

# 多光谱分孔径同时探测系统偏振定标方法

范慧敏<sup>1,2,3</sup>, 康 晴<sup>1,2,3</sup>, 裘桢炜<sup>1,3</sup>, 袁银麟<sup>1,3</sup>, 洪 津<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>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** 介绍了多光谱分孔径同时探测系统的偏振定标方法。根据探测系统的特点,分析引起探测系统偏振效应的主要因素,包括偏振片消光比、装配误差导致的检偏器透过轴角度偏差和绝对光谱响应度;推导带有偏振片消光比、角度偏差和绝对光谱响应度的系统探测矩阵;设计具体实验,并求解系统探测矩阵中的未知定标数据;利用偏振度可调的光源对偏振定标方法及定标数据进行验证。结果表明,使用 490,670,870,1610 nm 波段,在输入偏振光的偏振度为 20% 时,测得偏振度的偏差分别为 0.74%,0.01%,0.80%,0.59%,满足探测系统对实际偏振测量精度指标的要求。所提出的偏振定标方法有效可行,为该探测系统的实际应用提供了基础。

**关键词** 遥感; 偏振探测; 多光谱分孔径同时探测; 偏振定标

**中图分类号** TP732.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0228001

## Polarization Calibration for Multi-Spectral Aperture-Divided Simultaneous Detection System

Fan Huimin<sup>1,2,3</sup>, Kang Qing<sup>1,2,3</sup>, Qiu Zhenwei<sup>1,3</sup>, Yuan Yinlin<sup>1,3</sup>, Hong Jin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** A polarization calibration method for a multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system was introduced. According to characteristics of the detection system, the main factors causing polarization effect were analyzed, including polarizer extinction ratio, polarizer orientation angle deviation induced by assembly error and absolute spectral response. The system detection matrix with polarizer extinction ratio, angle deviation and absolute spectral response was derived. Experiments were designed to solve the unknown calibration data in the system detection matrix. The polarization calibration method and the calibration data were verified with a light source with adjustable polarization degree. The results showed that the measured polarization degrees were 0.74%, 0.01%, 0.80% and 0.59% when the polarization degree of input polarized light was 20% at 490, 670, 870, 1610 nm, which meets the requirement for actual polarization measurement precision in detection system. The proposed polarization calibration method is effective and feasible. The study may contribute to important basis for the practical application of the detection system.

**Key words** remote sensing; polarization detection; multi-spectral aperture-divided simultaneous detection; polarization calibration

**OCIS codes** 280.1100; 120.0280; 120.5410

收稿日期: 2016-07-11; 收到修改稿日期: 2016-09-15

基金项目: 国家重大科技专项工程、中国科学院科技创新重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 范慧敏(1986—),女,博士研究生,主要从事偏振遥感方面的研究。E-mail: fanhuimin1986@126.com

导师简介: 洪 津(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空及航天遥感器工程技术方面的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn(通信联系人)

## 1 引言

偏振遥感属于遥感应用中的一个新的研究方向,具有很大的应用和发展潜力<sup>[1]</sup>。国外很多研究机构都进行了相关的研究和探索,知名度较高的星载气溶胶偏振测量仪器有法国的 POLDER<sup>[2]</sup>,美国的 APS<sup>[3]</sup>、MSPI<sup>[4]</sup>等,国内也有相关的多角度偏振成像仪<sup>[5]</sup>、多角度偏振辐射计<sup>[6]</sup>等。从探测系统的时间特性划分,偏振探测方式可以分为两类<sup>[7]</sup>:一类是分时探测,即在同一个探测系统中引入起偏器和相位延迟器,通过偏振面的机械旋转,利用电光或磁光调制光强以求得斯托克斯参量,例如 POLDER 探测系统<sup>[2]</sup>;另一类是同时探测,即将探测光分为若干分离的小光源后进行多通道同时探测,例如 APS 探测系统<sup>[3]</sup>。本文主要介绍多光谱分孔径同时探测系统的偏振定标方法,该系统属于同时探测系统。偏振定标就是对传感器系统中各部分影响矢量辐射传输的物理参数进行定标<sup>[8-9]</sup>,偏振定标的精度会影响偏振遥感信息反演的精度<sup>[8]</sup>,是基于偏振探测的大气参数高精度反演的基础,对大气探测具有重要意义。然而,偏振定标一般要比强度定标复杂得多,也更难实现<sup>[10-11]</sup>。法国 POLDER 和美国 APS 探测系统的偏振定标都是根据系统的特点,考虑引起偏振效应的主要因素<sup>[3,12]</sup>,分析探测器的探测量与入射光斯托克斯分量的数学方程,得到系统的探测矩阵,进而通过定标求得系统探测矩阵中的未知参数<sup>[13]</sup>。据此,本文在研究多光谱分孔径同时探测系统的偏振定标方法时,根据探测系统的特点,结合偏振光学理论和辐射度学理论,分析引起探测系统偏振效应的主要因素,推导带有定标系数的系统探测矩阵;设计具体实验,并求解系统探测矩阵中的未知定标系数;利用偏振度可调的光源对探测系统的偏振定标方法进行验证。

