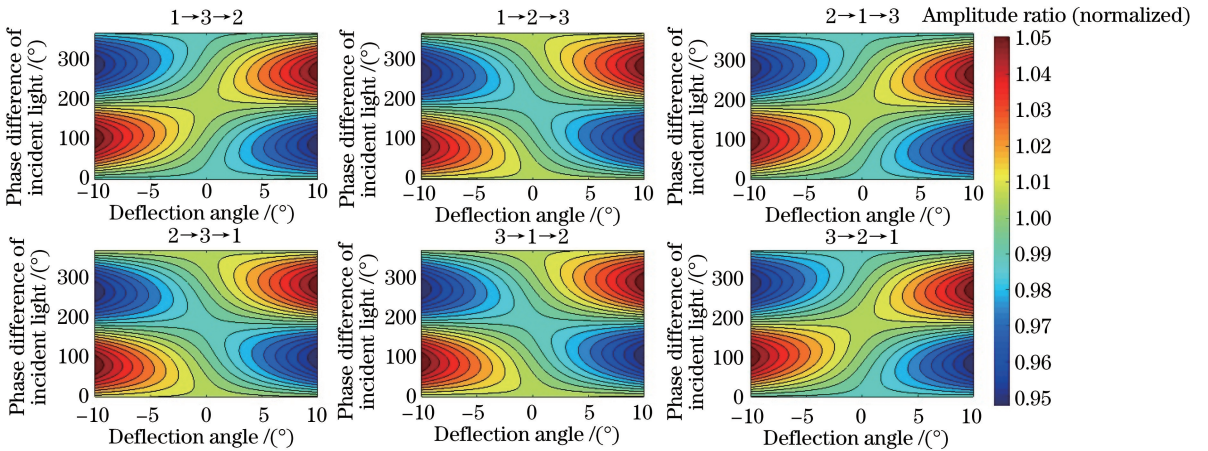


图 9 Ag 膜层角反射器偏摆角对反射偏振光振幅比的影响

Fig. 9 Effect of deflection angle of Ag film retroreflector on amplitude ratio of polarization-modulated light

由图 9 和 10 可知,Ag 膜层角反射器相对测量光轴的姿态角使反射调制光振幅比和相位延迟均有偏移,且各路径对反射光影响相近。其中,俯仰角对反射光相位延迟影响较大,偏摆角对振幅比影响较大。在没有条件进一步优化角反射器膜层的情况下,通过限制角反射器的偏摆角可降低反射偏振主轴的偏转,进而减小晶体温度对测距结果的影响。

## 4 结 论

针对偏振调制测距系统对角反射器的应用需求,提出调制偏振光的复信号描述方法,将调制偏振光表示为连续时间信号,结合偏振传递参数计算反射偏振光的 CAR 数值解,从时域和频域分析了 BK7 角反射器和金属膜层角反射器对调制偏振光

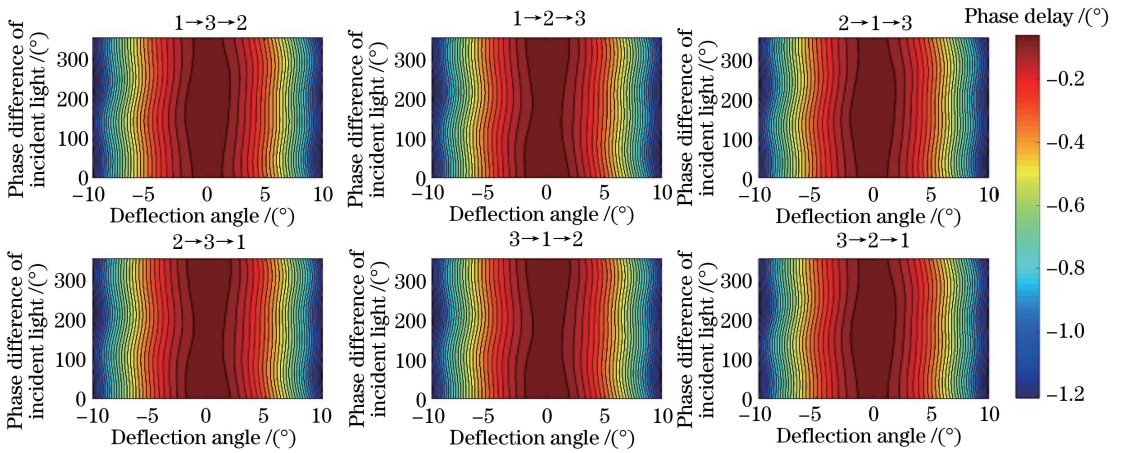


图 10 Ag 膜层角反射器偏摆角对反射偏振光相位延迟的影响

Fig. 10 Effect of deflection angle of Ag film retroreflector on phase delay of polarization-modulated light

