

文章编号 1004-924X(2018)04-0749-08

快速空间测角系统中偏振棱镜消光比的影响

李春艳^{1*}, 陆卫国², 乔琳¹

- (1. 西安邮电大学 电子工程学院 光电子技术系, 陕西 西安 710121;
2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:为了在一定平移范围内实现快速空间测角系统的测量功能,对一定入射及方位角的光束经过 Glan-Taylor 棱镜后导致的非均匀分布的消光比参数引起的系统测角误差进行了研究。首先,建立系统坐标系模型,采用光线追迹法及偏振光的琼斯矩阵描述方式,对格兰-泰勒棱镜消光比参数引起的测角误差进行了理论推导;接着,结合一定入射及方位角下非均匀分布的消光比参数,运用 Matlab 软件进行了仿真分析。最后,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,得出非均匀分布的消光比对测角精度的影响。结果表明,在一定的出射光范围内,入射角是影响消光比非均匀分布进而影响系统测角精度的主要因素,当方位角为 90° 时,系统测角误差较小;全方位角范围内系统测角误差随入射角的增大而显著增大,由此验证了理论分析的正确性。该研究成果对优化测角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:偏振测量;偏振光;方位角测量;消光比;Glan-Taylor 棱镜

中图分类号:O436.3;TB96 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182604.0749

Influence of polarization prism extinction ratio in rapid space angle measuring system

LI Chun-yan^{1*}, LU Wei-guo², QIAO Lin¹

- (1. Department of Optoelectronic Technology, School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;
 2. Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)
- * Corresponding author, E-mail: yanerlcy@163.com

Abstract: In order to enable a rapid space angle measuring system to realize the required measurement function in a certain translation range, we have investigated the system angle error caused by the non-uniform distribution of the extinction ratio of an incident and azimuth beam after passing through a Glan-Taylor prism. First, the system coordinate model was established. The ray tracing method and Jones matrix description of polarized light were used to deduce the angle error caused by the extinction ratio of the Glan-Taylor prism. Next, considering the nonuniform distribution of the extinction ratio under certain angles of incidence and azimuth, we performed simulations using the MATLAB software. Finally, experimentally obtained values of the translation of the receiving unit were used to sim-

收稿日期:2017-09-14;修订日期:2017-10-09.

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(No. 2016JQ1026);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(No. 15JK1659);国家自然科学基金资助项目(No. 11604263)

ulate the change in different angles of incidence and azimuth. The influence of the extinction ratio on the accuracy of angle measurement was investigated by comparing the experimental and simulation results. Our studies indicated that the angle of incidence is the primary factor affecting the nonuniform distribution of the extinction ratio, and thereby, the accuracy of the system for a certain range of outgoing light. When the azimuth is 90° , the measurement error is small. The measurement error increases with an increase in the angle of incidence for the entire azimuth range. Thus, the validity of the theoretical analysis was verified. Our results will be extremely helpful in optimizing the system structure and improving its performance.

Key words: polarization measurement; polarized light; azimuth measurement; extinction rate; Glan-Taylor prism

1 引言

目前,基于偏振光和磁光调制的空间角度精密测量及传递技术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^[1-4]。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^[5-11]。为提高系统的测量精度及快速反应能力,学者们提出了基于渥拉斯顿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,并采用磁光调制技术来提高测量精度^[12-14]。快速空间测角系统采用具有高激光损伤阈值的格兰-泰勒(Glan-Taylor)棱镜作为起偏器,理想情况下,光束垂直入射至起偏器,出射的偏振光应为完全线偏振光。但实际情况下,受双折射晶体材料均匀性及加工工艺水平的限制,特别是在快速空间角度测量系统中,要求具有一定的作用距离,且要求系统的接收单元在一定的平移范围内均能实现精密测量功能,因此光束呈锥形发散形式入射至起偏器,系统具有一定的入射角及方位角,输出的光并非严格的线偏振光。李春艳等人发现:当光以发散形式入射至起偏器时,在出射光斑面范围内,平移接收单元得到的系统测量结果离散度不同^[15]。并针对此实验现象进行了理论分析,对影响出射光束质量、信号信噪比及测量结果离散度的格兰-泰勒棱镜的消光比特

