

## 同时偏振成像仪检偏方位校正研究

李 双, 裘桢炜

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心  
中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 同时偏振成像探测技术是近年发展起来的新型遥感探测技术, 该技术采用分振幅方式, 在同一个探测器上同时获得被探测目标  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  四个偏振方向的偏振强度图。这四个检偏方位受到仪器自身偏振效应、偏振器件误差和膜层的影响会发生偏离, 为了保证偏振探测精度, 对系统的四个检偏方位采用 Equator-Poles 定标和曲线拟合的方法进行校正, 两种方法测量结果一致性在 0.4% 以内。线偏振度实测精度与理论分析精度都在 2% 以内, 这验证了检偏方位校正的有效性。

**关键词:** 同时偏振成像; 偏振方位; 校正

中图分类号: TH744; O436.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-4100-05

## Polarization orientation calibration of simultaneous imaging polarimeter

Li Shuang, Qiu Zhenwei

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Optical Remote Sensing Center, Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The Simultaneous Imaging Polarimetry (SIP) is a new type of remote sensing detection technology. The imaging polarimetry architecture referred in the paper is Division of Amplitude, which can simultaneously obtain four polarization intensity images (in the orientation angle of  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $135^\circ$ ) of the same target on the same detector. Affected by self-polarization, error of polarization element and coating of the system, the orientation angle of polarization will be deviated. In order to ensure the polarization measurement accuracy, the orientation angle of polarization was calibrated using two methods (Equator-Poles calibration and curve fitting). Results show that the difference between these two methods is less than 0.4%, and degree of linear polarization (DOLP) accuracy of measurement and principle calculation is all within 2%, which prove the effect of the calibration.

**Key words:** simultaneous polarization imaging; polarization orientation; calibration

---

收稿日期: 2014-04-10; 修訂日期: 2014-05-10

基金项目: 中国科学院国防创新基金(093H921321); 国家自然科学基金(U1331111)

作者简介: 李双(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学系统设计及新型偏振成像探测技术的研究。Email:[shli@aiofm.ac.cn](mailto:shli@aiofm.ac.cn)

## 0 引言

偏振成像探测技术作为近些年发展起来的新型遥感探测技术,与传统光度学和辐射度学探测技术相比,它可以获取目标光学辐射的偏振强度值、偏振度、偏振角、偏振椭率和辐射率等参数,大大增加被探测目标的信息量。它在云和大气气溶胶的探测、地质勘探、海洋开发、农牧业发展和军事应用等领域都具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。

偏振成像探测技术在实际应用过程中,仪器平台和探测目标无不处于运动之中,因此实现同时偏振成像探测(Simultaneous Imaging Polarimetry,SIP)才能真正实现探测目标偏振特性的获取,目前国外很多国家都开展了该技术的研究<sup>[2-3]</sup>。在国内,中国科学院安徽光机所通用光学定标与表征技术重点实验室开展了同时偏振成像探测技术的研究<sup>[4-5]</sup>。

文中给出的同时偏振成像仪主要由偏光器件(半波片、渥拉斯顿棱镜)和非偏光器件(透镜,分束棱镜)组成。对于非偏光器件在理想状态下并不改变入射光的偏振态,而对于偏光器件和分束棱镜上镀的半反半透膜将会改变入射光的偏振态。两个渥拉斯顿棱镜之间的主面装配平行度会存在误差,半波片的快轴同渥拉斯顿棱镜主面之间的夹角也存在加工误差,这些因素都将导致同时偏振成像仪每个偏振通道的米勒矩阵同理论值之间存在误差。偏振方位校正的目的就是通过已知参数偏振光的测量获取同时偏振成像仪每个偏振通道实际的米勒矩阵,进而得出同时偏振成像仪实际的仪器矩阵,以便精确地获取探测目标的偏振信息。

