

快速空间测角系统中偏振像差的分析与研究

李春艳 陆卫国 乔琳

Analysis and research of polarization aberration in rapid space angle measuring system

Li Chun-Yan Lu Wei-Guo Qiao Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 030703 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[共焦腔增强的空气拉曼散射](#)

Confocal-cavity-enhanced Raman scattering of ambient air

物理学报.2017, 66(19): 190703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.190703>

[相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法](#)

The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry

物理学报.2017, 66(7): 070707 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070707>

[光学微操纵过程的轴平面显微成像技术](#)

Observation of particle manipulation with axial plane optical microscopy

物理学报.2017, 66(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.010702>

[同步辐射中双压电片反射镜的研究现状](#)

Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources

物理学报.2016, 65(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010702>

[一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法](#)

A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator in differential absorption lidar

物理学报.2015, 64(2): 020702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020702>

## 快速空间测角系统中偏振像差的分析与研究\*

李春艳<sup>1)†</sup> 陆卫国<sup>2)</sup> 乔琳<sup>1)</sup>

1) (西安邮电大学电子工程学院光电子技术系, 西安 710121)

2) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2017年7月24日收到; 2017年9月28日收到修改稿)

快速空间测角系统需要在一定的平移范围内均能实现测量功能, 这就要求光束在接收单元具有一定的覆盖面积. 受器件尺寸所限, 选择对入射光束进行扩束, 然而非正入射光经过系统会产生偏振态变化, 存在偏振像差, 引起测量误差. 本文通过采用偏振光线追迹的方法, 结合电磁场的边界条件, 对快速空间测角系统中一定方位及入射角范围内的光束通过偏振棱镜后出射光束的偏振态变化与分布进行了理论研究及仿真分析; 并通过搭建实验平台, 利用平移接收单元来模拟不同的入射方位及角度变化. 根据实验值与仿真结果的对比分析, 得出在方位角为 $0^\circ$ 时, 测量误差较小, 在方位角为 $90^\circ$ 时, 测量误差最大, 且随平移距离(即入射角)的增大, 测角误差增大. 验证了偏振像差的存在对系统测角带来的影响及理论分析的正确性, 并提出了改进措施. 所得研究结果对优化系统结构并进一步提高系统性能具有一定的指导意义.

**关键词:** 偏振光, 方位角测量, 偏振像差, Glan-Taylor 棱镜

**PACS:** 07.60.-j, 42.25.Ja, 42.25.Lc, 42.81.Gs

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171702

## 1 引言

基于偏振光和磁光调制的空间角度精密测量及传递技术目前已广泛应用于火箭与导弹发射、航天器对接、玻璃内应力测量等装置, 相比机械和其他几何光学方法, 该方法具有不需要刚性连接、方位传递距离远、测量精度高等特点<sup>[1-4]</sup>. 而这种基于偏振棱镜正交消光原理的方位信息测量方式需要复杂的伺服跟踪系统辅助, 测量时间较长, 降低了系统的可靠性及反应灵敏性<sup>[5-11]</sup>. 为提高系统的测量精度及快速反应能力, 学者们提出了基于Wollaston棱镜偏振分束的快速空间测角方法, 根据两路光强大小直接解算出方位角, 缩短了测量时间, 并通过采用磁光调制技术, 提高测量精度<sup>[12-14]</sup>. 而快速空间测角系统的下端信号接收单元需要在一定的平移范围内实现角度测量, 受偏振

棱镜、磁光玻璃尺寸及系统体积和成本所限, 为实现大范围区域内的测量功能并满足性能要求, 选择对入射至偏振棱镜的光进行扩束, 因此进入起偏器的光束为非垂直入射光. 而所有的光学界面都会使非正入射光波的偏振态发生变化, 存在偏振像差<sup>[15-24]</sup>, 所以快速空间测角系统中非准直光的入射必然会影响到光的偏振态, 从而影响系统的角度传递测量精度. 针对此问题, 本文采用偏振光线追迹的方法, 结合电磁场的边界条件推导了快速空间测角系统中光束通过偏振棱镜后出射光束的偏振态变化及分布, 并运用Matlab软件进行了仿真分析; 最后通过搭建实验平台, 根据平移偏振光接收及处理单元模拟不同的入射方位及角度变化, 获得测量方位值, 并将其与对中状态下所测量的方位值做对比, 得出偏振像差的存在对测角精度的影响, 验证了理论分析的正确性. 研究结果对优化系统结构并进一步提高系统性能具有一定的指导意义.

\* 陕西省自然科学基金(批准号: 2016JQ1026)、陕西省教育厅专项科研计划(批准号: 15JK1659)和国家自然科学基金(批准号: 11604263)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yanerly@163.com

## 2 快速空间测角系统工作原理

快速空间测角系统的工作原理如图 1 所示. 带有扩束镜 BE 的激光光源 L 发出的光束通过透光轴在  $y$  方向的起偏器 P 形成线偏振光, 线偏振光通过光轴与  $y$  方向夹角约为  $45^\circ$  的 Wollaston 棱镜 W 分成两束偏振方向相互垂直的线偏振光, 分别到达光电探测器  $D_e$  和  $D_o$ , 利用后续信号处理电路对光电探测器接收到的信号进行处理, 即可解算出 Wollaston 棱镜光轴偏离  $45^\circ$  角的方位角  $\delta$  [12,14].