## 2 系统原理介绍

多光谱分孔径同时探测系统采用多光谱分孔径同时探测结构,图 1 为该光学子系统的组成框图以及外形结构图。该系统主要应用于大气气溶胶参数的反演,所以波段的选择主要集中在近紫外到短波红外的多个大气窗口区域,包括 0.49,0.67,0.87,1.6  $\mu\text{m}$ ,其中,受气溶胶消光效应影响较弱的短波红外窗口用于实现地气解耦<sup>[14]</sup>。由偏振成像测量原理可知,要获得不完全斯托克斯向量,对一个波段至少需要进行三次测量<sup>[9]</sup>,该系统采用 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 三个偏振方位探测方式,三个偏振检偏器透光轴以  $60^\circ$  等间隔分布。所有通道均采用双分离透镜的镜头,以避免胶合层在辐射环境下退化。在双透镜前方依次放置窗片、偏振片和滤光片。探测器为单元探测器,同时设计单像元瞬时视场为  $0.74^\circ \times 0.74^\circ$ 。设计中要求系统在输入偏振度为 20% 时,偏振测量精度优于 1%。

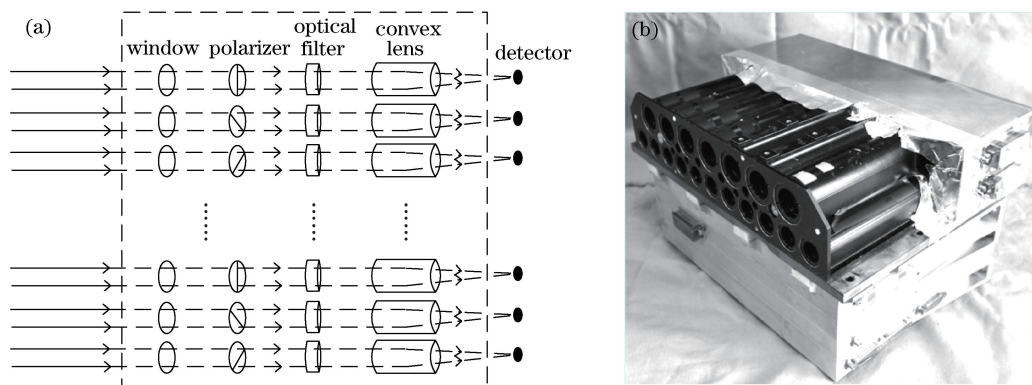


图 1 多光谱分孔径同时探测系统光学子系统的(a)组成框图及(b)外形图

Fig. 1 (a) Block diagram and (b) outside view of optical subsystem in multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system

## 3 系统探测矩阵的推导

探测系统的各偏振通道在偏振片后设有滤光片和双分离透镜,单像元瞬时视场较小,光学系统可以视作近轴理想光学系统,引入偏振误差的主要因素有透镜反射膜导致的相位延迟、偏振片消光比、装配误差导致的检偏器透过轴角度偏差以及绝对光谱响应度。所镀的多层宽带减反射膜导致的相位延迟角为  $\delta$ ,根据

Smith 方法<sup>[15]</sup>,当入射角趋于 0,即接近垂直入射时,相位延迟也趋于 0,计算时可以忽略其影响,所以本文主要介绍偏振片消光比、装配误差导致的检偏器透过轴角度偏差以及绝对光谱响应度三个方面的影响,并推导带有上述影响因素的系统探测矩阵。

### 3.1 消光比

假设偏振片的最大透射率为  $t_x$ ,最小透射率为  $t_y$ ,建立系统坐标系,其中入射线偏振光与偏振片透过轴方向的夹角为  $\theta$ ,若不考虑圆偏振,则探测通道偏振片的米勒矩阵为<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{M}_p(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_x^2 + t_y^2 & (t_x^2 - t_y^2) \cos 2\theta & (t_x^2 - t_y^2) \sin 2\theta \\ (t_x^2 - t_y^2) \cos 2\theta & (t_x^2 + t_y^2) \cos^2 2\theta + 2t_x t_y \sin^2 2\theta & (t_x - t_y)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta \\ (t_x^2 - t_y^2) \sin 2\theta & (t_x - t_y)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta & (t_x^2 + t_y^2) \sin^2 2\theta + 2t_x t_y \cos^2 2\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

若偏振片的消光系数为  $e$ ,则  $t_x^2 + t_y^2 = (e^2 + 1)/(e + 1)^2 = \gamma$ ,  $t_x^2 - t_y^2 = (e^2 - 1)/(e + 1)^2 = \epsilon$ ,得到出射光斯托克斯参量中的光强度  $I'$ 为

$$I' = \frac{1}{2} (I\gamma + Q\epsilon \cos 2\theta + U\epsilon \sin 2\theta), \quad (2)$$

式中  $I, Q, U$  为三个斯托克斯参量。

三个偏振片的消光比分别为  $e_0, e_{60}$  和  $e_{120}$ ,入射光经过三个偏振片后,输出光强度分别为  $I_0, I_{60}$  和  $I_{120}$ ,

