

# 偏振正交误差对偏振光导航定位系统测量精度的影响

黄旭锋<sup>1,2</sup> 步扬<sup>1</sup> 王向朝<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 偏振正交误差是影响四通道时分复用大气偏振检测系统精度的主要因素。通过建立检偏器阵列偏振正交误差对偏振光导航系统定位精度的影响模型, 分析了该误差对大气偏振测量精度与导航定位精度的影响, 并进行了实验验证。理论与实验结果表明, 降低检偏器阵列偏振正交误差, 可以显著提高系统大气偏振测量精度与导航定位精度。当检偏器阵列偏振正交误差无法消除时, 调整定位初始角可以明显提高系统测量精度与导航定位精度。

**关键词** 测量; 导航; 偏振导航; 误差; 检偏器

中图分类号 V241.62<sup>+</sup>1; O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0108002

## Effect of Polarization Analyzers Perpendicular Error on Measurement Accuracy of Polarization Position System

Huang Xufeng<sup>1,2</sup> Bu Yang<sup>1</sup> Wang Xiangzhao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Pattern measurement accuracy is mainly depended on polarization analyzers array perpendicular error. Based on a developed four-channel time division multiplexing skylight polarization measuring system, a polarization perpendicular error model is proposed. Effects of error on the measurement accuracy are analyzed theoretically and investigated experimentally. The results show that when the polarization perpendicular error is reduced, the measurement accuracy of skylight polarization patterns and system positioning accuracy are improved greatly. When the error exists and cannot be eliminated, the adjustment of initial angles of polarization analyzers can improve dramatically the measurement accuracy of the system.

**Key words** measurement; navigation; polarization navigation; error; polarization analyzers

**OCIS codes** 010.1310; 230.0230; 290.5855

## 1 引言

偏振光导航定位技术通过检测与分析大气偏振图景信息, 获得太阳、月亮等天体准确位置, 从而实现系统载体的导航与定位。该技术具有抗干扰能力强、性能可靠、适用范围广和定位误差不随时间累计等特点, 是一种具有重要应用潜力的导航定位技术<sup>[1,2]</sup>。

大气偏振检测技术是该导航定位技术的核心, 偏

振检测精度直接决定了系统导航定位精度。现有大气偏振检测主要通过采用多通道检偏器阵列探测技术实现<sup>[1,3~7]</sup>, 其测量误差主要来源于多通道信号增益差异与检偏器阵列偏振正交误差。瑞士苏黎世大学研究小组采用了基于 6 个独立探测通道的检测系统对大气偏振图景进行检测<sup>[1]</sup>。该系统探测通道多, 独立通道之间的信号增益差异大; 通道需要旋转以寻找极值点, 这又大大增加了检偏器阵列的正交误差。

收稿日期: 2010-04-09; 收到修改稿日期: 2010-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)、上海市启明星项目(08QB14005)和上海市科委国际合作研究项目(08520704200)资助课题。

作者简介: 黄旭锋(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事大气偏振检测技术方面的研究。E-mail: hxf1979@gmail.com

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术等方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

该系统结构复杂,测量速度慢,测量精度低<sup>[1,7]</sup>。为提高测量精度,作者所在课题组提出了基于四通道时分复用技术的大气偏振检测技术<sup>[8]</sup>。该技术采用4个检测通道测量大气偏振图景,采用时分复用技术实现大气偏振信号检测,有效减少了多通道信号增益差异与大气光强变化对不同通道信号的影响<sup>[9]</sup>,明显降低了通道增益误差,提高了大气偏振检测精度。检偏器阵列偏振正交误差成为影响该系统测量精度的主要因素。本文建立了检偏器阵列偏振正交误差模型,分析了该误差对系统大气偏振测量精度与导航定位精度的影响,并进行了实验验证。

## 2 检偏器阵列偏振正交误差模型

基于4通道时分复用技术的大气偏振检测系统如图1所示。该系统采用两组检偏单元4个检测通道(S1与S2,S3与S4)。每个通道探测器接收到的光强为<sup>[1]</sup>

$$S_n = KI[1 + d\cos(2\phi_n - 2\phi_{\max})], \quad (1)$$

式中  $I = I_{\max} + I_{\min}$ ,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为光强的最大和最小值;  $d$  为偏振度;  $\phi$  为待测量偏振方向与系统偏振标定方向之间的夹角,  $\phi_{\max}$  是光强为  $I_{\max}$  时的  $\phi$  值;  $K$  为比例常数,  $n$  为探测通道号。