$\delta$  是利用获得的两路信号光强实时地解算出来的,

$$S = \frac{I_e - I_o}{I_e + I_o} = \sin(2\delta), \quad (1)$$

式中,  $I_e, I_o$  分别为两出射光束的光强.

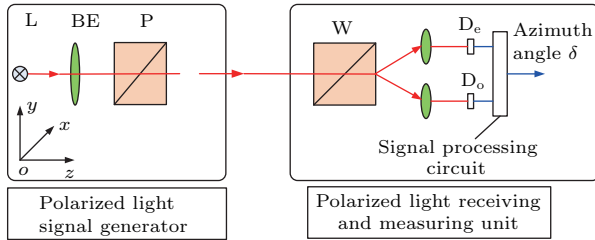


图 1 快速空间测角系统工作原理图

Fig. 1. Working principle of rapid spatial azimuth measurement system.

## 3 偏振像差对系统测角精度的影响分析

快速空间测角系统采用 Glan-Taylor 棱镜作为起偏器, 与 Wollaston 棱镜不同的是, Glan-Taylor 棱镜的两部分晶体光轴相互平行, 且两晶体之间为空气间隙. 从 Glan-Taylor 棱镜出射的为 e 光 (非寻常光), 而 o 光 (寻常光) 在棱镜的斜面全反射, 从棱镜侧面射出. 因此为讨论方便, 忽略 o 光和空气间隙, 研究在一定入射角和方位角范围内, 从 Glan-Taylor 棱镜出射光束的偏振态变化 [25-29].

如图 2 所示, 坐标  $o-xyz$  的原点位于晶体的第一表面的中心,  $xy$  在第一表面内, 且  $y$  轴与光轴平行,  $z$  轴正方向为法线方向. 设入射光在第一表面的入射角为  $\theta$ ,  $\phi$  为入射面与  $y$  轴正向所成的方位角. 设  $i, j, k$  分别代表  $x, y, z$  方向的单位矢量, 由此, 入射光方向矢量可以表示为  $e_o =$

$\sin \phi \sin \theta i + \cos \phi \sin \theta j + \cos \theta k$ , 其中光轴方向为  $e = j$ . 取晶体外的折射率  $n = 1$ , 经过第一表面后, e 光的折射角为  $\theta_{e1}$ , 因此 e 光波的矢量可以表示为  $e_{e1} = \sin \phi \sin \theta_{e1} i + \cos \phi \sin \theta_{e1} j + \cos \theta_{e1} k$ . 其中  $\theta_{e1}$  根据折射定律获得:

$$\sin \theta_{e1} = \sin \theta / n_{e1}, \quad (2)$$

式中 e 光的折射率  $n_{e1} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \alpha + n_e^2 \cos^2 \alpha}}$ ,  $\alpha$  为 e 光波法线与光轴的夹角, 则

$$\cos \alpha = e \cdot e_{e1} = \cos \phi \sin \theta_{e1}. \quad (3)$$

由 (2) 和 (3) 式可得

$$\begin{cases} \theta_{e1} = \arcsin \left( \frac{n_o \sin \theta}{\sqrt{n_o^2 n_e^2 + (n_o^2 - n_e^2) \sin^2 \theta \cos^2 \phi}} \right), \\ n_{e1} = \frac{\sqrt{n_o^2 n_e^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \phi (n_o^2 - n_e^2)}}{n_o}. \end{cases} \quad (4)$$

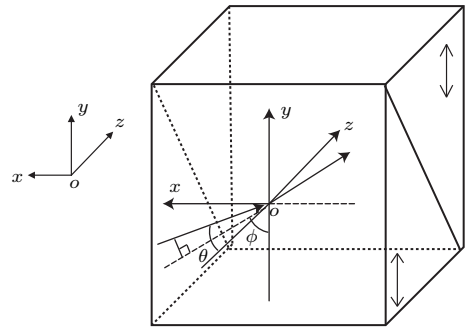


图 2 光线在 Glan-Taylor 棱镜中的传播

Fig. 2. Light propagation in Glan-Taylor prism.

设入射光的磁场强度  $H_1$  的单位矢量为  $h_1$ ,  $h_1$  垂直于 e 光主平面, 则  $h_1 = (e \times e_{e1}) / \sin \alpha$ , 设 e 光线单位矢量为  $k_{1r}$ ,  $k_{1r}$  与光轴的夹角  $\theta_{rp}$  即可表示为  $\tan \theta_{rp} = n_o^2 \tan \alpha / n_e^2$ . 设 e 光波与 e 光线的离散角为  $\psi_1 = \theta_{rp} - \alpha$ , 则 e 光线的折射率为  $n_{1r} = n_{e1} \cos \psi_1$ ,  $h_1$  垂直于入射 e 光的主平面, 有  $h_1 = (e \times k_{1r}) / \sin \theta_{rp}$ , 令  $k_{1r} = ai + bj + ck$ , 结合  $h_1$  及  $k_{1r}$  与光轴的夹角  $\theta_{rp}$ , 可得 e 光线方向的表达式并化为单位矢量为

$$e_1 = \frac{\sin \phi \sin \theta_{e1} \cdot b}{\sqrt{\cos^2 \theta_{e1} + \sin^2 \phi \sin^2 \theta_{e1}}} i - \frac{(\sin \phi \sin \theta_{e1} \cdot a + \cos \theta_{e1} \cdot c)}{\sqrt{\cos^2 \theta_{e1} + \sin^2 \phi \sin^2 \theta_{e1}}} j$$