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{60} \\ I_{120} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \gamma_0 & \epsilon_0 \cos 2\theta_0 & \epsilon_0 \sin 2\theta_0 \\ \gamma_{60} & \epsilon_{60} \cos 2\theta_{60} & \epsilon_{60} \sin 2\theta_{60} \\ \gamma_{120} & \epsilon_{120} \cos 2\theta_{120} & \epsilon_{120} \sin 2\theta_{120} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} \quad (3)$$

对(3)式求逆,可得到输出偏振态斯托克斯参量  $(I', Q', U')^T$ ,进而得到输出偏振度  $P$ 。对消光比进行敏感性因子分析可以发现,当入射光为非偏振光,三个通道分别采用消光比为  $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$  级别的偏振片时,消光比及通道间的不一致性带来的偏振误差分别达到 10%、1.2%、0.12%。以消光比为  $10^{-3}$  级别的偏振片为例,分析通道间消光比对偏振度影响的敏感性,如图 2 所示,图中  $e_0, e_1, e_2$  分别表示  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  三个偏振通道的消光比,消光比的比值  $e_0/e_1, e_0/e_2$  用来表示消光比的不一致性。图 2(a)中三个通道均采用消光比为  $10^{-3}$  级别的偏振片,输入偏振度从 0 变化到 1、输入偏振光的方位角从  $0^\circ$  变化到  $180^\circ$  时,输出偏振度与输入偏振度的差值(图中的输出偏振度误差)最大约为 0.15%;从图 2(b)可以看出,在输入偏振度为 0、输入偏振光的方位角为  $0^\circ, e_0$  为  $10^{-3}$  的条件下,当不一致性达到 10 倍时,输出偏振度与输入偏振度的差值最大为 0.12%。设计要求系统偏振测量精度在偏振度为 20% 时优于 1%,该系统三个通道均使用消光比为  $10^{-3}$  级别的偏振片时,能满足系统的设计要求。

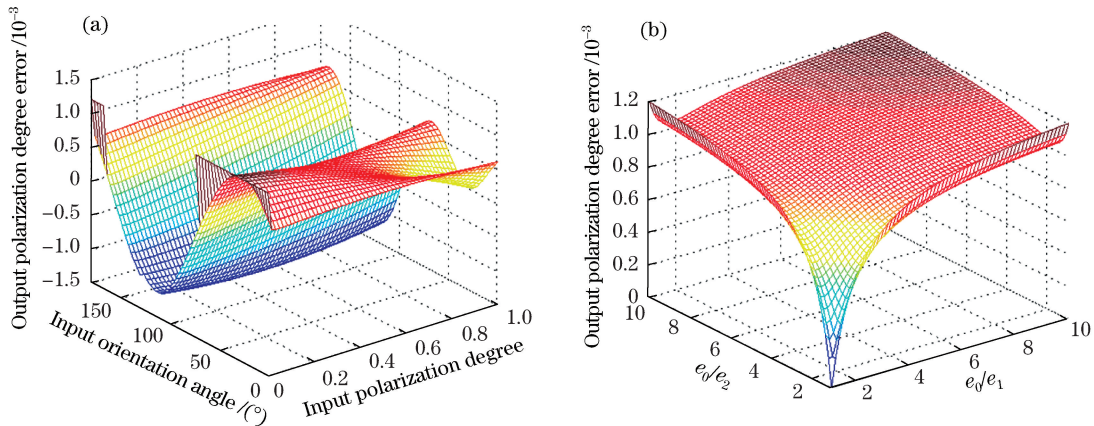


图 2 偏振消光比对偏振度影响的敏感性分析。(a)  $e_0 = e_1 = e_2 = 10^{-3}$ ; (b)  $e_0 = 10^{-3}$

Fig. 2 Sensitivity analysis of effect of polarizer extinction ratio on polarization degree.

(a)  $e_0 = e_1 = e_2 = 10^{-3}$ ; (b)  $e_0 = 10^{-3}$

### 3.2 检偏器透过轴角度偏差

假设入射线偏振光和  $0^\circ$  基准检偏器透过轴方向之间的夹角为  $\theta$ ,同一波段的其余两个检偏器透过轴方

向与基准相比,相对角度偏差分别为  $\delta_{60}$  和  $\delta_{120}$ ,则(3)式可转化为

$$\begin{bmatrix} I_\theta \\ Q_\theta \\ U_\theta \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \gamma_0 & \epsilon_0 \cos 2(0 + \theta) & \epsilon_0 \sin 2(0 + \theta) \\ \gamma_{60} & \epsilon_{60} \cos 2\left(\frac{1}{3}\pi + \delta_{60} + \theta\right) & \epsilon_{60} \sin 2\left(\frac{1}{3}\pi + \delta_{60} + \theta\right) \\ \gamma_{120} & \epsilon_{120} \cos 2\left(\frac{2}{3}\pi + \delta_{120} + \theta\right) & \epsilon_{120} \sin 2\left(\frac{2}{3}\pi + \delta_{120} + \theta\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{60} \\ I_{120} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,线偏振度  $P_{\text{lop}}$  可用检偏器透过轴角度偏差表示:

