

# 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统的标定

张海洋<sup>1,2</sup> 张军强<sup>1</sup> 杨 斌<sup>1,2</sup> 颜昌翔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间三部, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为满足偏振遥感系统对探测精度的要求,采用多线阵分焦平面型偏振探测系统分析了消光比对偏振探测精度的影响,并构建了偏振辐射传递模型。介绍了分焦平面型偏振仪器的结构,结合国内外微型偏振片的加工技术,采用多线阵微型偏振片替代微偏振片马赛克阵列的探测方法分析了金属线栅微偏振片消光比对偏振探测的影响,推导了光学系统及非理想偏振片的偏振传递矩阵,根据偏振辐射传递理论构建了偏振探测系统的校正模型。基于校正模型制定了相应的参数标定方案,为实验室偏振辐射标定提供了理论基础。模拟及实验结果表明,在受限于设备稳定性的情况下,系统探测精度可达到 0.5%,满足偏振探测精度要求。

**关键词** 遥感; 分焦平面; 微偏振片; 系统定标; 偏振辐射传递

中图分类号 O436.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1128003

## Calibration for Polarization Remote Sensing System with Focal Plane Divided by Multi-Linear Array

Zhang Haiyang<sup>1,2</sup> Zhang Junqiang<sup>1</sup> Yang Bin<sup>1,2</sup> Yan Changxiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *The Third Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

<sup>2</sup> *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** To meet the detection accuracy requirement of the polarization remote sensing system, a polarization detection system is used, whose focal plane is divided by multi-linear array polarizers. The effect of the extinction ratio on the polarization detection accuracy is analyzed, and a polarization radiation transfer model is constructed. The structure of the divided focal plane polarization instrument is introduced. By combining the micro-polarizer processing technologies both in China and abroad, a detection method is chosen, which uses the multi-linear micro-polarizers to replace the micro-polarizer mosaic array. The influence of the extinction ratio of the metal wire grating micro-polarizer on the detection accuracy is discussed. The polarization transfer matrices of the optical system and the non-ideal polarizer are derived. According to the polarization radiation transfer theory, a calibration model for the polarization detection system is constructed, and a corresponding parameter calibration scheme based on the calibration model is developed, which provides a theoretical basis for the polarizing radiation calibration in laboratory. The simulation and experimental results show that the detection accuracy of the system influenced by equipment stability is 0.5%, which can meet the accuracy requirement of the polarization detection.

**Key words** remote sensing; divided focal plane; micro-polarizer; system calibration; polarization radiation transfer

**OCIS codes** 280.5715; 260.2130; 290.5880; 280.4788

收稿日期: 2016-05-30; 收到修改稿日期: 2016-07-13

基金项目: 国家 863 计划(Y6241NI160)

作者简介: 张海洋(1988—),男,博士研究生,主要从事偏振遥感系统及定标技术方面的研究。

E-mail: haiyang8930@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: yancx@ciomp.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

偏振作为光波的基本属性,携带了丰富的目标信息<sup>[1-2]</sup>,在农业、军事<sup>[3]</sup>、资源环境等方面具有潜在的应用价值。目前,大部分偏振遥感探测设备均为第一代偏振探测系统,主要包括分时、分振幅、分孔径、分焦平面等类型<sup>[4]</sup>。分焦平面型偏振探测虽存在像元级配准误差<sup>[5]</sup>,但其对应系统具有结构紧凑、稳定性好等突出优点,广泛适用于偏振遥感探测和瞬时干涉测量<sup>[6]</sup>。

本文针对当前空间偏振遥感探测的特点,结合国内外微偏振片的加工技术,采用轻型多线阵分焦平面型偏振探测系统,分析了偏振片消光比对偏振探测的影响。针对空间偏振遥感中的离轴三反四线阵推扫式分焦平面型偏振探测系统<sup>[7]</sup>,基于偏振辐射传递理论建立了相应的系统校正模型并制定了参数标定方案,为偏振辐射标定提供了理论基础,对偏振遥感探测系统的研制具有重要作用。经模拟和实验验证,该方案在受限于光源稳定性的情况下,系统探测精度可达 0.5%。