$$+ \frac{\cos \theta_{e1} b}{\sqrt{\cos^2 \theta_{e1} + \sin^2 \phi \sin^2 \theta_{e1}}} \mathbf{k}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= \sin \phi \sin \theta_{rp} \sin \theta_{e1} / \sin \alpha, \\ c &= \sin \theta_{rp} \cos \theta_{e1} / \sin \alpha, \\ b &= \sqrt{\sin^2 \phi \sin^2 \theta_{e1} \sin^2 \theta_{rp} + \cos^2 \theta_{e1} \sin^2 \theta_{rp}} \\ &\quad \times \frac{\cos \theta_{rp}}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_{rp} \sin \alpha}}. \end{aligned}$$

根据折射定律  $n_{e1} \sin \theta_{e1} = n_o \sin \beta_o = n_t \sin \beta_e = \sin \theta_2$ , 则反射的 o 光与 e 光的方向分别为

$$\begin{cases} \mathbf{k}_o = \sin \phi \sin \beta_o \mathbf{i} + \cos \phi \sin \beta_o \mathbf{j} - \cos \beta_o \mathbf{k}, \\ \mathbf{k}_e = \sin \phi \sin \beta_e \mathbf{i} + \cos \phi \sin \beta_e \mathbf{j} - \cos \beta_e \mathbf{k}, \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} \beta_o &= \arcsin(n_{e1} \sin \theta_{e1} / n_o), \\ \beta_e &= \arcsin(n_{e1} \sin \theta_{e1} / n_t), \\ \theta_2 &= \arcsin(n_{e1} \sin \theta_{e1}), \\ n_t &= \sqrt{n_o^2 n_e^2 - n_{e1}^2 (n_e^2 - n_o^2) \cos^2 \phi \sin^2 \theta_1} / n_o, \\ \cos \alpha_t &= \cos \phi \sin \beta_e. \end{aligned}$$

反射 o 光的电场强度  $\mathbf{E}_o$  的单位矢量为  $\mathbf{e}_o$ , 则  $\mathbf{e}_o$  垂直于 o 光主平面, 为

$$\mathbf{e}_o = \frac{(\mathbf{e} \times \mathbf{k}_o)}{\sin \beta_{op}} = -\frac{\cos \beta_o}{\sin \beta_{op}} \mathbf{i} - \frac{\sin \phi \sin \beta_o}{\sin \beta_{op}} \mathbf{k}. \quad (7)$$

对应磁场强度  $\mathbf{H}_o$  的单位矢量  $\mathbf{h}_o = \mathbf{k}_o \times \mathbf{e}_o$ , 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_o &= -\frac{\sin \phi \cos \phi \sin^2 \beta_o}{\sin \beta_{op}} \mathbf{i} \\ &\quad + \frac{\cos^2 \beta_{op} + \sin^2 \phi \sin^2 \beta_o}{\sin \beta_{op}} \mathbf{j} \\ &\quad + \frac{\cos \phi \cos \beta_o \sin \beta_o}{\sin \beta_{op}} \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (8)$$

设反射 e 光的磁场强度  $\mathbf{H}_e$  的单位矢量为  $\mathbf{h}_e$ , 垂直于 e 光主平面, 得

$$\mathbf{h}_e = \frac{\mathbf{e} \times \mathbf{k}_e}{\sin \beta_{ep}} = -\frac{\cos \beta_e}{\sin \beta_{ep}} \mathbf{i} - \frac{\sin \phi \sin \beta_e}{\sin \beta_{ep}} \mathbf{k}, \quad (9)$$

式中  $\beta_{ep} = \arccos(\cos \phi \sin \beta_e)$  为 e 光波与光轴的夹角, 设反射 e 光线的单位矢量为  $\mathbf{k}_r$ , 由磁场强度

垂直于 e 光主平面, 则  $\mathbf{h}_e = (\mathbf{e} \times \mathbf{k}_r) / \sin \beta_{rp}$ . 设  $\mathbf{k}_r = d\mathbf{i} + e\mathbf{j} + f\mathbf{k}$ , 两端同时右边叉乘  $\mathbf{e}$ , 得

$$\mathbf{k}_r = \frac{\mathbf{k}_e \sin \beta_{rp}}{\sin \beta_{ep}} - \frac{\mathbf{k}_p \sin \psi_2}{\sin \beta_{ep}}, \quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned} \psi_2 &= \beta_{rp} - \beta_{ep}, \\ f &= -\cos \beta_e \sin \beta_{rp} / \sin \beta_{ep}, \\ d &= \sin \phi \sin \beta_e \sin \beta_{rp} / \sin \beta_{ep}, \\ e &= \sqrt{\sin^2 \phi \sin^2 \beta_e \sin^2 \beta_{rp} + \cos^2 \beta_e \sin^2 \beta_{rp}} \\ &\quad \times \frac{\cos \beta_{rp}}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta_{rp} \sin \beta_{ep}}}. \end{aligned}$$