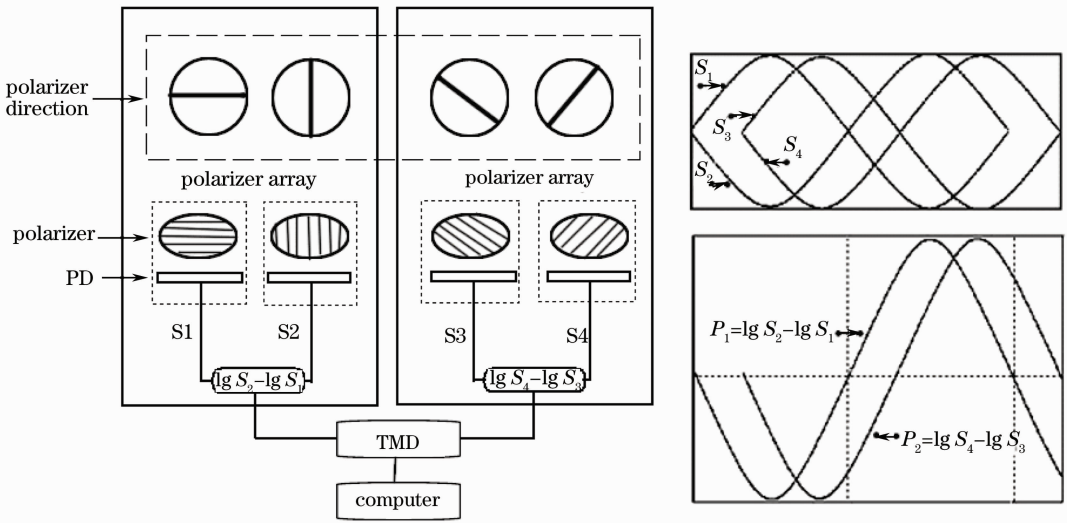


图1 大气偏振图景检测系统原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of a polarization pattern measurement system

设定第一组单元 S1 通道检偏方向为系统偏振标定方向,第二组检偏单元主检偏方向 S3 与 S1 方向成  $45^\circ$ 。S2, S4 方向分别与 S1, S3 方向成  $90^\circ$ , 两组检偏单元的输出信号分别为

$$\begin{cases} P_1 = \lg \left[ \frac{1 - d\cos(2\phi)}{1 + d\cos(2\phi)} \right] \\ P_2 = \lg \left[ \frac{1 - d\sin(2\phi)}{1 + d\sin(2\phi)} \right] \end{cases}, \quad (2)$$

由(2)式可得

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{(1 + 10^{P_1})(1 - 10^{P_2})}{(1 - 10^{P_1})(1 + 10^{P_2})} \right], \quad (3)$$

根据(3)式,  $\phi$  值测量精度取决于两组检偏单元输出信号  $P_1$  与  $P_2$  值的测量精度。  $P_1$  与  $P_2$  测量精度主要取决于 S1~S4 通道探测器的电路增益与偏振正交误差。由于采用了可变增益单元时分复用技术,系统通道增益差异误差得到明显抑制<sup>[8]</sup>, 检偏器阵列偏振正交误差成为影响  $\phi$  值测量精度的主要因素,如图2所示。图中实线为理论偏振方向,虚线为

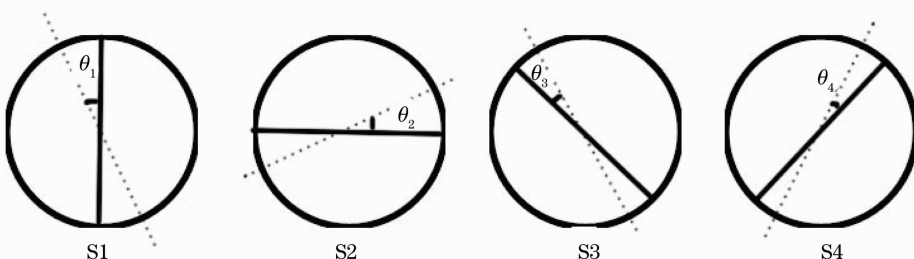


图2 检偏器阵列偏振方向正交误差模型

Fig. 2 Directional image of the polarization analyzers

实际偏振方向。

图 2 中,4 个通道 S1,S2,S3 与 S4 的初始偏振角偏差分别为  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  与  $\theta_4$ ,检偏器阵列偏振正交误差为