## 1 SIP 探测原理

文中所提到的同时偏振成像探测系统采用分振幅的测量方式,探测原理如图 1 所示:入射的目标辐射经过前置光学系统以后,被分振幅模块分为透射和反射两个部分,反射部分经过一个二分之一波片后,反射的目标辐射的偏振方向相对于透射的目标辐射的偏振方向旋转 45°。每一部分经过渥拉斯顿棱镜分成偏振方向相互垂直的两束分量(0° 和 90°,45° 和 135°)。依据系统结构,理论计算的仪器矩阵(instrument matrix)为<sup>[5]</sup>:

$$A = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0.25 & -0.25 & 0 \\ 0.25 & 0 & 0.25 \\ 0.25 & 0 & -0.25 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由斯托克斯方程:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{90} \\ I_{45} \\ I_{135} \end{bmatrix} = A \cdot S = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0.25 & -0.25 & 0 \\ 0.25 & 0 & 0.25 \\ 0.25 & 0 & -0.25 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} \quad (2)$$

可知

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2}, \alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}, Q = \frac{I_0 - I_{90}}{I_0 + I_{90}}, U = \frac{I_{45} - I_{135}}{I_{45} + I_{135}} \quad (3)$$

式中:Q 和 U 是线斯托克斯参量;P 为线偏振度;α 为偏振方位角。

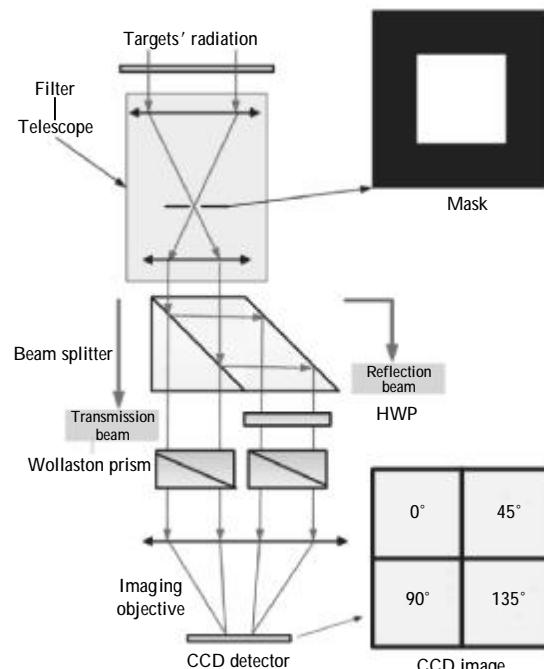


图 1 同时偏振成像探测原理图

Fig.1 Detection schematic of SIP

## 2 同时偏振成像仪偏振方位校正

文中采用两种方法进行偏振方位的校正:曲线拟合法和仪器矩阵法。利用这两种方法分别计算出实际的偏振方位,进而比对两种方法得到的实际偏振方位的一致性,利用仪器矩阵计算实际的斯托克斯向量,评估仪器的测量精度,利用可调偏振光源进行实际测量来验证分析结果。

## 2.1 曲线拟合法

实验测量如图 2 所示, 精密电控转台带动参考偏振片(消光比 10 000:1)旋转, 使同时偏振成像仪 0° 偏振解析方向的响应接近最大值。精密电控转台在此最大值角度附近±10° 的范围内旋转参考偏振片每隔 0.5° 记录 0° 偏振解析方向的响应值, 对转台角度和响应值进行曲线拟合, 判断曲线的极大值点, 此极大值对应的转台角度即为 0° 偏振解析方向的初始角度, 其他 45°, 90°, 135° 三通道同理测量。

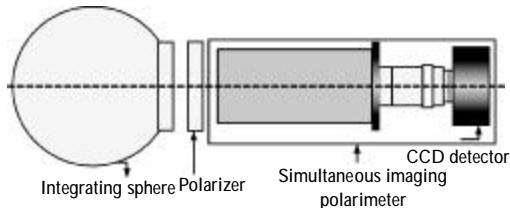
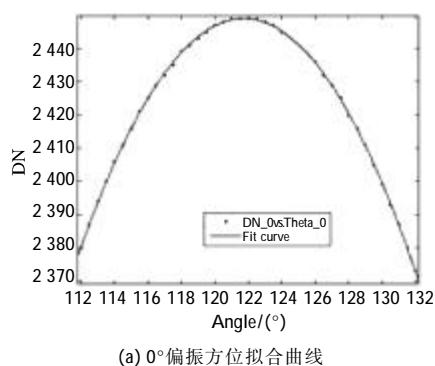