性进行了仿真验证,验证了消光比会对测量结果产生一定的影响^[15]。

在快速空间测角系统中,格兰-泰勒棱镜依然是核心功能部件,其性能好坏直接决定着系统测量精度的高低。本文采用光线追迹法,根据偏振光的琼斯矩阵描述方式,理论推导了格兰-泰勒棱镜消光比参数对系统测角精度的影响,并根据一定入射及方位角下非均匀分布的消光比参数对系统的测角误差进行了 Matlab 仿真,最后通过搭建实验平台验证了理论分析的正确性。本文的研究成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。

2 快速空间测角系统的工作原理

如图 1 所示,测角系统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。带有扩束镜 BE 的激光光源 L 发出的光束通过透射光矢量(以下称透振方向)在 x 方向的起偏器 P 形成线偏振光,线偏振光经过磁光调制器成为携带调制信息的信号光,然后通过晶体光轴与 x 方向夹

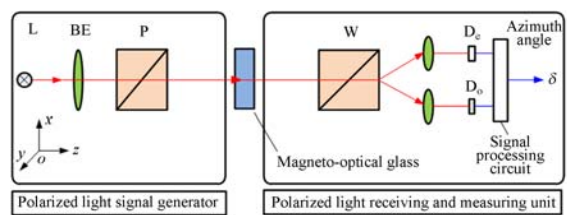


图 1 快速空间测角系统的工作原理图

Fig. 1 Working principle of rapid spatial azimuth measurement system

角约为 $\pm 45^\circ$ 的 Wollaston 棱镜分成两束偏振方向相互垂直的调制信号光,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 棱镜晶体光轴偏离 $\pm 45^\circ$ 角的方位角 δ ^[12,14]。

利用获得的两路信号光强实时解算 δ ,即有:

$$\delta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{I_e - I_o}{I_e + I_o}\right), \quad (1)$$

式中 I_e, I_o 分别为两出射光束的光强。

3 偏振棱镜消光比对系统测角精度的影响分析

消光比是表征偏振棱镜性能的重要参数,是线偏振光通过棱镜的最小和最大能量的比值。棱镜的消光比参量直接影响出射光束质量,若消光比较差,则从棱镜出射的线偏振光的偏振度就会降低,引起不利于信号检测的光强噪音,使系统性能劣化^[16-19]。

快速空间测角系统为传统方位角度测量及传递系统的改进^[12-14],二者均采用格兰-泰勒棱镜作为起偏器,且均要求在较大作用距离处系统的接收单元在一定的平移范围内能够实现精密测量的功能,受器件尺寸所限,选择对入射光束进行扩束,使光束在接收单元具有一定的覆盖面积,因此光束同样是以一定的入射及方位角呈发散形式入射至起偏器。李春艳等人对光以发散形式入射至起偏器时偏振棱镜消光比分布的非均匀性进行了

理论研究及实验验证。

如图 2 所示, T_1, T_2, T_3, T_4 为光经过 Glan-Taylor 棱镜时在每个折射面上的透射率,因此总的透射率可以表示为 $T = T_1 T_2 T_3 T_4$,根据透射比即可计算得出消光比^[15]:

$$\rho = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (2)$$

理论仿真及实验发现,在一定的方位及入射角条件下,Glan-Taylor 棱镜的消光比分布具有一定的非均匀性,入射角较小时,棱镜消光比较小;入射角增大,则消光比变差,且随方位角呈现周期性变化;在光束与棱镜透振方向垂直的方向上,消光比不受入射角的影响,具有最小值。