# 2 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统

对于常见的马赛克阵列分焦平面型偏振仪器,如 Polar Cam 系列同步偏振相机(美国 4D Technology 公司)<sup>[8]</sup>,焦平面为面阵探测器加微偏振片马赛克阵列,微偏振片阵列中每 4 个像元组成一个超级像元,分别对应 0°、90°、45°、135°的 4 种偏振轴(偏振片透射率最大)取向。该阵列的典型示意图如图 1 所示。

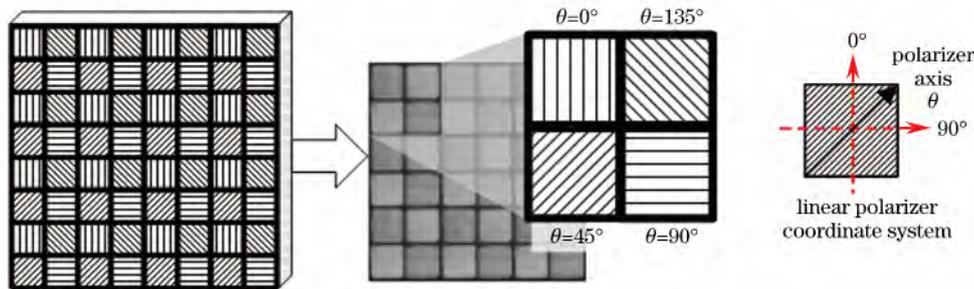


图 1 微偏振片马赛克阵列示意图

Fig. 1 Diagram of mosaic array of micro-polarizers

该结构虽然可以进行实时面阵成像,但存在以下缺点:1) 微偏振片马赛克阵列加工难度大、成本高;2) 马赛克阵列的各偏振单元需要与探测器像元严格配准,且实现大靶面的精确对准存在技术难度大、成本高等缺点;3) 一个超级像元内不同的偏振片单元在空间维存在像元级对准误差,需要后期算法校正<sup>[9]</sup>;4) 当马赛克阵列中各偏振片单元的有效通光面积大于探测器各像元的面积时,产生串扰,造成能量损失;5) 马赛克阵列中各偏振片单元的透射率、偏振方向等都存在一定差异,对系统定标要求较高。

针对无人机电或平流层飞艇的平台需求,采用离轴反射式望远系统实现能量采集,利用焦平面多条微型偏振片阵列实现偏振检偏,并在推扫模式下实现高信噪比偏振成像探测。这种多线阵分焦平面型实时偏振探测系统<sup>[7]</sup>不仅具有结构简单、易于装调、能量利用率高等优点,而且有效避免了马赛克阵列分焦平面型偏振测量系统的空间配准难度。该系统只需几条相互独立的微偏振片条带,不同条带对应不同的偏振片通光轴角度,系统示意图如图 2 所示。

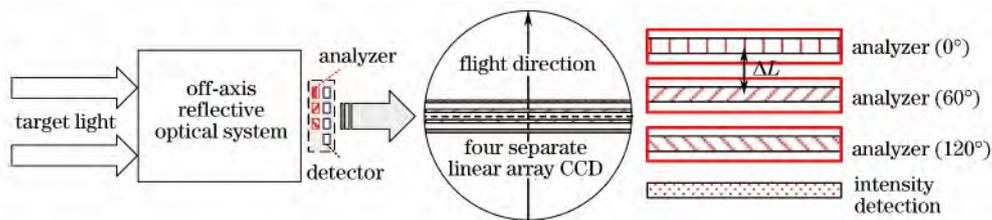


图 2 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统示意图

Fig. 2 Diagram of polarization remote sensing system with focal plane divided by multi-linear array