则电场强度单位矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_e &= \mathbf{h}_e \times \mathbf{k}_r \\ &= \frac{\sin \phi \sin \beta_e \cdot e}{\sqrt{\cos^2 \beta_e + \sin^2 \phi \sin^2 \beta_e}} \mathbf{i} \\ &\quad - \frac{(\sin \phi \sin \beta_e \cdot d - \cos \beta_e \cdot f)}{\sqrt{\cos^2 \beta_e + \sin^2 \phi \sin^2 \beta_e}} \mathbf{j} \\ &\quad - \frac{\cos \beta_e \cdot e}{\sqrt{\cos^2 \beta_e + \sin^2 \phi \sin^2 \beta_e}} \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (11)$$

从 Glan-Taylor 棱镜出射的 e 光折射光的波矢方向为

$$\mathbf{k}_2 = \sin \phi \sin \theta_2 \mathbf{i} + \cos \phi \sin \theta_2 \mathbf{j} + \cos \theta_2 \mathbf{k}. \quad (12)$$

假设出射光电场强度  $\mathbf{E}_2$  的单位矢量为  $\mathbf{e}_2 = a_1 \mathbf{i} + a_2 \mathbf{j} + a_3 \mathbf{k}$ , 则出射光的磁场方向:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_2 &= \mathbf{k}_2 \times \mathbf{e}_2 \\ &= (\cos \phi \sin \theta_2 a_3 - \cos \theta_2 a_2) \mathbf{i} \\ &\quad + (\cos \theta_2 a_1 - \sin \phi \sin \theta_2 a_3) \mathbf{j} \\ &\quad + (\sin \phi \sin \theta_2 a_2 - \cos \phi \sin \theta_2 a_1) \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (13)$$

由晶体表面的边界条件  $\mathbf{E}_{1t} + \mathbf{E}_{ot} + \mathbf{E}_{et} = \mathbf{E}_{2t}$ ,  $\mathbf{H}_{1t} + \mathbf{H}_{ot} + \mathbf{H}_{et} = \mathbf{H}_{2t}$ , 将其按  $x, y$  方向可表示为

$$\begin{cases} E_1 e_{1x} + E_o e_{ox} + E_e e_{ex} = E_2 e_{2x}, \\ E_1 e_{1y} + E_o e_{oy} + E_e e_{ey} = E_2 e_{2y}, \\ H_1 h_{1x} + H_o h_{ox} + H_e h_{ex} = H_2 h_{2x}, \\ H_1 h_{1y} + H_o h_{oy} + H_e h_{ey} = H_2 h_{2y}. \end{cases} \quad (14)$$

根据电磁场理论, 对于 o 光,  $H = n \sqrt{\epsilon_o / \mu_o} E$ , 对于 e 光,  $H_e = n_t \cos \psi_2 \sqrt{\epsilon_o / \mu_o} E_e$ , 并根据 (14) 式可得

$$\begin{cases} E_1 a_{11} + E_o a_{12} + E_e a_{13} = E_2 a_1, \\ E_1 a_{21} + E_e a_{23} = E_2 a_2, \\ E_1 a_{31} + E_o a_{32} + E_e a_{33} = E_2 a_{34}, \\ E_o a_{42} = E_2 a_{44}, \end{cases} \quad (15)$$

式中  $a_{11} = e_{1x}$ ,  $a_{12} = e_{ox}$ ,  $a_{13} = e_{ex}$ ,  $a_{14} = a_1$ ,  $a_{21} = e_{1y}$ ,  $a_{22} = e_{oy}$ ,  $a_{23} = e_{ey}$ ,  $a_{24} = a_2$ ,  $a_{31} = n_{e1} \cos \psi_1 h_{1x}$ ,  $a_{32} = n_o h_{ox}$ ,  $a_{33} = n_t \cos \psi_2 h_{ex}$ ,  $a_{34} = h_{2x}$ ,  $a_{41} = n_{e1} \cos \psi_1 h_{1y}$ ,  $a_{42} = n_o h_{oy}$ ,  $a_{43} = n_t \cos \psi_2 h_{ey}$ ,  $a_{44} = h_{2y}$ . 结合 (15) 式解得

$$\begin{cases} a_1 = \frac{x_1 a_3 - x_2 a_2}{x_3}, \\ a_2 = a, \\ a_3 = \frac{(x_2 x_6 - x_5 x_3) a}{x_1 x_6 - x_3 x_4}. \end{cases} \quad (16)$$

(16) 式中,

$$\begin{cases} x_1 = \cos \phi \sin \theta_2 e, \\ x_2 = \cos \theta_2 e - \sin \phi \sin \theta_2 f + g, \\ x_3 = \cos \theta_2 f + h, \\ x_4 = \sin \phi \sin \theta_2 c + \cos \phi \sin \theta_2 a_{21} b, \\ x_5 = a_{11} a - a_{31} b - \cos \theta_2 a_{21}, \\ x_6 = \cos \theta_2 c - a_{21} a, \\ a = a_{33} a_{21} - a_{23} a_{31}, \\ b = a_{13} a_{21} - a_{23} a_{11}, \\ c = \frac{1}{a_{42}} (a_{12} a_{21} a_{33} a_{21} - a_{12} a_{21} a_{23} a_{31} \\ - a_{32} a_{21} a_{13} a_{21} + a_{23} a_{11} a_{32} a_{21}), \\ d = \frac{a_{13} a_{42} a_{21} - a_{23} a_{11} a_{42}}{a_{23} a_{42} a_{21} - a_{23} a_{31} a_{42}}, \\ e = a_{42} a_{21} d, \\ f = a_{32} a_{21} d - a_{12} a_{21}, \\ g = a_{31} a_{42} d - a_{11} a_{42}, \\ h = a_{42} a_{21}, \end{cases} \quad (17)$$