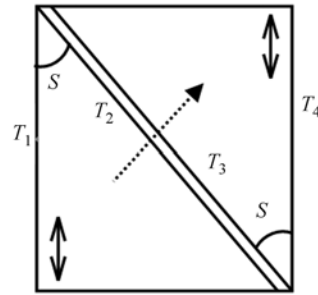


图 2 光在 Glan-Taylor 棱镜各个面的透射率

Fig. 2 Light transmittance on each surface of Glan-Taylor prism

根据消光比非均匀性分布的分析结果,这里考察了在快速空间测角系统中消光比参数对测角精度的影响。实际的线偏振器件,假定其消光比为 $\rho = \epsilon^2$,则起偏器的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_x(\alpha) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & (1 - \epsilon^2) \cos 2\alpha & (1 - \epsilon^2) \sin 2\alpha & 0 \\ (1 - \epsilon^2) \cos 2\alpha & (1 + \epsilon^2) \cos^2 2\alpha + 2\epsilon \sin^2 2\alpha & (1 - \epsilon^2) \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ (1 - \epsilon^2) \sin 2\alpha & (1 - \epsilon^2) \cos 2\alpha \sin 2\alpha & (1 + \epsilon^2) \sin^2 2\alpha + 2\epsilon \cos^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\epsilon \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 α 为起偏器透振方向与 x 轴的夹角。设起偏器的透振方向为 x 轴,则 $\alpha = 0$,起偏器的作用矩阵为:

$$\mathbf{M}_x(0^\circ) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & (1 - \epsilon^2) & 0 & 0 \\ (1 - \epsilon^2) & (1 + \epsilon^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据图 1,在快速空间测角系统中,设入射至

起偏器的光为自然光:

$$\mathbf{S}_i = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T. \quad (5)$$

磁光调制器的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\gamma & \sin 2\gamma & 0 \\ 0 & -\sin 2\gamma & \cos 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 γ 为光矢量的偏振方向经过磁光调制器后的

旋转角度。Wollaston 棱镜可以等效为两个检偏器,则晶体光轴与 x 轴成 θ 角的检偏器的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_w(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

一般情况下为了得到较好的测量灵敏度,使 Wollaston 棱镜两透振方向为 $\theta_o = 45^\circ + \alpha$, $\theta_e = 45^\circ - \alpha$, 则有:

$$\mathbf{S}_e = \mathbf{M}_w(45^\circ - \alpha) \mathbf{M}_c(-\gamma) \mathbf{M}_r(0^\circ) \mathbf{S}_i = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 + (1 - \epsilon^2) \sin(2\alpha + 2\gamma) \\ \sin 2\alpha(1 + \epsilon^2) + \sin^2 2\alpha(1 - \epsilon^2) \cos 2\gamma - (1 - \epsilon^2) \cos 2\alpha \sin 2\alpha \sin 2\gamma \\ \cos 2\alpha + \sin 2\alpha \cos 2\alpha(1 - \epsilon^2) \cos 2\gamma - (1 - \epsilon^2) \cos^2 2\alpha \sin 2\gamma \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{S}_o = \mathbf{M}_w(45^\circ + \alpha) \mathbf{M}_c(\gamma) \mathbf{M}_r(0^\circ) \mathbf{S}_i = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 - (1 - \epsilon^2) \sin(2\alpha + 2\gamma) \\ -\sin 2\alpha(1 + \epsilon^2) + \sin^2 2\alpha(1 - \epsilon^2) \cos 2\gamma - (1 - \epsilon^2) \cos 2\alpha \sin 2\alpha \sin 2\gamma \\ \cos 2\alpha - \sin 2\alpha \cos 2\alpha(1 - \epsilon^2) \cos 2\gamma - (1 - \epsilon^2) \cos^2 2\alpha \sin 2\gamma \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

因为光电探测器接收到的光强是斯托克斯矢量的第一项,即:

$$I_e = 1 + \epsilon^2 + (1 - \epsilon^2) \sin(2\alpha + 2\gamma), \quad (12)$$

$$I_o = 1 + \epsilon^2 - (1 - \epsilon^2) \sin(2\alpha + 2\gamma). \quad (13)$$

当存在消光比参数时,测角误差函数为:

$$\Delta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{I_e - I_o}{I_e + I_o}\right) - \alpha = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{1 - \epsilon^2}{1 + \epsilon^2} \sin 2\alpha\right) - \alpha. \quad (14)$$

根据文献[15],Glan-Taylor 棱镜的消光比受人射角及方位角的影响,入射角增大,消光比变差,方位角为 90° 时,消光比具有最小值。结合公式(14),消光比的存在会引起一定的测角误差,取 Glan-Taylor 棱镜的折射率 $n_o = 1.658$, $n_e = 1.486$,对不同入射角及方位角下造成的非均匀分布的消光比进而引起的测角误差进行 Matlab 仿真,仿真结果如图 3 所示。