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_2 \\ \Delta\theta_2 = \theta_3 - \theta_4 \end{cases} \quad (4)$$

在检偏器阵列中通过信号对称处理,使检偏器 S1 与 S3 检偏器的正交误差满足

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 = \Delta\theta_2, \quad (5)$$

可以得到偏振正交误差所导致的待测定位角  $\phi$  的测量误差为<sup>[10,11]</sup>

$$\Delta\phi = \frac{\partial\phi}{\partial P_1}\Delta P_1 + \frac{\partial\phi}{\partial P_2}\Delta P_2, \quad (6)$$

式中检偏器阵列偏振正交误差所导致的通道信号输出差为

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \lg\left[\frac{1-d\cos(2\varphi)}{1+d\cos(2\varphi)}\right] - \lg\left\{\frac{1-d\cos[2(\varphi-\Delta\theta)]}{1+d\cos[2(\varphi-\Delta\theta)]}\right\} \\ \Delta P_2 = \lg\left[\frac{1-d\sin(2\varphi)}{1+d\sin(2\varphi)}\right] - \lg\left\{\frac{1-d\sin[2(\varphi-\Delta\theta)]}{1+d\sin[2(\varphi-\Delta\theta)]}\right\} \end{cases}, \quad (7)$$

(7)式中  $\varphi$  为定位初始角,对信号的偏导项为

$$\begin{cases} \frac{\partial\phi}{\partial P_1} = \frac{1}{2}d\left(\frac{1-10^{P_2}}{1+10^{P_2}}\right)\frac{10^{P_1}}{(1+10^{P_1})^2} \frac{(10^{P_1}-10^{P_2})}{1+\left[\frac{(1+10^{P_1})(1-10^{P_2})}{(1-10^{P_1})(1+10^{P_2})}\right]^2} \\ \frac{\partial\phi}{\partial P_2} = -\frac{1}{2}d\left(\frac{1-10^{P_1}}{1+10^{P_1}}\right)\frac{10^{P_2}}{(1-10^{P_2})^2} \frac{(10^{P_2}+10^{P_1})}{1+\left[\frac{(1+10^{P_1})(1-10^{P_2})}{(1-10^{P_1})(1+10^{P_2})}\right]^2} \\ P_1 = \lg\left[\frac{1-d\cos(2\varphi)}{1+d\cos(2\varphi)}\right] \\ P_2 = \lg\left[\frac{1-d\sin(2\varphi)}{1+d\sin(2\varphi)}\right] \end{cases} \quad (8)$$

由(6)~(8)式即可得到系统定位角测量误差  $\Delta\phi$  与检偏器阵列正交误差  $\Delta\theta$ ,定位初始角  $\varphi$  关系模型。根据该模型可分析偏振正交误差对系统定位角测量精度的影响。

### 3 分析与讨论

图 3 给出了当偏振度  $d$  分别为 0.1,0.3,0.5 和 0.7 时,定位角误差  $\Delta\phi$  与正交误差  $\Delta\theta$  之间的关系。由图 3 可知,对于不同的偏振度(对应不同的天气情况),检偏器阵列正交误差  $\Delta\theta$  的增加都会导致系统定位角测量误差  $\Delta\phi$  的单调增加。当  $d=0.3, \varphi=1.21, \Delta\theta$  从 0 增加到  $\pi/4$  时,定位角误差  $\Delta\phi$  从 0 增加到 0.31。当  $d=0.7, \varphi=1.22, \Delta\theta$  从 0 增加到  $\pi/4$  时,定位角误差  $\Delta\phi$  从 0 增加到 0.42。初始角  $\varphi$  的数值变化不影响该测量误差的变化趋势,只影响测量误差的增加幅度。当  $d=0.3, \varphi=1.21, \Delta\theta=\pi/4$  时,定位角误差  $\Delta\phi$  极大值为 0.31。当  $\varphi=1.22$  时,对于同一  $\Delta\theta$  值,定位角误差  $\Delta\phi$  极大值增加到 0.42。其增加幅度发生了变化。这种增加幅度与偏

振度参数(对应不同天气情况)也相关。当偏振度  $d$  较小时,定位角误差  $\Delta\phi$  变化较平缓,受初始角  $\varphi$  的影响较小,如图 3(a)所示,当偏振度  $d$  增大时,定位角误差  $\Delta\phi$  变化幅度大,其更容易受到初始角  $\varphi$  的影响,如图 3(d)所示。