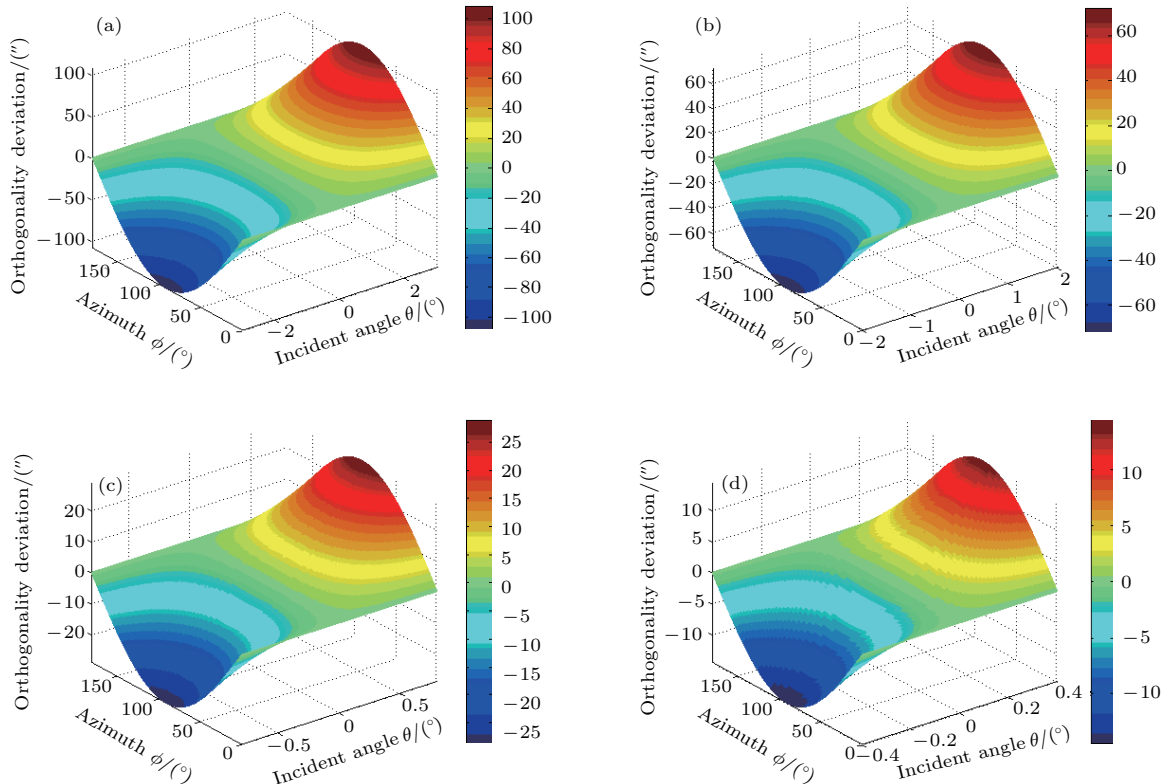


图3 不同入射角  $\theta$  下 Glan-Taylor 棱镜出射光的偏振方向改变量 (a)  $-3^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ ; (b)  $-2^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$ ; (c)  $-0.8^\circ \leq \theta \leq 0.8^\circ$ ; (d)  $-0.4^\circ \leq \theta \leq 0.4^\circ$

Fig. 3. Polarization change of light from the Glan-Taylor prism under different incidence angles: (a)  $-3^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ ; (b)  $-2^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$ ; (c)  $-0.8^\circ \leq \theta \leq 0.8^\circ$ ; (d)  $-0.4^\circ \leq \theta \leq 0.4^\circ$ .

则出射光  $E_2$  在  $xy$  平面的投影向量与光轴的夹角即为偏振方向的改变量  $\Delta$ , 即

$$\Delta = \arccos\left(\frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}\right). \quad (18)$$

取 Glan-Taylor 棱镜的折射率  $n_o = 1.656$ ,  $n_e = 1.485$ , 半视场角  $\leq 3.5^\circ$ , 对不同入射角度下出射光偏振态的改变量进行 Matlab 仿真, 仿真结果如图 3 所示.

图 3 为不同入射角下 Glan-Taylor 棱镜出射光的偏振方向改变量. 由以上仿真结果可以看出, 当方位角  $\phi = 0^\circ$  时, 出射偏振光的偏转方向为零, 当  $\phi = 90^\circ$  时, 出射偏振光的偏转方向最大, 且随入射角的增大, 偏转角度也增大, 当入射角为  $3^\circ$  时, 偏转角度将大于  $100^\circ$ .

### 4 实验与讨论

为验证理论分析的正确性, 通过搭建实验平台, 进行了相关实验. 测量系统工作原理如图 4.