该系统采用离轴三反光学系统和四线阵 CCD,构成的多偏振通道近似实现实时探测。前 3 个线阵分别对应偏振轴取向分别为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  的 3 个偏振通道,得到目标的偏振度及偏振角信息;第 4 个线阵对应强度探测通道,得到目标的真实辐射强度。由 4 个线阵的探测结果可得到目标的斯托克斯矢量。4 个探测器沿轨道方向并行排列,各线阵间间隔不小于 20 个像元,且关于中心视场对称分布。当系统处于姿态稳定的运动平台上时,地物目标依次被各偏振通道探测,根据系统参数及平台运行速度,得到该分时测量的间隔为

$$\Delta t = 3\Delta LR_{\text{GSD}}/[a(\nu_1 - \nu_0)], \quad (1)$$

式中  $\Delta L$  为各线阵探测器之间的间隔,  $R_{\text{GSD}}$  为地面像元分辨率,  $a$  为像元尺寸,  $\nu_0$  为地球自转速度,  $\nu_1$  为平台运行速度(可通过平台参数实时得到)。以临近空间飞行器平台为例,计算得到该时间间隔为毫秒级。相对多通道偏振探测的分时间间隔,地面运动的目标测量可视为瞬时测量,不存在像元匹配误差的问题。

### 3 偏振片消光比对偏振探测精度的影响

多线阵分焦平面型偏振探测系统的偏振检偏元件为微型金属线栅偏振片,金属线栅偏振片的消光比相对传统偏振片有较大差距,通常不高于  $1/300$ ,因此消光比对偏振探测的影响不容忽视。

设  $t_x^2$ 、 $t_y^2$  分别为偏振片的最大和最小透射率<sup>[10]</sup>,  $\epsilon^2$  为偏振片的消光比( $\epsilon^2 = t_y^2/t_x^2$ ),  $\theta$  为偏振片的偏振轴取向,部分偏振光正入射线偏振片的示意图如图 3 所示。

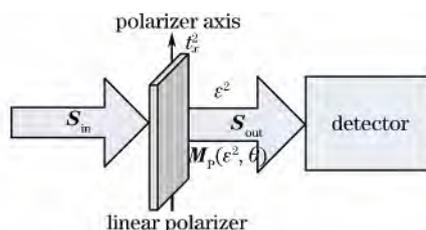


图 3 部分偏振光正入射线偏振片示意图

Fig. 3 Diagram of normal incidence of partially polarized light to linear polarizer

对于非理想偏振片,其穆勒矩阵可表示为

$$M_p(\epsilon^2, \theta) = \frac{t_x^2}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & (1 - \epsilon^2) \cos 2\theta & (1 - \epsilon^2) \sin 2\theta \\ (1 - \epsilon^2) \cos 2\theta & (1 - \epsilon^2) \cos^2 2\theta + 2\epsilon \sin^2 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta \\ (1 - \epsilon^2) \sin 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \sin^2 2\theta + 2\epsilon \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当不考虑成像系统的影响时,对于垂直入射到偏振片的目标光束(部分偏振光),其斯托克斯矢量为  $S_{\text{in}} = [I \quad Q \quad U]^T$ , 其中  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  为目标光束斯托克斯矢量中的 3 个参量,入射光的偏振度为  $P$ ,忽略圆偏振分量,入射的部分偏振光可表示为自然光与线偏振光的叠加。经偏振片出射的光线也可分为自然光、线偏振光经偏振片后出射光的叠加,因此只需测量两种出射光的斯托克斯矢量中光强分量的和即可得到偏振片出射的光强  $I_{\text{out}}$ ,可表示为

$$I_{\text{out},p} = \frac{t_x^2}{2} [(1 + \epsilon^2)I + (1 - \epsilon^2) \cos 2\theta Q + (1 - \epsilon^2) \sin 2\theta U]. \quad (3)$$

当采用通光轴角度为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  的偏振片组合进行偏振探测时,由多偏振角度测量斯托克斯矢量,得到出射光的斯托克斯矢量为

$$S_{\text{out},p} = \frac{t_x^2}{2} \begin{bmatrix} (1 + \epsilon^2)I \\ (1 - \epsilon^2)Q \\ (1 - \epsilon^2)U \end{bmatrix}. \quad (4)$$