根据图 3,扩束后的入射光束以一定的入射及方位角呈发散形式入射至 Glan-Taylor 棱镜时,角度不同会引起消光比的非均匀性分布,进而影响系统的测角误差。分析仿真结果可知,测角

$$\mathbf{M}_w(45^\circ - \alpha) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_w(45^\circ + \alpha) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ -\sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & -\cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & -\sin 2\alpha \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

则两路输出光的斯托克斯矢量分别为:

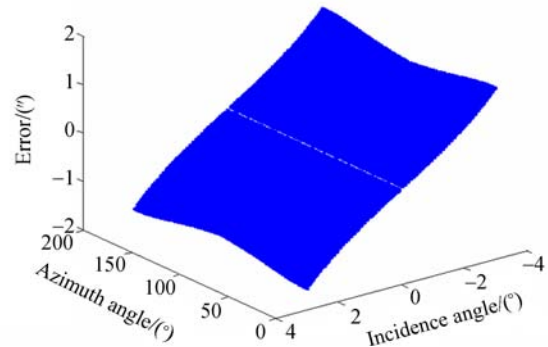
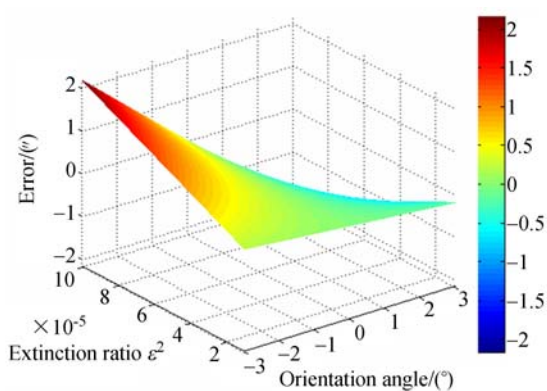


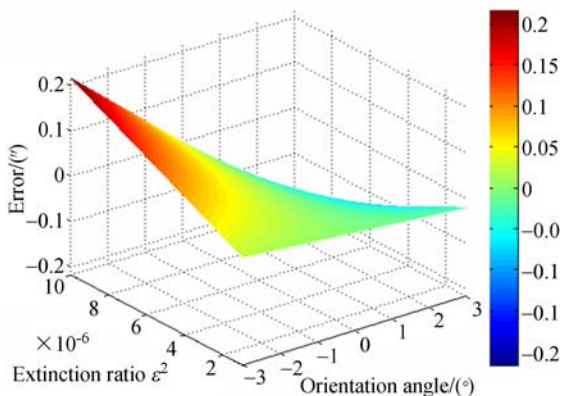
图 3 测角误差随光束入射角及方位角的变化
Fig. 3 Variation of angular error with incident angle and azimuth of beam

误差随方位角的变化不明显,在方位角为 90° 时具有最小值,在整个方位角范围内由方位角引起的测角误差小于 $0.3''$,而测角误差随入射角的增大较明显;在入射角为 3° 时,测角误差约为 $2''$,对比消光比分布的非均匀性可知,测角误差基本与消光比的变化趋势相符合,消光比分布的非均匀性会影响测量结果的离散度。根据以上仿真结果

及公式(14),当消光比 $\epsilon^2 \in (10^{-6}, 10^{-4})$,测角范围为 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 时,误差曲线如图 4 所示。



(a) $\epsilon^2 \in (10^{-5}, 10^{-4})$



(b) $\epsilon^2 \in (10^{-6}, 10^{-5})$

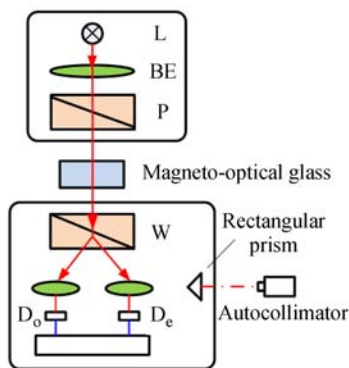
图 4 消光比引起的测角误差

Fig. 4 Angle error caused by extinction ratio

根据图 4 所示的误差曲线可知,在 $\pm 3^\circ$ 的测角范围内,消光比参数 $\epsilon^2 \in (10^{-5}, 10^{-4})$ 时,对测角精度带来的误差约为 $2.1''$ 左右;当消光比参数 $\epsilon^2 \in (10^{-6}, 10^{-5})$ 时,消光比参数对测角精度带来的误差约为 $0.2''$,可忽略不计。因此,起偏器消光比不仅会影响系统的测角精度,还会影响系统测量结果的离散度。在实际选用中,起偏器的消光比参数应优于 10^{-5} 。