的偏振响应特性,证明金属膜层角反射器对调制偏振光的保偏性能优于 BK7 角反射器;三种常用金属膜层(Au,Ag,Al)中,Ag 膜层对调制偏振光的振幅比和相位延迟影响更小,因而更有利于提高偏振调制测距系统的信号对比度和测量稳定性。实际应用时,角反射器相对光轴的俯仰角对反射光相位延迟影响较大,偏摆角对振幅比偏移影响较大,可通过限制角反射器的偏摆角提高偏振调制测距方法的稳定性。

### 参 考 文 献

[1] Bieg B. Polarization properties of a metal corner-cube retroreflector [J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 96/97: 729-732.

[2] Zhang H L. Instantaneous microwave frequency measurement with wide range and high resolution based on dual polarization modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1108004.  
张华林. 双偏振调制大范围高分辨率瞬时微波频率测量[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108004.

[3] Yang P, Ai H. Design of laser communication system with circular polarization modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0916002.  
杨鹏, 艾华. 圆偏振调制激光通信系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0916002.

[4] Currie D G, Dell'Agnello S, Delle Monache G O, *et al.* Next generation lunar laser retroreflector [C] // Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group, October 14-16, 2013, Laurel, Maryland. LPI, 2013, 1748: 7042.

[5] Martini M, Dell'Agnello S, Currie D, *et al.* MoonLIGHT: A USA-Italy lunar laser ranging retroreflector array for the 21st century [J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 276-282.

[6] Consoli F, de Angelis R, Duvillaret L, *et al.* Time-resolved absolute measurements by electro-optic effect of giant electromagnetic pulses due to laser-plasma interaction in nanosecond regime [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 27889.

[7] Xiao Y, Yu J L, Wang J, *et al.* Relationship between modulation frequency and range accuracy in the double polarization modulation range finding system [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 100601.  
肖洋, 于晋龙, 王菊, 等. 二次偏振调制测距系统中调制频率与测距精度的关系 [J]. 物理学报, 2016, 65(10): 100601.

[8] Hei K F, Yu J L, Wang J, *et al.* Variable frequency range finding technology based on double polarization modulation method and system implementation [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 100602.  
黑克非, 于晋龙, 王菊, 等. 基于二次偏振调制的变频测距方法与系统实现 [J]. 物理学报, 2014, 63(10): 100602.

[9] Xie G C, Ye Y D, Li J M, *et al.* Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001.  
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.

[10] Zhang Y Y, Guo Y, Ren Y J, *et al.* Study of drift error and its compensation method in absolute distance measurement by optical frequency scanning interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 193-200.  
张雅雅, 郭寅, 任永杰, 等. 光频扫描干涉绝对测距漂移误差与补偿方法研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 193-200.

[11] Qiu Z S, Yang F, Ye X C, *et al.* Research on laser ranging technology based on pseudo-random code



- phase modulation and coherent detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 052801.
- 邱子胜, 杨馥, 叶星辰, 等. 基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 052801.
- [12] Sabatke D, von Handorf R, Sullivan J. Polarization and fold mirrors in application of the Leica Absolute Distance Meter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7461: 74610N.
- [13] Liu J, Azzam R M A. Polarization properties of corner-cube retroreflectors: theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1553-1559.
- [14] Yun G, Crabtree K, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus I: definition and diattenuation [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2855-2865.
- [15] Yun G, McClain S C, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus II: retardance[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2866-2874.
- [16] Kalibjian R. Polarization preserving corner cubes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 239-246.
- [17] He W J, Fu Y G, Zheng Y, *et al.* Polarization properties of a corner-cube retroreflector with three-dimensional polarization ray-tracing calculus [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4527-4535.
- [18] Azzam R M, Bashara N M. *Ellipsometry and polarized light*[M]. North-Holland: Elsevier Science Publishing, 1987.
- [19] Zhu M H, Li Y, Ellis J D. Polarization model for total internal reflection-based retroreflectors [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 064101.
- [20] Collett E. *Field guide to polarization* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005, FG05.