图 2 偏振检测方位测量示意图

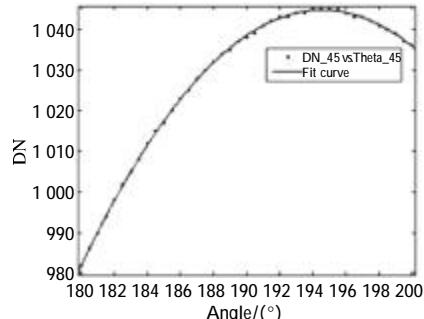
Fig.2 Experimental setup of polarization orientation measurement

使用 MATLAB 的 Curve Fitting Tool 工具对偏振片旋转角度和同时偏振成像仪的响应值进行正弦数据拟合, 拟合曲线如图 3 所示。通过计算四个通道拟合曲线的峰值点所对应的相对角度分别为 121.74°、194.56°、211.97° 和 227.71°。由于以 121.74° 作为 0° 偏振解析方向, 则其他三个偏振解析方向结果如表 1 所示。



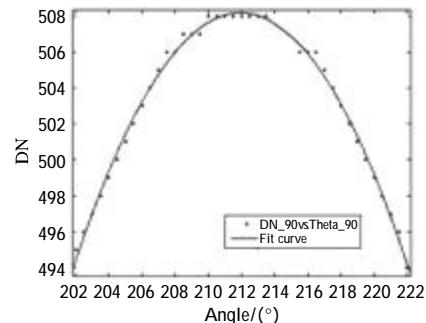
(a) 0° 偏振方位拟合曲线

(a) 0° polarization orientation curve fitting



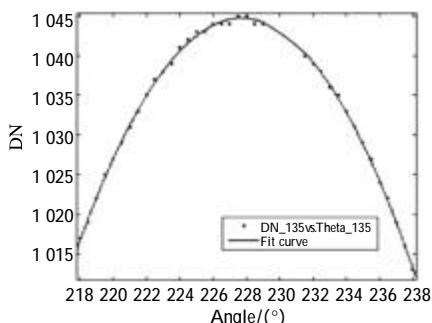
(b) 45° 偏振方位拟合曲线

(b) 45° polarization orientation curve fitting



(c) 90° 偏振方位拟合曲线

(c) 90° polarization orientation curve fitting



(d) 135° 偏振方位拟合曲线

(d) 135° polarization orientation curve fitting

图 3 偏振方位曲线拟合图

Fig.3 Polarization orientation curve fitting

表 1 同时偏振成像仪偏振方位拟合结果

Tab.1 Results of polarization orientation curve fitting

Wavelength	Nominal angle/(°)	Absolute angle/(°)	Calculated angle/(°)
550 nm	0	121.74	0.00
	45	194.56	72.82
	90	211.97	90.23
	135	227.71	105.97

## 2.2 仪器矩阵法

由 Equator-Poles 定标法<sup>[5-7]</sup>可知线偏振片产生线偏振光的斯托克斯矢量为:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{I} \ \mathbf{Q} \ \mathbf{U}]^T = [\mathbf{I} \ \mathbf{I}\cos 2\theta \ \mathbf{I}\sin 2\theta]^T \quad (4)$$

由于每个偏振通道探测器上所获得的光强与起偏方位角  $\theta$  的关系为:

$$\mathbf{I}(\theta) = \mathbf{I}_0 + \mathbf{A}_1 \cos 2\theta + \mathbf{A}_2 \sin 2\theta = \mathbf{I}(\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 \cos 2\theta + \mathbf{A}_2 \sin 2\theta) \quad (5)$$

所以

$$\mathbf{I}_i(\theta) = \frac{\mathbf{I}(\theta)}{\mathbf{I}} = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 \cos 2\theta + \mathbf{A}_2 \sin 2\theta \quad (6)$$