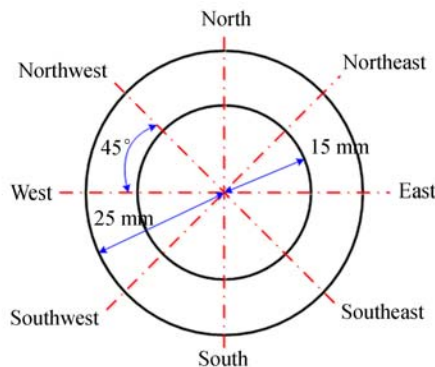
4 实验及讨论

为验证理论分析的正确性,本文搭建了实验平台,并进行了相关实验。测量系统的工作原理如图 5 所示。



(a) 实验装置简图

(a) Schematic diagram of experimental equipment



(b) 偏振光接收与测量单元平移位置示意图

(b) Translation position of polarized light receiving and measuring unit

图 5 快速空间测角系统工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of rapid space angle measuring system

由图 5(a)可知,实验装置基于 Wollaston 棱镜偏振分束的快速空间测角原理,并采用磁光调制技术,实验时在接收单元增加直角棱镜,利用自准直经纬仪间接测量方位角,也可监视接收单元平移时的方位^[20]。系统中光源扩束后距接收单元约 0.8 m;如图 5(b)所示,通过平移接收单元来模拟不同的入射方位及角度变化,分别在各个位置多次测得方位值 α (目标方位值,依顺时针方向转至真北方向),取平均值与对中情况下的方位均值进行比较,得到偏差值 Δ , Δ 即为不同方位及入射角情况下系统的测量误差。各个方向的平移量分别为 25, 15 mm,折算成光源入射至检偏器的入射角分别约为 $1.8^\circ, 1^\circ$ 。实验测量数据如表 1 所示,其中每次平移均取 3 组测量值。

表 1 接收单元在不同位置时的测量方位值

Tab. 1 Measurement orientation angles of receiving unit at different positions

State	Position	Azimuth 1	Azimuth 2	Azimuth 3	Average	$\Delta/(\prime)$
centering	centering	189°35′13″	189°35′13″	189°35′14″	189°35′13.3″	
Translate 25 mm	East	189°35′12″	189°35′11″	189°35′11″	189°35′11.3″	-2
	South	189°35′18″	189°35′19″	189°35′18″	189°35′18.3″	5
	West	189°35′15″	189°35′15″	189°35′15″	189°35′15″	2.7
	North	189°35′8″	189°35′7″	189°35′8″	189°35′7.7″	-5.6
	Southeast	189°35′17″	189°35′18″	189°35′18″	189°35′17.7″	4.4
	Southwest	189°35′17″	189°35′17″	189°35′16″	189°35′16.7″	3.4
	Northwest	189°35′9″	189°35′10″	189°35′9″	189°35′9.7″	-3.6
Translate 15 mm	Northeast	189°35′10″	189°35′10″	189°35′10″	189°35′10″	-3.3
	East	189°35′12″	189°35′12″	189°35′12″	189°35′12″	-1.3
	South	189°35′16″	189°35′16″	189°35′16″	189°35′16″	2.7
	West	189°35′14″	189°35′14″	189°35′13″	189°35′13.7″	0.4
	North	189°35′11″	189°35′11″	189°35′12″	189°35′11.3″	-2
	Southeast	189°35′15″	189°35′15″	189°35′16″	189°35′15.3″	2
	Southwest	189°35′15″	189°35′15″	189°35′14″	189°35′14.7″	1.4
Northwest	189°35′11″	189°35′12″	189°35′12″	189°35′11.7″	-1.6	
Northeast	189°35′11″	189°35′11″	189°35′12″	189°35′11.3″	-2	