当系统安装调试完成后,其偏振正交误差  $\Delta\theta$  已经基本确定,并且无法消除。图 4 给出了当正交误差  $\Delta\theta$  为 0.01 时,不同偏振度条件(不同天气情况)下初始角  $\varphi$  与定位角误差  $\Delta\phi$  之间的关系。当偏振度为 0.1 时,初始角  $\varphi$  为 0.9648,定位角误差达到最小值,仅为 0.0049。当偏振度为 0.3 时,初始角  $\varphi$  为 0.9649,定位角误差最小,为 0.0047。当偏振度为 0.5 时,初始角  $\varphi$  为 0.9654,定位角误差达到最小值,为 0.0045。当偏振度  $d$  较小时,定位初始角  $\varphi$  对定位角测量误差影响较小。当偏振度  $d$  增大时,定位角测量误差  $\Delta\phi$  受初始角  $\varphi$  的影响逐步增大。因此,当检偏器阵列偏振正交误差  $\Delta\theta$  一定时,通过调整初始角  $\varphi$ ,可以减少系统测量误差。

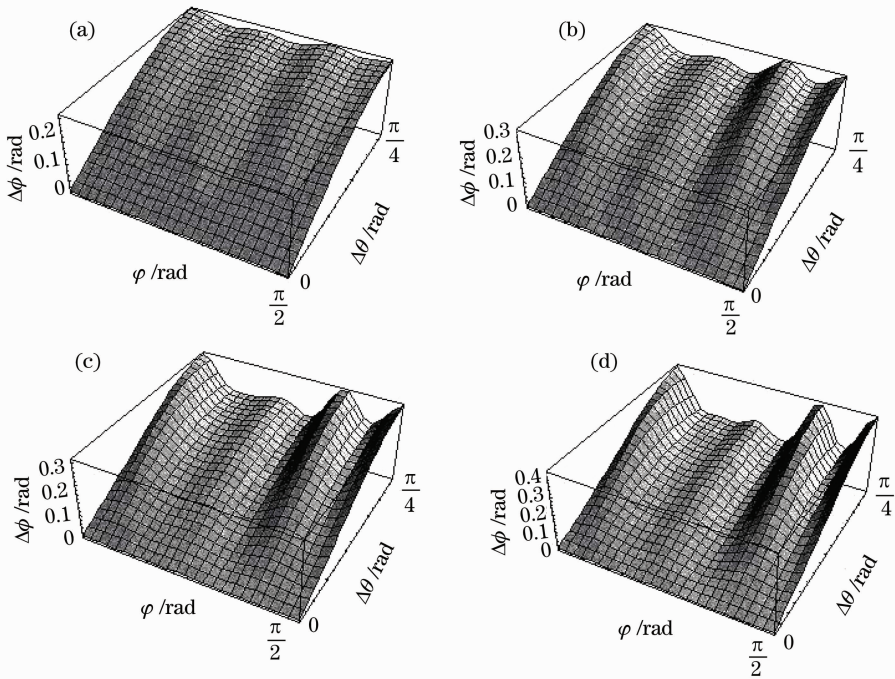


图 3 正交误差  $\Delta\theta$ , 初始角  $\varphi$  与定位角误差  $\Delta\phi$  的关系。(a)  $d=0.1$ , (b)  $d=0.3$ , (c)  $d=0.5$ , (d)  $d=0.7$

Fig. 3 Relations among  $\Delta\theta$ ,  $\varphi$  and  $\Delta\phi$  when  $d$  is 0.1 (a), 0.3 (b), 0.5 (c), 0.7(d), respectively

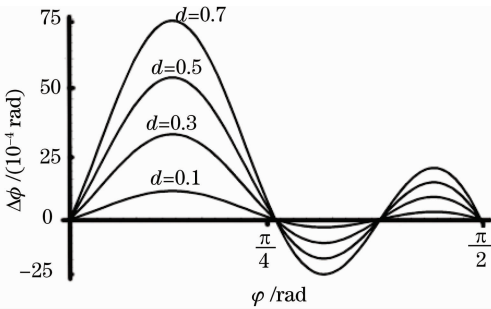


图 4 初始角  $\varphi$  与定位角误差  $\Delta\phi$  的关系

Fig. 4 Relations between  $\varphi$  and  $\Delta\phi$

## 4 实验与讨论

为验证 3 节检偏器阵列偏振正交误差模型, 利用自主研制的偏振光导航定位系统进行了系列实验研究, 并将系统测量结果与美国 ROCKWELL 公司的 Jupiter 并行 12 通道 GPS 接收机测量结果进行了对比。该 GPS 接收机空间测量精度为 5~10 m。