取  $\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_{45} + \mathbf{I}_{135}$ , 利用最小二乘法得到公式(6)的系数即仪器矩阵的前三列为:

$$A_0 = \frac{1}{36} \sum_{j=0}^{35} I_i(\theta_j)$$

$$A_1 = \frac{1}{18} \sum_{j=0}^{35} I_i(\theta_j) \cos\left(\frac{\pi}{9} \times j\right) \quad \theta_j = 0^\circ, 10^\circ, \dots, 350^\circ$$

$$A_2 = \frac{1}{18} \sum_{j=0}^{35} I_i(\theta_j) \sin\left(\frac{\pi}{9} \times j\right) \quad (7)$$

实验装置如图 2 所示, 调整线偏振片快轴的位置与同时偏振成像仪 0° 偏振解析方位一致, 以此位置为初始位置在 0°~350° 范围内旋转线偏振片, 每隔 10° 采集一幅实验图像, 共得到 36 幅实验图像数据 ( $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 350^\circ$ ), 对所获取的偏振图像, 计算实际的仪器矩阵, 具体计算过程见参考文献[5]。

通过计算可得同时偏振成像仪实际的仪器矩阵为:

$$A_{\text{actual}} = \begin{bmatrix} 0.2500 & 0.2474 & 0.0007 \\ 0.2500 & -0.2300 & -0.0011 \\ 0.2500 & -0.1941 & 0.1329 \\ 0.2500 & -0.2032 & -0.1306 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于实际仪器矩阵的每一行分别代表了 4 个不同偏振方向线偏振光的斯托克斯矢量, 因此通过仪器矩阵可以计算出同时偏振成像仪每个偏振通道实际的偏振解析方向, 如表 2 所示。对比表 1 和表 2 的偏振解析方向的测量值可知, 定标计算所得的偏振解析方向的结果同直接测量所得的结果一致, 45°、90° 和 135° 3 个偏振解析方向角度的一致性分别为 0.027%、0.099% 和 -0.368%。

表 2 实际仪器矩阵计算的 4 个偏振方位角

Tab.2 Calculated polarization orientation angle from instrument matrix

Wavelength	Nominal angle/(°)	Calculated angle/(°)
550 nm	0	0.08
	45	72.80
	90	90.14
	135	106.36

### 2.3 定标精度分析

利用图 2 所示实验装置, 旋转线偏振片从 2.5°~177.5° 范围内所获取的偏振图像进行偏振测量精度进行分析。定义理想仪器矩阵与实际仪器矩阵计算的线偏振度的平均偏差为:

$$\Delta P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - P'_i| \quad (10)$$

式中:  $n$  为测试点数量;  $P_i$  为线偏振度的计算值;  $P'_i$  为线偏振度的理论值。通常将斯托克斯参数测量值与理论值之间的平均偏差作为衡量同时偏振成像仪偏振探测性能的一个技术指标。如图 4 所示为线偏振度定标计算结果及其误差。由上述分析可以看出斯托克斯参数和线偏振的测量值同理论值之间吻合的比较好, 而且线偏振度的最大测量偏差在 4% 以内, 平均偏差为 1.77%。

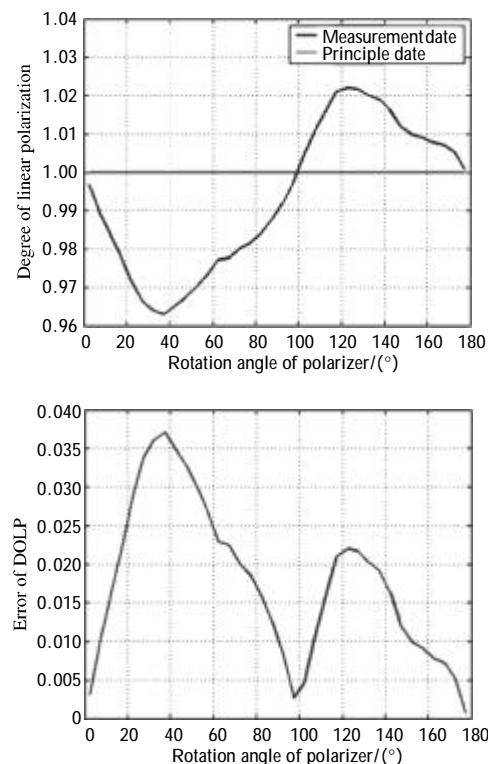


Fig.4 Error of linear polarization degree between instrument matrix calculation and principle calculation results