$$P_{\text{lop}} = \frac{\sqrt{Q_\theta^2 + U_\theta^2}}{I_\theta} = \sqrt{\frac{A + B + C + D}{\left[ \epsilon_0 \epsilon_{60} I_{120} \sin\left(\frac{2}{3}\pi + 2\delta_{60}\right) - \epsilon_0 \epsilon_{120} I_{60} \sin\left(\frac{4}{3}\pi + 2\delta_{120}\right) + \epsilon_{60} \epsilon_{120} I_0 \sin\left(\frac{2}{3}\pi + 2\delta_{120} - 2\delta_{60}\right) \right]^2}}, \quad (5)$$

$$A = (\gamma_{60} \epsilon_0 I_{120} - \gamma_{120} \epsilon_0 I_{60})^2 + (\gamma_{120} \epsilon_{60} I_0 - \gamma_0 \epsilon_{60} I_{120})^2 + (\gamma_0 \epsilon_{120} I_{60} - \gamma_{60} \epsilon_{120} I_0)^2, \quad (6)$$

$$B = 2(\gamma_{120} \epsilon_{60} I_0 - \gamma_0 \epsilon_{60} I_{120})(\gamma_{60} \epsilon_0 I_{120} - \gamma_{120} \epsilon_0 I_{60}) \cos\left(-\frac{2}{3}\pi - 2\delta_{60}\right), \quad (7)$$

$$C = 2(\gamma_0 \epsilon_{120} I_{60} - \gamma_{60} \epsilon_{120} I_0)(\gamma_{120} \epsilon_{60} I_0 - \gamma_0 \epsilon_{60} I_{120}) \cos\left(2\delta_{60} - \frac{2}{3}\pi - 2\delta_{120}\right), \quad (8)$$

$$D = 2(\gamma_{120} \epsilon_{60} I_0 - \gamma_0 \epsilon_{60} I_{120})(\gamma_{60} \epsilon_0 I_{120} - \gamma_{120} \epsilon_0 I_{60}) \cos\left(-\frac{4}{3}\pi - 2\delta_{120}\right). \quad (9)$$

由(5)式可知,偏振度与  $\theta$  无关,同理可推导得到偏振方位角与  $\theta$  相关,从公式定义分析也可知,偏振度是偏振光强与总光强之比,无坐标系信息。偏振方位角是指入射光中偏振矢量部分的振动方向,与坐标系的选择有关。为了满足各波段联合使用反演目标信息,实验室定标时采用一个固定波段(如 490 nm)的  $0^\circ$  方位偏振片的坐标系为基准坐标系,其余波段的  $0^\circ$  均与基准波段比较取绝对角度偏差。对单波段而言,可以用同一波段三个检偏器透过轴方向之间的相对角度偏差表示:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \gamma_0 & \epsilon_0 \cos 2(0) & \epsilon_0 \sin 2(0) \\ \gamma_{60} & \epsilon_{60} \cos 2\left(\frac{1}{3}\pi + \delta_{60}\right) & \epsilon_{60} \sin 2\left(\frac{1}{3}\pi + \delta_{60}\right) \\ \gamma_{120} & \epsilon_{120} \cos 2\left(\frac{2}{3}\pi + \delta_{120}\right) & \epsilon_{120} \sin 2\left(\frac{2}{3}\pi + \delta_{120}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{60} \\ I_{120} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

使用消光比为  $10^{-3}$  级别的偏振片对(10)式进行仿真分析,仿真结果如图 3 所示。图 3(a)为  $\delta_{60}$  和  $\delta_{120}$  皆为  $0.5^\circ$ (基准为三个偏振器中  $0^\circ$  的偏振方位)、输入光的偏振度从 0 变为 1、输入光的偏振方位角从  $0^\circ$  变为  $180^\circ$ (基准为三个偏振器中  $0^\circ$  的偏振方位)时,输出偏振度与输入偏振度的差值(图中的输出偏振度误差)变化图;图 3(b)为在输入光的偏振度为 1、输入方位角为  $0^\circ$  的条件下, $\delta_{60}$  和  $\delta_{120}$  从 0 变为  $0.5$  时输出偏振度与输入偏振度差值的变化图。从图 3 可以看到,仅偏振方位角这一个误差源对最终计算得到的输出偏振度产生影响,在方位角误差为  $0.5$  时,输出偏振度和输入偏振度的差值可以达到 2%,故在实际使用时,需要对每一个偏振方位的偏振器进行定标,以获得高精度的方位角偏差。