测得出射光的偏振度  $P'$  及相对误差  $\delta$  分别为

$$P' = \frac{(1 - \epsilon^2) \sqrt{Q^2 + U^2}}{(1 + \epsilon^2)I} = \frac{1 - \epsilon^2}{1 + \epsilon^2} P, \quad \delta = \frac{2\epsilon^2}{1 + \epsilon^2} \times 100\%. \quad (5)$$

从(5)式可知,对于理想偏振片,消光比为  $1/\infty$ ,测得的偏振度即为真实偏振度。对于非理想偏振片,测

得的偏振度低于真实偏振度:当消光比为 1/100 时,相对误差为 2%;当消光比为 1/300 时,相对误差为 0.7%;当消光比为 1/10<sup>4</sup> 时,相对误差为 0.02%。由于(4)式中 Q、U 分量的系数相同,因此消光比对偏振相角的探测没有影响。典型地物目标的偏振度范围为 5%~10%,当消光比低于 1/300 时,产生较大的系统误差,需要得到消光比的数值以校正系统误差。

## 4 偏振探测系统校正及参数标定

### 4.1 系统校正模型

对于多通道偏振探测系统,可通过各偏振探测通道的强度关系反演得到偏振信息,系统本身的非均匀性会影响偏振探测结果。由菲涅耳定律可得,离轴反射光学系统各反射镜面产生了一定的起偏效应<sup>[11]</sup>,从而改变了入射光的偏振状态。当系统本身的非均匀性及起偏效应较大时,目标的偏振信息被系统效应掩盖,无法得到真实的偏振探测结果,因此偏振系统标定是仪器定量应用的前提和基础。

为满足遥感探测中高空间分辨率及大视场的需求,该系统采用离轴三反式光学系统,入射光线经 3 个离轴反射镜会聚于像面上,通过微型偏振片条带后被线阵探测器接收。每条线阵探测器穿轨方向上至少有 8000 个像元,由于视场角的影响,系统产生较大的非均匀性及起偏效应。起偏效应与各反射镜面的入射角度、镜面材料、镀膜材料均密切相关,在光学系统未加工装调完毕前,无法得到准确的系统参数。目前仅利用离轴三反式光学系统,在各镜面仅镀铝膜的情况下,使用 Code V 软件对无偏光入射光学系统后出瞳处的  $R_s$ 、 $R_p$  进行仿真分析( $R_s$ 、 $R_p$  为两个正交分量光强的反射率),该光学系统的设计模型及反射率仿真分析结果如图 4 所示。图中  $\epsilon_1$  为光学系统的起偏度,  $\epsilon_1 = (R_s - R_p) / (R_s + R_p)$ 。由仿真分析结果可知,系统起偏度约为 1.3%,且起偏度从中心视场至边缘视场逐渐增加,因此需要对系统进行标定。

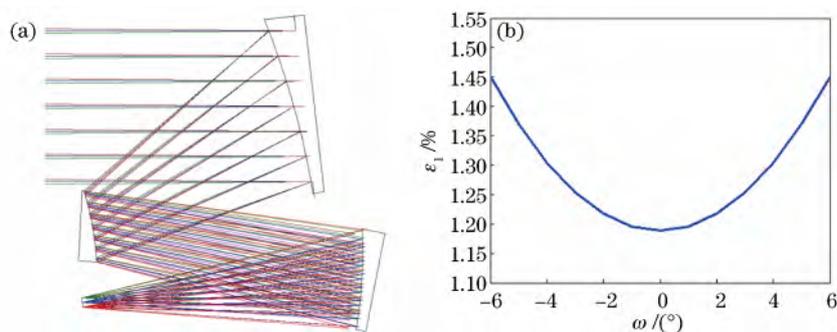


图 4 (a)光学系统设计模型;(b)反射率仿真分析结果(670 nm)

Fig. 4 (a) Design model of optical system ; (b) simulation analysis result of reflectivity (670 nm)