### 2.4 测量精度实验验证

使用可调偏振度光源 (Variable Polarization Light Source, VPLS) 进行线偏振度测量, 通过改变可调偏振度光源的偏振盒中玻璃板的角度可产生偏振度从 0.17%~35.13% 的线偏振光。使用 SIP 来获取不同线偏振度的辐射图像。实验示意图如图 5 所示。图 6

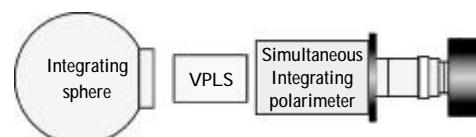


Fig.5 Linear polarization measurement

中,图(a)为 SIP 实际测量和理论计算偏振度之间的差别,图(b)为三种不同积分时间二者差别的分布情况。

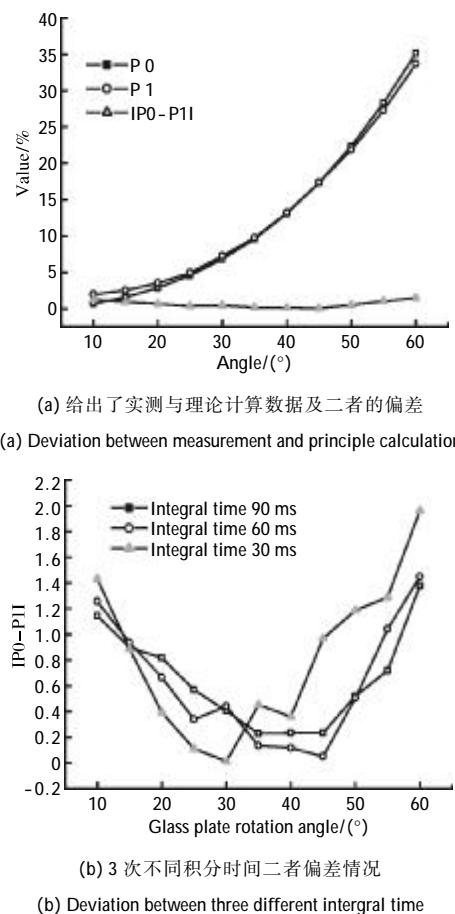


图 6 线偏振度定标结果及其误差,其中  $P_0$  为理论计算偏振度, $P_1$  为实测值

Fig.6 Date of linear polarization calibration and its error.  $P_0$ , principle calculated DOLP;  $P_1$ , measured DOLP

### 3 结 论

随着偏振成像探测技术在各个领域的应用日益广泛,同时偏振成像探测方法将进一步扩展偏振成像探测的应用领域。为了准确获取被探测目标的偏

振信息,精确地获知仪器的检偏方位是仪器定标的必要环节,从文中给出的结果可以看出,两种测量方法一致性很好,而且测量精度在实际测量中得到了验证,这为同时偏振成像探测技术的进一步应用奠定了基础。

### 参 考 文 献:

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] Kenta, Fujita, Maiko, Development of simultaneous imaging polarimeter[C]//SPIE, 2006: 6269, 62693D.
- [3] Fujita K, Itoh Y, Mukai T. Development of simultaneous imaging polarimeter for asteroids [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43: 325-327.
- [4] Li Shuang, Qiu Zhenwei, Yang Changjiu. Preliminary study on the detection technology of simultaneous imaging polarization (SIP) [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2010, 5(3): 198-202. (in Chinese)  
李双, 裴桢炜, 杨长久, 同时偏振成像探测技术初探[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(3): 198-202.
- [5] Yang Changjiu. Studies on calibration and information processing of simultaneous imaging polarimeter [D]. Hefei: Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)  
杨长久. 同时偏振成像仪定标与信息处理研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2012.
- [6] Azzam R M A. Instrument matrix of the four-detector photopolarimeter: physical meaning of its rows and columns and constraints on its elements [J]. *J Opt Soc Am A*, 1990, 7(1): 87-91.
- [7] Azzam R M A, Lopez A G. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements[J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(10): 1513-1521.