### 3.3 绝对光谱响应度

根据辐射度学理论<sup>[17]</sup>,利用单个通道的绝对光谱响应率  $R(\lambda_i)$  可建立其与非偏振光入射时入瞳处光谱辐亮度的定量化光学关系<sup>[18]</sup>:

$$L_{\text{BSR}}(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L_S(\lambda) r(\lambda_i) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} r(\lambda_i) d\lambda}, \quad (11)$$

$$R(\lambda_i) = \frac{S_{\text{DN}}}{L_{\text{BSR}}(\lambda_i)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_1^n (S_{\text{DN}_{\lambda_i}} - S_{\text{DC}_{\lambda_i}})}{L_{\text{BSR}}(\lambda_i)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_1^n (S_{\text{DN}_{\lambda_i}} - S_{\text{DC}_{\lambda_i}})}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L_S(\lambda) r(\lambda_i) d\lambda}, \quad (12)$$

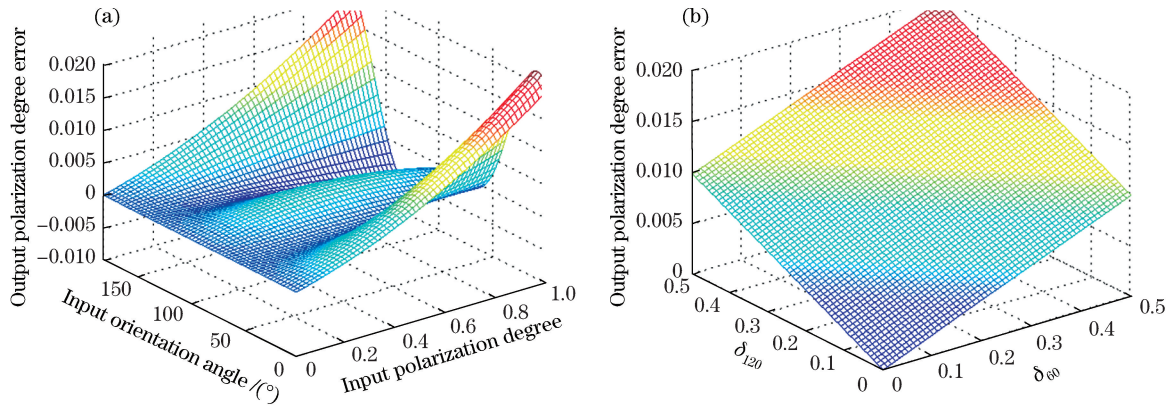


图 3 检偏器透过轴角度偏差对偏振度的敏感性分析。(a)  $\delta_{60} = \delta_{120} = 0.5^\circ$ ; (b)  $0^\circ < \delta_{60} < 0.5^\circ, 0^\circ < \delta_{120} < 0.5^\circ$

Fig. 3 Sensitivity analysis of polarizer orientation angle deviation on polarization degree.

(a)  $\delta_{60} = \delta_{120} = 0.5^\circ$ ; (b)  $0^\circ < \delta_{60} < 0.5^\circ, 0^\circ < \delta_{120} < 0.5^\circ$

式中  $L_{BSR}(\lambda_i)$  为非偏光入射时系统入瞳处的光谱辐亮度(单位:  $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ),  $r(\lambda_i)$  为相对积分光谱响应度,  $S_{\overline{DN}}$  为扣除本底后系统响应的平均值,  $S_{DN_{\lambda_i}}$  为各通道多次测量时探测器的单次响应值,  $S_{DC_{\lambda_i}}$  为探测系统各通道的本底信号,  $L_S(\lambda)$  为参考目标光谱辐亮度,  $r(\lambda_i)$  为相对光谱响应度,  $R(\lambda_i)$  为系统绝对响应度。

在  $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$  三种偏振方位探测方式中, 假设同一波段各偏振通道探测器扣除本底后探测器的单次响应值分别为  $S_{\overline{DN}_0}, S_{\overline{DN}_{60}}$  和  $S_{\overline{DN}_{120}}$ , 各偏振通道的绝对响应度分别为  $R_0, R_{60}$  和  $R_{120}$ , 对(5)式右边矩阵求逆, 利用(12)式可以得到系统三种偏振方位探测方式中带有定标系数的修正后系统的探测矩阵为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \gamma_0 & \epsilon_0 \cos 2(0) & \epsilon_0 \sin 2(0) \\ \gamma_{60} & \epsilon_{60} \cos 2\left(\frac{1}{3}\pi + \delta_{60}\right) & \epsilon_{60} \sin 2\left(\frac{1}{3}\pi + \delta_{60}\right) \\ \gamma_{120} & \epsilon_{120} \cos 2\left(\frac{2}{3}\pi + \delta_{120}\right) & \epsilon_{120} \sin 2\left(\frac{2}{3}\pi + \delta_{120}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{\overline{DN}_0}/R_0 \\ S_{\overline{DN}_{60}}/R_{60} \\ S_{\overline{DN}_{120}}/R_{120} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

## 4 偏振通道定标实验及精度验证

### 4.1 检偏器透过轴方向

偏振片生产工艺稳定, 对偏振片抽样进行测试, 发现消光比均大于  $10^{-3}$ , 所以,  $\gamma \approx 0.999, \epsilon \approx 0.997$ 。