根据表 1 的实验数据,在方位角为 $90^\circ(270^\circ)$ 时,即东西方向,测量误差较小;在南北方向,即方位角为 $180^\circ(0^\circ)$ 时,测量误差最大;随平移距离(入射角)的增大,测量误差增大。表 1 的测量结果与理论分析结果基本一致,验证了理论分析的正确性。由以上理论分析与实验数据可知,在一定的出射光范围内,入射角是影响消光比非均匀分布进而影响系统测角精度的主要因素,方位角为 90° 时,系统测角误差较小,并且在整个方位角范围内随入射角的增大较为明显。另外,光源光束中心、起偏器中心与铅垂方向不完全重合、光源噪声以及出射光束偏振态变化等因素都会引起系统测量误差,导致表 1 实际值的变化趋势及范围与理论值相比具有一定的偏差。根据以往大量的系统实验和传统方位角度测量及传递系统的使用经验,在入射角为 $\pm 5^\circ$ 的范围内,沿起偏器光轴方向,系统的离散度一般在 $7''$ 左右;而在与光轴垂直的方向上,系统的离散度较好,一般在 $3''$ 之内。

以我国目前偏振器件的发展状况,高质量的 Glan-Taylor 棱镜的消光比一般均优于 10^{-5} ,可以满足大部分精密测量设备的使用需求。不过,一般厂家所标注的消光比参数是在起偏器主截面上与主截面垂直方向上的光强比值,当垂直光入射至起偏器时,出射面的消光比参数分布均匀,大

小与标称值无差异。但当汇聚或发散光束进入起偏器时,出射光的消光比参数分布是不均匀的,此时若欲得到更高的测角精度和离散度,应选取标称消光比参数更高的偏振棱镜,以满足系统需要。

5 结 论

本文针对快速空间测角系统要在一定的平移范围内实现测量功能的实际应用需求,研究了光束以一定入射角及方位角情况下经过 Glan-Taylor 棱镜后导致的非均匀分布的消光比参数对系统测角精度的影响。通过建立坐标系模型,采用光线追迹法,并根据偏振光的琼斯矩阵描述方式,对快速空间测角系统中 Glan-Taylor 棱镜消光比参数引起的测角误差进行了理论推导;并结合一定入射及方位角下消光比参数分布的非均匀性,运用 Matlab 软件进行了仿真分析,最后通过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,从而获得测量值,并根据实验值与仿真结果的对比分析,得出非均匀分布的消光比对测角精度的影响,验证了理论分析的正确性。实验结果表明,在一定的出射光范围内,入射角是影响消光比非均匀分布进而影响系统测角精度的主要

因素,方位角为 90° 时,系统测角误差较小,并在整个方位角范围内随入射角的增大而显著增大。为了减弱并消除非均匀分布的消光比对系统测角精度的影响,可以改进光源扩束设计,尽量使光束在起偏器、磁光玻璃通光口径范围内,减少杂光;

另外,在满足接收平移范围的情况下,使光束尽量以小角度均匀入射至起偏器。本文的研究对优化空间测角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具有一定的推进作用。

参考文献:

- [1] 董晓娜,高立民,中小军,等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. 光子学报, 2001, 30(11): 1389-1391.
DONG X N, GAO L M, SHEN X J, *et al.*. Passing azimuth vertically with the technic of magneto-optic modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1389-1391. (in Chinese)
- [2] 中小军,马彩文,董晓娜. 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.
SHEN X J, MA C W, DONG X N. A kind of disconnected mechanically azimuth measuring and synchronizing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(7): 892-896. (in Chinese)
- [3] 吴易明. 高精度方位垂直传递技术研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2009.
WU Y M. *Research on High-precision Vertical Transmission Technology*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2009. (in Chinese)
- [4] 吴易明,高立民,陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 525-529.
WU Y M, GAO L M, CHEN L Y. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [5] 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 方波磁光调制测量在无机械连接的设备间方位传递中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212006.
YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. Application of square wave magneto-optic modulation to transmitting the azimuth between equipments without mechanical connection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1212006. (in Chinese)
- [6] 杨志勇,蔡伟,伍樊成. 基于三角波磁光调制的空间方位信息测量系统[J]. 光学学报, 2015, 35(S1): s112003.
YANG ZH Y, CAI W, WU F CH. Azimuth measurement system based on triangle wave magneto-optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(S1): s112003. (in Chinese)
- [7] 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 利用原始光强信号实现空间方位失调角高精度传递新方法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112006.
YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. New high-precision transmission method of spatial azimuth with original light intensity signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112006. (in Chinese)
- [8] 杨志勇,周召发,黄先祥,等. 基于正弦波磁光调制的方位失调角精确测量方法[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1012001.
YANG ZH Y, ZHOU ZH F, HUANG X X, *et al.*. An accurate method of measuring azimuth based on sine wave magneto-optic modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1012001. (in Chinese)
- [9] 杨志勇,周召发,张志利. 基于正弦波磁光调制的空间方位失调角传递技术的改进[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 692-698.
YANG ZH Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L. Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 692-698. (in Chinese)
- [10] 杨志勇,蔡伟,周召发,等. 一种基于正交线偏振光的高精度方位测量方法[J]. 光电子·激光, 2017, 28(1): 65-72.
YANG ZH Y, CAI W, ZHOU ZH F, *et al.*. An accurate azimuth measurement method based on orthogonal linearly polarized light[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2017, 28(1): 65-72. (in Chinese)
- [11] 杨志勇,周召发,张志利. 贝赛尔函数展开对空间方位失调角测量误差的影响[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 461-465.

- YANG ZH Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L. Influence of Bessel functions expansions on spatial azimuth measurement error[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 461-465. (in Chinese)
- [12] 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.
- LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 539-545. (in Chinese)
- [13] 陆卫国, 吴易明, 高立民, 等. 方波调制消除 Wollaston 棱镜非线性系数对空间测角的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2198-2203.
- LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Square wave modulation to eliminate the influence of Wollaston prism nonlinear coefficients on spatial angle measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2198-2203. (in Chinese)
- [14] 陆卫国. 快速方位垂直传递技术研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2013.
- LU W G. *Research on Fast Orientation Vertical Transmission Technology*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2013. (in Chinese)
- [15] 李春艳, 吴易明, 高立民, 等. 格兰-泰勒棱镜消光比分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 173-177.
- LI CH Y, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Analysis of extinction ratio of a Glan-Taylor prism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 173-177. (in Chinese)
- [16] 郝冲, 吴易明, 陆卫国, 等. 偏振棱镜消光比参量精密测量方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(12): 1223001.
- HAO CH, WU Y M, LU W G, *et al.*. The research on measuring the extinction ratio of polarizing prism accurately[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12): 1223001. (in Chinese)
- [17] 李春艳, 吴易明, 高立民, 等. 采用双调制方式测量消光比参数[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 582-587.
- LI CH Y, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Measurement of extinction ratio by dual modulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 22(3): 582-587. (in Chinese)
- [18] 程冠晓, 李国华. 宽光谱消光比智能化测试系统的实验研究[J]. *曲阜师范大学学报*, 2005, 31(4): 61-64.
- CHENG G X, LI G H. Study of an automatic measurement system for extinction ratio in visible spectrum[J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2005, 31(4): 61-64. (in Chinese)
- [19] 刘贵勤, 李国华. 消光比自动测试系统的系统误差分析[J]. *曲阜师范大学学报*, 2004, 30(4): 61-64.
- LIU G Q, LI G H. The analysis of the system error in the automatics extinction light ratio measure system[J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2004, 30(4): 61-64. (in Chinese)
- [20] 肖茂森, 李春艳, 吴易明, 等. 利用新型偏振器件实现方位角测量[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 611-615.
- XIAO M S, LI CH Y, WU Y M, *et al.*. Measurement of azimuth by using new polarizer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 611-615. (in Chinese)

作者简介:



李春艳(1987—),女,河南商丘人,博士,讲师,2009年于西北工业大学获得学士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事偏振光信息处理及应用方面的研究。E-mail: yanerlcy@163.com



陆卫国(1984—),男,广西来宾人,博士,副研究员,2008年于西安邮电大学获得学士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事精密光学仪器、偏振光信息处理及应用、光学角度测量等领域的研究。E-mail: boy_lu@126.com