由图 4 可知, 实验装置基于偏振分束的快速空

间角度测量原理并采用磁光调制技术, 实验时为便于虚拟方位信息的引出测量, 在偏振光接收与测量单元增加直角棱镜, 并利用自准直经纬仪间接测量方位角 [30]. 系统中光源至偏振光接收与测量单元的距离约为 1.4 m; 光源经过扩束镜后以发散光的形式进入起偏器, 光束口径为 5 mm, 发散角约为  $6.5^\circ$ , 且起偏器出射光束中心与系统光轴重合; 通过平移接收单元来模拟不同的入射方位及角度变化, 具体为分别在同一方位方向下平移接收单元至东、西、南、北、东南、西南、西北、东北八个方向, 然后分别在八个方向测得方位值  $\delta$ , 每个方向均测量多组数据, 取其平均值与对中情况下 (接收单元通光孔中心与铅垂方向重合) 的方位均值进行比较, 得到偏差值  $\Delta$ ,  $\Delta$  即为不同方位及入射角情况下系统的测量误差. 其中自准直经纬仪通过直角棱镜对接收单元进行监视, 保证接收单元在同一个方位下进行平移. 八个方向的平移量分别为 20, 10 mm, 折算成光源入射至检偏器的入射角分别约为  $0.8^\circ$ ,  $0.4^\circ$ , 具体平移位置如图 4 (b) 所示. 实验测量数据如表 1 所列, 其中每次平移均取三组测量值.

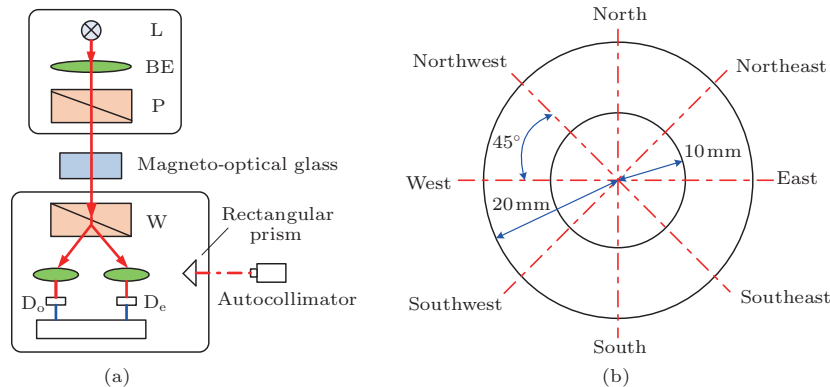


图 4 测量系统工作原理图 (a) 实验装置简图; (b) 偏振光接收与测量单元平移位置示意图

Fig. 4. Working principle diagram of measuring system: (a) Schematic diagram of experimental equipment; (b) translation position of polarized light receiving and measuring unit.

通过表 1 的实验数据可以看出, 在南北方向, 即方位角为  $180^\circ$  ( $0^\circ$ ) 时, 测量偏差值较小, 在东西方向, 即方位角为  $90^\circ$  ( $270^\circ$ ) 时, 测量偏差值最大, 且随平移距离的增大, 测量偏差值也增大. 其他方向的测量偏差值处于南北和东西方向之间, 表 1 的测量结果与图 3 Glan-Taylor 棱镜出射光偏振方向改变量的理论仿真分析结果基本相一致, 验证了理论分析的正确性. 经过以上理论分析与实验数据可知, 出射光偏振方向的改变会对系统测量结果带来

较大误差, 即在一定的出射光范围内, 入射角是影响偏振态变化的主要因素, 也是影响系统测角精度的重要因素.

分析以上结果, 实际值的变化趋势及范围与理论值相比具有一定的偏差, 产生原因可能包括: 1) Glan-Taylor 棱镜的加工误差, 包括两晶体光轴的垂直偏差及光轴与入射端面的角度偏差; 2) 难以保证光源光束中心、起偏器中心与铅垂方向完全重合, 同一直径处的出射角不完全一致; 3) 实验所

采用光源为5 W的半导体耦合激光器,光源本身光束质量及光源噪声等会对实际检测带来一定的影响;4)上述理论分析是针对一定入射角、方位角下单光束的偏振态分布,但实际接收单元有一定的通光孔径,检测到的偏振态是通光孔径范围内偏振态的积分,结果与单光束情况有一定的差别.针对理

论仿真及实验现象,可以采取以下措施对系统进行改进设计:1)光源经扩束后,尽量使光束在起偏器、磁光玻璃通光口径范围内,以减少杂光;2)在满足接收平移范围的情况下,光束尽量以一定的小角度入射至起偏器;3)各个视场角的光束尽量以“均匀”的入射角度入射至起偏器.

表1 偏振光接收与测量单元在不同位置时的测量方位值  
Table 1. The azimuth values of polarized light receiving and measuring unit at different positions.

状态	位置	方位值1	方位值2	方位值3	平均值	$\Delta$
平移 20 mm	对中	270°10'23"	270°10'24"	270°10'24"	270°10'23.7"	
	东	270°10'1"	270°10'0"	270°10'1"	270°10'0.7"	-23"
	南	270°10'21"	270°10'21"	270°10'21"	270°10'21"	-2.7"
	西	270°10'43"	270°10'43"	270°10'44"	270°10'43.3"	19.6"
	北	270°10'25"	270°10'24"	270°10'25"	270°10'24.7"	1"
	东南	270°10'5"	270°10'7"	270°10'6"	270°10'6"	-17.7"
	西南	270°10'39"	270°10'39"	270°10'38"	270°10'38.7"	15"
	西北	270°10'36"	270°10'37"	270°10'37"	270°10'36.7"	13"
平移 10 mm	东北	270°10'11"	270°10'11"	270°10'11"	270°10'11"	-12.7"
	东	270°10'4"	270°10'6"	270°10'5"	270°10'5"	-18.7"
	南	270°10'22"	270°10'23"	270°10'23"	270°10'22.7"	-1"
	西	270°10'39"	270°10'39"	270°10'38"	270°10'38.7"	15"
	北	270°10'24"	270°10'25"	270°10'24"	270°10'24.3"	0.6"
	东南	270°10'12"	270°10'11"	270°10'13"	270°10'12"	-11.7"
	西南	270°10'34"	270°10'34"	270°10'35"	270°10'34.3"	10.6"
	西北	270°10'32"	270°10'32"	270°10'31"	270°10'31.7"	8"
东北	270°10'16"	270°10'16"	270°10'16"	270°10'16"	-7.7"	