检偏器透过轴方向常用的检测方法是对参考偏振片和待测偏振片进行旋转消光实验以获得相应的角度偏差<sup>[19-20]</sup>, 即以安装在精密转台上的参考偏振片为基准, 通过精密转台的连续旋转, 以其中的一个方向作为  $0^\circ$  检偏方向, 当参考偏振片的透光轴方向和待测偏振片的透光轴方向平行时, 探测器的光强最大, 记录此时角度与基准坐标系的角度差, 依次获取其他方向的真实透过轴方向。但是, 由于探测器本身存在稳定性差异, 使得采用该方法判断光强最大值或者最小值的位置时存在很大的随机误差。

由于探测系统的瞬时视场较小, 故采用了一种新的实验方法, 即通过精密转台的旋转带动检偏器旋转, 旋转过程中三个偏振通道探测器同时采集数据, 最终探测器会得到各个偏振通道呈余弦曲线变化的周期性信号, 且该信号符合马吕斯定律。利用正弦函数对各个偏振通道获取的信号进行拟合, 初始相位  $\varphi$  即为检偏器透过轴角度差。具体计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 不同波段  $0^\circ$  的检偏器透过轴方向最大相对角度偏差为  $3.235^\circ$ , 且检偏器透过轴方向与设计的方向偏离较多, 最大相对角度偏差为  $5.209^\circ$  (490 nm 的 P2 通道), 这是由于偏振片尺寸较小, 0.1 mm 对应  $1^\circ$ , 而且镜筒采用一体化加工, 装调难度很大, 后续需要再设计系统装调, 以减小系统各通道偏振方位角位置与设计的偏差。

表 1 三个检偏器透过轴方向之间的相对角度偏差

Table 1 Relative angle deviation among three polarizer orientations

Band wavelength /nm	Relative angle deviation (P0) /( $^{\circ}$ )	Reference position (P1) /( $^{\circ}$ )	Relative angle deviation (P2) /( $^{\circ}$ )
490	0	54.7910	122.0160
670	-1.7544	64.7810	121.9106
870	-3.2350	60.3582	123.2118
1610	-2.3970	59.7215	122.3532

## 4.2 绝对光谱响应度

绝对光谱响应度  $R_{\text{band}}$  通过(12)式计算得到, 相对光谱响应度  $R_{\text{b}\lambda}$  可通过单色仪与标准探测器的比对计算获得:

$$R_{\text{b}\lambda} = \frac{V_{\text{b}\lambda} - V_{\text{bo}\lambda}}{V_{\text{p}\lambda} - V_{\text{po}\lambda}} R_{\lambda}, \quad (14)$$

式中  $R_{\text{b}\lambda}$  为被校光电探测器的相对光谱响应度,  $V_{\text{b}\lambda}$  为被校光电探测器的输出信号,  $V_{\text{bo}\lambda}$  为被校光电探测器的暗信号,  $V_{\text{p}\lambda}$  为标准探测器的输出信号,  $V_{\text{po}\lambda}$  为标准探测器的暗信号,  $R_{\lambda}$  为标准探测器的光谱响应度。

多光谱分孔径同时探测系统的各通道绝对光谱响应度测量结果如表 2 所示。实验时采用均匀性良好的积分球照射探测系统, 从测量结果可以看出, 各通道间存在较为明显的绝对光谱响应度差异。

表 2 绝对光谱响应度测量结果

Table 2 Measured results of absolute spectral response

Band	$S_{\text{DN}_{\lambda_i}}$	$L_{\text{BSR}}(\lambda_i)$	$R_{\lambda_i}$
DN_490_0	19086.61	33.134	576.039
DN_490_60	18063.44	33.110	545.555
DN_490_120	20213.95	33.330	606.479
DN_670_0	23419.04	11.323	2068.324
DN_670_60	22377.04	11.375	1967.232
DN_670_120	23482.54	11.363	2066.570
DN_870_0	21470.12	7.521	2854.539
DN_870_60	21190.79	7.519	2818.304
DN_870_120	21149.98	7.517	2813.704
DN_1610_0	15381.43	0.370	41553.050
DN_1610_60	14437.82	0.366	39434.264
DN_1610_120	13422.84	0.367	36531.825

## 4.3 偏振定标精度验证

偏振测量精度为探测系统经过偏振定标后, 偏振度测量值相对于可调偏振度光源参考值的偏离程度, 主要利用可调偏振度光源对偏振光学遥感器偏振定标精度进行验证<sup>[21]</sup>。偏振度可调光源的原理是利用自然光通过玻片堆产生偏振光, 旋转玻片堆产生不同偏振度的线偏振光<sup>[22]</sup>, 从而实现偏振度的连续输出。将探测系统实测的偏振度与可调偏振度光源输出的偏振度进行对比, 实现对偏振定标精度的验证。

实验时, 可调偏振度光源输出 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、45% 和 60% 共计 9 种偏振度参考值, 同时探测系统原理样机各个波段的偏振通道采集数据。利用偏振度测量值与参考值之间的偏差和测量不确定度来判断偏振测量精度是否满足定标要求, 表 3 为探测系统偏振度的测量值和参考值及他们之间的偏差。