反射式光学系统的穆勒矩阵<sup>[12]</sup>形式(忽略圆偏振分量,下同)为

$$M_R(\omega, \varphi) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_s + R_p & R_s - R_p & 0 \\ R_s - R_p & R_s + R_p & 0 \\ 0 & 0 & -2\sqrt{R_s R_p} \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中( $\omega, \varphi$ )为光学系统两个方向的视场。起偏度可表示为

$$M_R(\epsilon_1, \omega, \varphi) = \frac{R_s + R_p}{2} \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_1 & 0 \\ \epsilon_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

光学系统中不同视场对应的起偏度和起偏角度各不相同,因此将上述穆勒矩阵两边分别与旋转矩阵<sup>[10]</sup>  $A(-\theta_1)$ 、 $A(\theta_1)$ 相乘( $\theta_1$ 为各视场点的起偏角度),得到反射式光学系统的穆勒矩阵为

$$M_R(\theta_1, \epsilon_1, \omega, \varphi) = \frac{R_s + R_p}{2} \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_1 \cos 2\theta_1 & \epsilon_1 \sin 2\theta_1 \\ \epsilon_1 \cos 2\theta_1 & \cos^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \sin^2 2\theta_1 & (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 \\ \epsilon_1 \sin 2\theta_1 & (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 & \sin^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \cos^2 2\theta_1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由于起偏度及起偏角度都与视场 $(\omega, \varphi)$ 有关,不同视场对应不同的像元坐标 $(i, j)$ ,因此每个像元都对应一个穆勒矩阵 $M_R(\theta_1, \epsilon_1, \omega, \varphi)_{i,j}$ 。

根据偏振辐射传递理论,系统入瞳处目标光束的斯托克斯矢量 $S_{in} = [I \ Q \ U]^T$ ,到达探测器的出射光的斯托克斯矢量 $S_{out} = M_P(\epsilon^2, \theta) \times M_R(\theta_1, \epsilon_1, \omega, \varphi) \times S_{in}$ ,偏振传递示意图如图5所示。

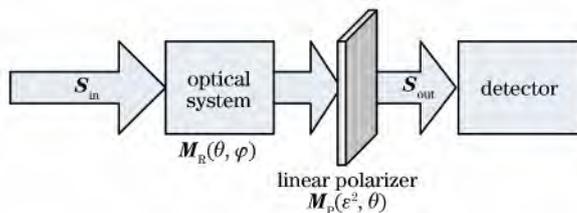


图5 偏振辐射传递示意图

Fig. 5 Diagram of polarization radiation transfer

令 $t_x^2(R_s + R_p) = t_{sys}^2$ ,  $t_{sys}^2$ 为系统透射率,将 $S_{out} = M_P(\epsilon^2, \theta) \times M_R(\theta_1, \epsilon_1, \omega, \varphi) \times S_{in}$ 展开后可得

$$S_{out} = \frac{t_{sys}^2}{4} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & (1 - \epsilon^2) \cos 2\theta & (1 - \epsilon^2) \sin 2\theta \\ (1 - \epsilon^2) \cos 2\theta & (1 - \epsilon^2)^2 \cos^2 2\theta + 2\epsilon \sin^2 2\theta & (1 - \epsilon^2)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta \\ (1 - \epsilon^2) \sin 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \sin^2 2\theta + 2\epsilon \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_1 \cos 2\theta_1 & \epsilon_1 \sin 2\theta_1 \\ \epsilon_1 \cos 2\theta_1 & \cos^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \sin^2 2\theta_1 & (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 \\ \epsilon_1 \sin 2\theta_1 & (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 & \sin^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \cos^2 2\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}. \quad (9)$$

探测器接收到的光强(即偏振片的出射光强)为

$$I_{out} = \frac{t_{sys}^2}{4} \{ (1 + \epsilon^2)(I + \epsilon_1 \cos 2\theta_1 Q + \epsilon_1 \sin 2\theta_1 U) +$$

$$(1 - \epsilon^2) \cos 2\theta [\epsilon_1 \cos 2\theta_1 I + (\cos^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \sin^2 2\theta_1) Q + (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 U] +$$

$$(1 - \epsilon^2) \sin 2\theta [\epsilon_1 \sin 2\theta_1 I + (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 Q + (\sin^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \cos^2 2\theta_1) U] \}. \quad (10)$$