## 5 结 论

本文根据实际快速空间测角系统在一定的平移范围内均要求实现测量功能的应用需求,研究了光束以一定入射角及方位角经过Glan-Taylor棱镜后出射光束偏振方向的改变,即偏振像差对系统测量结果产生的影响.通过建立坐标系模型,采用偏振光线追迹的方法,结合电磁场的边界条件对快速空间测角系统中光束通过偏振棱镜后出射光束的偏振态变化及分布进行了理论推导,并运用Matlab软件进行了仿真分析,最后根据在测量系统中平移接收单元来模拟不同的入射方位及角度变化,获得测量值,并根据实验值与仿真结果的对

比分析,得出偏振像差的存在对测角精度的影响,验证了理论分析的正确性.得出在方位角为0°时,测量误差较小,在方位角为90°时,测量误差最大,且随平移距离(即入射角)的增大,测量误差也增大.针对测量与理论仿真结果的不完全一致,分析了实际测量误差产生的原因,提出了改进措施.该研究对优化系统结构并进一步提高系统性能具有一定的指导意义,对快速空间测角装置的实用化应用具有一定的推进作用.

## 参考文献

[1] Dong X N, Gao L M, Shen X J, Chen L Y 2001 *Acta Phot. Sin.* **30** 1389 (in Chinese) [董晓娜, 高立民, 申小军,

- 陈良益 2001 光子学报 **30** 1389]
- [2] Shen X J, Ma C W, Dong X N 2001 *Acta Phot. Sin.* **30** 892 (in Chinese) [申小军, 马彩文, 董晓娜 2001 光子学报 **30** 892]
- [3] Wu Y M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics) (in Chinese) [吴易明 2009 博士学位论文 (西安: 西安光学精密机械研究所)]
- [4] Wu Y M, Gao L M, Chen L Y 2008 *Infrar. Laser Eng.* **37** 525 (in Chinese) [吴易明, 高立民, 陈良益 2008 红外与激光工程 **37** 525]
- [5] Yang Z H, Huang X X, Zhou Z F, Zhang Z L 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1212006 (in Chinese) [杨志勇, 黄先祥, 周召发, 张志利 2012 光学学报 **32** 1212006]
- [6] Yang Z H, Cao W, Wu F C 2015 *Acta Opt. Sin.* **25** s112003 (in Chinese) [杨志勇, 蔡伟, 伍樊成 2015 光学学报 **25** s112003]
- [7] Yang Z Y, Huang X X, Zhou Z F, Zhang Z L 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0112006 (in Chinese) [杨志勇, 黄先祥, 周召发, 张志利 2012 光学学报 **32** 0112006]
- [8] Yang Z Y, Huang X X, Zhou Z F, Zhang Z L 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1012001 (in Chinese) [杨志勇, 黄先祥, 周召发, 张志利 2012 光学学报 **32** 1012001]
- [9] Yang Z Y, Zhou Z F, Zhang Z L 2012 *Opt. Precis. Eng.* **20** 692 (in Chinese) [杨志勇, 周召发, 张志利 2012 光学 **20** 692]
- [10] Shen X, Liang Z C 2014 *Optron. Lasers* **25** 1535 (in Chinese) [沈骁, 梁忠诚 2014 光电子 **25** 1535]
- [11] Yang Z Y, Huang X X, Zhou Z F, Zhang Z L 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 1112008 (in Chinese) [杨志勇, 黄先祥, 周召发, 张志利 2011 光学学报 **31** 1112008]
- [12] Lu W G, Wu Y M, Gao L M, Xiao M S, Wang H X 2013 *Opt. Precis. Eng.* **21** 539 (in Chinese) [陆卫国, 吴易明, 高立民, 肖茂森, 王海霞 2013 光学·精密工程 **21** 539]
- [13] Lu W G, Wu Y M, Gao L M, Li C Y, Xiao M S 2014 *Infrar. Laser Eng.* **43** 2198 (in Chinese) [陆卫国, 吴易明, 高立民, 李春艳, 肖茂森 2014 红外与激光工程 **43** 2198]
- [14] Lu W G 2013 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics) (in Chinese) [陆卫国 2013 博士学位论文 (西安: 西安光学精密机械研究所)]
- [15] Yang Y F, Yan C X, Hu C H, Wu C J 2016 *Acta Phot. Sin.* **36** 1106003 (in Chinese) [杨宇飞, 颜昌翔, 胡春晖, 吴从均 2016 光子学报 **36** 1106003]
- [16] Li Y H, Hao X, Shi Z Y, Shuai S J, Wang L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154214 (in Chinese) [李昉晖, 郝翔, 史召邑, 帅少杰, 王乐 2015 物理学报 **64** 154214]
- [17] Yun G, Crabtree K, Chipman R A 2011 *Opt. Lett.* **36** 4062
- [18] Xu J, Liu F, Liu J T, Wang J Y, Han P L, Zhou Z H, Shao X P 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 134201 (in Chinese) [许洁, 刘飞, 刘杰涛, 王骄阳, 韩平丽, 周淙浩, 邵晓鹏 2016 物理学报 **65** 134201]
- [19] Lam W S T, Chipman R 2015 *Appl. Opt.* **54** 3236
- [20] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 930 (in Chinese) [吴海英, 张淳民, 赵葆常 2009 物理学报 **58** 930]
- [21] Yun G, Crabtree K, Chipman R A 2011 *Appl. Opt.* **50** 2855
- [22] Zhang M R, He Z Q, Wang T, Tian J S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 084202 (in Chinese) [张敏睿, 贺正权, 汪韬, 田进寿 2017 物理学报 **66** 084202]
- [23] Yun G, McClain S C, Chipman R A 2011 *Appl. Opt.* **50** 2866
- [24] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3499 (in Chinese) [吴海英, 张淳民, 赵葆常 2008 物理学报 **57** 3499]
- [25] Shen W M, Jin Y X, Shao Z X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3049 (in Chinese) [沈为民, 金永兴, 邵中兴 2003 物理学报 **52** 3049]
- [26] Zhang C M, Liu N, Wu F Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 949 (in Chinese) [张淳民, 刘宁, 吴福全 2010 物理学报 **59** 949]
- [27] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1642 (in Chinese) [吴海英, 张淳民, 赵葆常, 李英才 2009 物理学报 **58** 1642]
- [28] Liu C, Cen Z F, Li X T, Xu W C, Shang H B, Neng F, Chen L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134201 (in Chinese) [刘超, 岑兆丰, 李晓彤, 许伟才, 尚红波, 能芬, 陈立 2012 物理学报 **61** 134201]
- [29] Mu Y K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3877 (in Chinese) [穆延魁, 张淳民, 赵葆常 2009 物理学报 **58** 3877]
- [30] Xiao M S, Li C Y, Wu Y M, Lu W G, Wang H X 2015 *Infrar. Laser Eng.* **44** 611 (in Chinese) [肖茂森, 李春艳, 吴易明, 陆卫国, 王海霞 2015 红外与激光工程 **44** 611]