从测量对比结果可以看出, 可调偏振度光源输出偏振度可调的预设偏振光, 490 nm 波段测得的偏振度与参考偏振度的偏差范围为 0.33%~0.96%, 平均偏差为 0.667%。当参考偏振度为 20% 时, 测得的偏振度为 19.26%, 他们之间的偏差为 0.74%; 在 670 nm 波段测得的偏振度与参考偏振度的偏差范围为 0.01%~0.89%, 平均偏差为 0.39%, 当参考偏振度为 20% 时, 测得的偏振度为 19.01%, 他们之间的偏差为 0.01%; 在 870 nm 波段测得的偏振度与参考偏振度的偏差范围为 0.62%~0.89%, 平均偏差为 0.735%, 当参考偏振度为 20% 时, 测得的偏振度为 19.20%, 他们之间的偏差为 0.80%; 在 1610 nm 波段测得的偏振度与参考偏振度的偏差范围为 0.40%~0.94%, 平均偏差为 0.744%, 当参考偏振度为 20% 时, 测得的偏振度 20.59%, 他们

之间的偏差为 0.59%。结果表明,探测系统测得的偏振度与实际输入的偏振度之间的偏差均小于 1%,并且当输入偏振光的偏振度为 20%时,测得的偏差均小于 1%,即偏振测量精度优于 1%,满足实际中对偏振测量精度的要求。

表 3 系统测得的偏振光源的偏振度及其与参考偏振度的偏差

Table 3 Measured polarization degree of polarization light source and deviation between measured polarization degree and referenced polarization degree

$P_C / (^\circ)$	490 nm		670 nm		870 nm		1610 nm	
	$P_M / \%$	$ P_M - P_C  / \%$	$P_M / \%$	$ P_M - P_C  / \%$	$P_M / \%$	$ P_M - P_C  / \%$	$P_M / \%$	$ P_M - P_C  / \%$
0	0.96	0.96	0.6	0.60	0.89	0.89	0.68	0.68
5	4.44	0.56	4.88	0.12	4.21	0.79	5.77	0.77
10	9.39	0.61	9.60	0.40	9.30	0.70	10.91	0.91
15	14.32	0.68	14.96	0.04	14.39	0.61	15.79	0.79
20	19.26	0.74	20.01	0.01	19.20	0.80	20.59	0.59
25	24.21	0.79	25.10	0.10	24.30	0.70	25.40	0.40
30	29.29	0.71	29.11	0.89	29.38	0.62	29.29	0.71
45	44.38	0.62	45.46	0.46	44.36	0.64	44.09	0.91
60	59.67	0.33	60.89	0.89	60.88	0.88	59.06	0.94
Mean		0.667%		0.390%		0.735%		0.744%
Variance		0.02977		0.12094		0.01156		0.03045

$P_C$ : referenced polarization degree;  $P_M$ : measured polarization degree;  $|P_M - P_C|$ : referenced polarization degree and measured polarization angle

#### 4.4 不确定度评定

用标准偏差表示的不确定度称为标准不确定度,利用贝塞尔法<sup>[21]</sup>表示单次测量结果的不确定度为

$$u = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 / (n - 1)}, \quad (15)$$

式中  $x_k$  为第  $k$  次测量值,  $\bar{x}$  为测量平均值,  $n$  为测量次数。根据(15)式计算得到测量结果的不确定度为 0.629%。

根据测量不确定度合格评定通用比对标准<sup>[23]</sup>,利用  $E_n$  值对测量结果进行一致性评价。 $E_n$  值的计算公式为

$$E_n = |P_M^k - P_C^k| / \sqrt{u_C^2(P_M^k) + u_C^2(P_C^k)}, \quad (16)$$

式中  $P_M^k$  为可调偏振度光源的偏振度参考值,  $P_C^k$  为多光谱分孔径同时探测系统的偏振度测量值,  $u_C(P_M^k)$  为可调偏振度光源输出偏振度的不确定度,  $u_C(P_C^k)$  为同时探测系统输出偏振度的不确定度。通过(16)式计算得到  $E_n$ , 其中  $u_C(P_M^k)$  为 0.2%,  $u_C(P_C^k)$  为 0.629%。 $E_n$  的绝对值范围为 0~1.03, 为满意结果, 说明所选择的检测原理和检测方法合理。

## 5 结 论

定标和数据的预处理是偏振探测传感器获取正确信息的基础,其精度决定着最终遥感信息的反演精度。主要研究了多光谱分孔径同时探测系统的偏振定标方法,分析了探测系统的特点,根据偏振光学理论和辐射度学理论分析了引起系统偏振效应的各个因素,推导系统带有定标系数的探测矩阵。结果表明,在当输入偏振光的偏振度为 20%时,其与测得偏振度之间的偏差小于 1%,满足实际中对偏振测量精度指标的要求,同时计算得到测量结果的不确定度为 0.629%,表明系统的偏振定标方法有效可行,从而为该探测系统的实际应用提供了基础。

由于文中的不确定度分析方法主要是基于经验公式得到的,所以下一步的工作需要对具体的不确定度传递机理进行详细的研究,与此同时需要对检偏器透过轴方位检测方法进行详细分析,论证该方法在应用中的优缺点和局限性,降低定标的不确定度,提高测量精度。从定标结果看,偏振片方位角安装存在较大的偏