实验中, 首先通过天文历与测量地点地理经纬数据确定太阳高度角与相对方位。然后将偏振阵列检测通道放置于水平误差为 2" 的平台上, 平台旋转方位误差为 10"。测量结果分为两组。在实验组实验时, 通过调整初始方位角, 使得实验组初始角与最优初始角的偏差小于 1° 以下。在对比组实验时, 系统初始角在测量中不作调整。

该系统在不同偏振度情况(对应于不同天气条

件)下, 进行了多次实验。实验结果如图 5 所示, 横坐标 PD 为偏振度, 纵坐标 IR 为实验组与对照组相比, 测量精度的相对提高幅度。

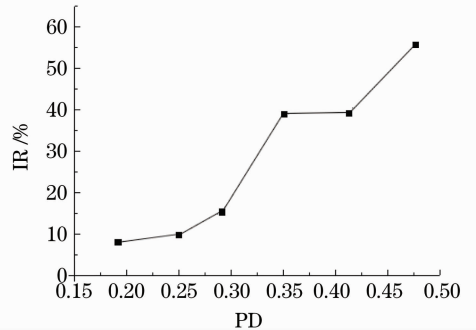


图 5 系统测量精度的相对提高幅度

Fig. 5 Increased range of system measurement accuracy

通过调整初始角度, 可以明显地降低测量误差, 提高测量精度。这种精度提高值随着偏振度的提高而逐渐增加。当云层较多, 偏振度  $d=0.191$  时, 采用最优初始角调整方法, 相对于对照组实验结果, 实验组测量精度幅度相对提高了 8.1%。当云层较少, 偏振度  $d$  提高至 0.350 时, 实验组测量精度幅度相对提高了 39.0%。当天气为晴天, 偏振度提高到 0.476 时, 实验组相对测量精度大幅提高, 其幅度达到 55.8%。该实验结果与基于前述误差模型的数值分析结果保持一致。

## 5 结 论

基于自主研发的偏振光导航定位系统,建立了系统检偏器阵列正交误差模型,基于该模型分析了正交误差对系统大气偏振测量精度与导航定位精度的影响,并对此进行了相应的实验验证。理论分析与实验结果表明,降低系统偏振正交误差,可以明显提高系统大气偏振测量精度与导航定位精度。而当偏振光导航定位系统建立,偏振正交误差无法消除时,调整定位初始角可以显著提高系统测量精度,并且精度提高幅度随着大气偏振度的增大而增大。该研究对优化偏振光导航定位系统设计,提高系统大气偏振测量精度与导航定位精度有一定意义。

### 参 考 文 献

- 1 D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robot. Auton. Syst.*, 2000, **30**(1): 39~64
- 2 Shen Changzhi, Sun Guoyuan. *Celestial Navigation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987. 5~32  
沈长治, 孙国元. 天文导航[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987. 5~32
- 3 K. N. Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. California: Academic Press, 1980. 9~33
- 4 H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover, 1981. 40~57
- 5 Xufeng Huang, Yang Bu, Xiangzhao Wang. Relations between skylight scattering angle and degree of polarization under different sky conditions [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(6): 546~548
- 6 G. Horváth, A. Barta, J. Gál *et al.*. Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3): 543~560
- 7 M. Mujat, A. Dogariu. Real-time measurement of the polarization transfer function [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 34~45
- 8 Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Four-channel time division multiplexing atmospheric polarization measurement technique based on vision bionics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2015~2019  
黄旭锋, 步 扬, 王向朝. 基于视觉仿生原理的四通道时分复用大气偏振检测技术 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2015~2019
- 9 Du Xinyue, Zhu Yingbin, Zhao Daomu. Propagation properties of completely unpolarized beams and completely polarized beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 79~83  
杜新悦, 朱映彬, 赵道木. 完全非偏振光束和完全偏振光束的传输特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 79~83
- 10 Sun Bingyao. *The Basis of Data Processing and Error Analysis* [M]. Henan: Henan University Press, 1990. 50~55  
孙炳耀. 数据处理与误差分析基础 [M]. 河南: 河南大学出版社, 1990. 50~55
- 11 Zhang Xuguo, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Adjustment of optical elements and error analysis for laser remote sensing polarization imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1191~1196  
张绪国, 江月松, 路小梅. 激光遥感偏振成像系统光学元件调整及误差分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1191~1196