# Analysis and research of polarization aberration in rapid space angle measuring system\*

Li Chun-Yan<sup>1)†</sup> Lu Wei-Guo<sup>2)</sup> Qiao Lin<sup>1)</sup>

1) (Department of Optoelectronic Technology, School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

2) (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

( Received 24 July 2017; revised manuscript received 28 September 2017 )

## Abstract

The precise angle measurement and transmission technology have been widely used in the precision measurement, aerospace, military, biomedicine and other devices, which are based on the polarized light and magneto-optical modulation. This method has the characteristics of no rigid connection required, long distance transmission, high precision, etc. However, the azimuth information measurement method needs the assistance of complex servo tracking system according to the orthogonal extinction principle of polarization prism, meanwhile, the measurement time is longer, which reduces reliability and reaction sensitivity of the system. In order to improve the measurement accuracy and fast response capability of the system, a fast space goniometry method is proposed through the Wollaston prism polarizing beam splitter, with which the azimuth is directly calculated according to the two light intensities. The measurement time can be shortened, and the accuracy is improved by the use of magneto-optical modulation technology. The rapid space angle measuring system needs to realize the measurement function in a certain translation range, which requires the beam to have a certain coverage area in the receiving unit. However, the system is limited by size and volume of the device; we can only choose to expand the incident beam. Therefore, when the beam is incident onto the receiving unit, some incident angle and azimuth, that is, non-vertical incidence will be produced. However, the polarization of the non-vertically incident light passing through the system will change and polarization aberration exists, which will lead to measurement error. In this paper, the beam passes through the polarizing prism in a certain range of azimuths and incident angles, and the polarized light tracing method and the boundary condition of the electromagnetic field are used to study and simulate the polarization change and distribution of the outgoing beam. The changes of different incident azimuths and angles can be simulated through the translation of receiving unit, and the azimuths can be measured indirectly by using self-collimation theodolite and right angle prism. By comparing the measured azimuths under the translational and centering conditions, the influence of polarization aberration on the angle measuring system and the correctness of the theoretical analysis are verified. It is concluded that when the azimuth angle is  $0^\circ$ , the measurement error is small; when the azimuth is  $90^\circ$ , the measurement error is largest, meanwhile the measurement error will increase with the translation distance becoming longer (i.e., the incident angle). According to the comparison between the experimental data and the simulation results, the existing problems are pointed out, and the corresponding improvement measures are proposed. The results of this work have some significance in guiding the optimization of the system structure, and the further improvement in the performance of the system.

**Keywords:** polarized light, azimuth measurement, polarization aberration, Glan-Taylor prism

**PACS:** 07.60.-j, 42.25.Ja, 42.25.Lc, 42.81.Gs

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171702

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2016JQ1026), the Special Research Program of Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 15JK1659), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11604263).

† Corresponding author. E-mail: [yanerlcy@163.com](mailto:yanerlcy@163.com)