差,需要对系统装调进行再设计,以减小系统各偏振片的偏振方位角位置与设计之间的偏差,从而降低系统精度对定标精度的依赖性。

## 参 考 文 献

- [1] Gu Xingfa, Cheng Tianhai, Li Zhengqiang, *et al.* Atmospheric aerosol polarized remote sensing [M]. 1<sup>st</sup> Edition. Beijing: Higher Education Press, 2015: 18-19.  
顾行发, 程天海, 李正强, 等. 大气气溶胶偏振遥感[M]. 1版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 18-19.
- [2] Kox S, Furget C, Real J, *et al.* POLDER-a tensor polarimeter for intermediate-energy deuterons [J]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section, 1994, 346(3): 527-543.
- [3] Persh S, Shaham Y, Benami O, *et al.* Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor[C]. SPIE, 2010, 7807: 780703.
- [4] Mahler A-B, Diner D J, Chipmen R A. Analysis of static and time-varying polarization errors in the multiangle spectro-polarimetric imager[J]. Applied Optics, 2011, 50(14): 2080-2087.
- [5] Qiu Zhenwei, Hong Jin, Li Shuang, *et al.* Methods to simultaneously achieve radiometric and polarimetric accuracy for multichannel ultra-wide-angle polarimetric camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0828003.  
裘桢伟, 洪 津, 李 双, 等. 多通道超广角偏振相机辐射精度和偏振精度的同时实现方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0828003.
- [6] Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.* System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828003.  
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828003.
- [7] Song Maoxin. The study on multi-angle polarimetric radiometer for airborne polarization remote sensing [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, 2012: 3-24.  
宋茂新. 用于航空偏振遥感的多角度偏振辐射计研究[D]. 合肥: 安徽光学精密机械研究所, 2012: 3-24.
- [8] Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Space optical remote sensor radiometric calibration theory and methods[M]. 1<sup>st</sup> Edition. Beijing: Science Press, 2013: 479-492.  
顾行发, 田国良, 余 涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2013: 479-492.
- [9] Chen Ligang. Study of laboratory calibration of the airborne polarization CCD camera with wide field of view [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, 2008: 26-35.  
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 安徽光学精密机械研究所, 2008: 26-35.
- [10] Cheng Tianhai, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Effect of surface reflectances on the space-based vector radiative detection [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7368-7375.  
程天海, 顾行发, 余 涛, 等. 地表双向反射对天基矢量辐射探测的影响分析[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7368-7375.
- [11] Miyakawa K, Adachi H, Inoue Y. Rotation of two-dimensional arrays of microparticles trapped by circularly polarized light[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(26): 5440-5442.
- [12] Travis L D. Earth observing scanning polarimeter EOS reference handbook[M]. NASA: Washington D C, 1995: 77-129.
- [13] Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobing, *et al.* Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1153-1158.  
宋茂新, 孙 斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1153-1158.
- [14] Wang Han, Sun Xiaobing, Sun Bin, *et al.* Evaluation of land surface polarization models based on airborne advanced atmosphere multi-angle polarization radiometer measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0128002.  
王 涵, 孙晓兵, 孙 斌, 等. 基于航空多角度偏振辐射计遥感数据评估陆地表面偏振反射模型[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0128002.
- [15] Qiu Zhenwei, Hong Jin. Retardance characteristics analysis of lens in polarization remote sensors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 806-811.  
裘桢伟, 洪 津. 偏振遥感器镜头相位延迟特性分析[J]. 红外激光工程, 2014, 43(3): 806-811.
- [16] Goldstein D. Polarized light: revised and expanded[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003: 49-78.
- [17] Barnes R A, Yeh E N, Eplee R E, *et al.* SeaWiFS calibration topics. Part 1: NASA technical memorandum 104566 [R]. SeaWiFS Technical Report Series, 1996, 39: 1-66.



- [18] James J B, Steven W B, Robert D S, *et al.* Radiometric measurement comparison on the integrating sphere source used to calibrate the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2003, 108(3): 199-227.
- [19] Li Cuili, Sun Xiaobing, Wang Han, *et al.* Accuracy analysis of simultaneous polarized measurement based on polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412004.  
李翠丽, 孙晓兵, 王 涵, 等. 基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析 [J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412004.
- [20] Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.* Calibration of rotating quarter-wave method based polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912005.  
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 旋转波片法偏振检测装置器件参数校准 [J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912005.
- [21] Yang Weifeng, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.* Optical design of spaceborne directional polarization camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822005.  
杨伟锋, 洪 津, 乔延利, 等. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0822005.
- [22] Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, *et al.* Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412003.  
康 晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0412003.
- [23] Ni Yucui. Practical evaluation of measurement uncertainty [M]. 4<sup>th</sup> Edition. Beijing: China Quality Press and China Standard Press, 2014: 254-255.  
倪育才. 实用测量不确定度评定 [M]. 4 版. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2014: 254-255.