由于该偏振探测系统采用 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  3种偏振角度组合,将对应角度 $\theta$ 代入(10)式,得到3个包含目标斯托克斯参量 $I, Q, U$ 的联立方程,求解方程组即可得到目标斯托克斯参量 $I, Q, U$ 以及目标的偏振度 $P_{target}$ 及偏振相角 $\sigma_{orient}$ :

$$I = \frac{4(I_{00} + I_{60} + I_{120})(1 - \epsilon^2) + 4\sqrt{3}\epsilon_1 \sin 2\theta_1 (I_{120} - I_{60}) + 6\epsilon_1 \cos 2\theta_1 (1 + \epsilon^2)(I_{60} + I_{120} - I_{00})}{3t_{sys}^2 (1 + \epsilon^2)(1 - \epsilon^2)(1 - \epsilon_1^2)},$$

$$Q =$$

$$\frac{4\epsilon_1 \cos 2\theta_1 \sqrt{1 - \epsilon_1^2} (1 - \epsilon^2)(I_{00} + I_{60} + I_{120}) + 6(1 + \epsilon^2)[\epsilon_1^2 - 1 - \cos^2 2\theta_1 (\epsilon_1^2 - 1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2})](I_{00} - I_{60} - I_{120})}{3t_{sys}^2 (1 + \epsilon^2)(\epsilon^2 - 1)(1 - \epsilon_1^2)^{3/2}} +$$

$$\frac{2\sqrt{3} \sin 4\theta_1 (1 + \epsilon^2)(\epsilon_1^2 - 1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2})(I_{120} - I_{60})}{3t_{sys}^2 (1 + \epsilon^2)(\epsilon^2 - 1)(1 - \epsilon_1^2)^{3/2}},$$

$$U = \frac{4\epsilon_1 \sin 2\theta_1 \sqrt{1 - \epsilon_1^2} (\epsilon^2 - 1)(I_{00} + I_{60} + I_{120}) + 3\sin 4\theta_1 (1 + \epsilon^2)(1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2})(I_{00} - I_{60} - I_{120})}{3t_{sys}^2 (1 + \epsilon^2)(1 - \epsilon^2)(1 - \epsilon_1^2)^{3/2}} +$$

$$\frac{4\sqrt{3}(1 + \epsilon^2)[\cos 2\theta_1 (1 - \epsilon_1^2) + \sin^2 2\theta_1 \sqrt{1 - \epsilon_1^2}](I_{60} - I_{120})}{3t_{sys}^2 (1 + \epsilon^2)(1 - \epsilon^2)(1 - \epsilon_1^2)^{3/2}},$$

$$P_{target} = \sqrt{(Q^2 + U^2)}/I^2, \quad \sigma_{orient} = \text{atan}(U/Q)/2, \quad (11)$$

式中 $I_{00}, I_{60}, I_{120}$ 分别为偏振轴取向为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 时对应的偏振探测通道的光强。(11)式即为该偏振探测系统目标偏振参量的校正模型,待定校正参数包括系统的起偏度 $\epsilon_1$ 、系统的起偏方向 $\theta_1$ 、系统的透射率 $t_{sys}^2$ 以及偏振片条带的消光比 $\epsilon^2$ 。多通道系统透射率的绝对值较难精确测量,为了降低参数标定的难度,该系统偏振探测通道仅需得到目标的偏振度 $P_{target}$ 和偏振相角 $\sigma_{orient}$ ,再结合强度探测通道得到目标的斯托克斯矢量,

即可得到该系统 3 个偏振探测通道中各像元的相对透射率  $\bar{t}_{\text{sys}}^2$ 。设强度探测通道得到目标的真实光强为  $I_1$ ，则目标的斯托克斯参量  $I'$ 、 $Q'$ 、 $U'$  可表示为

$$I' = I_1, \quad Q' = \frac{P_{\text{target}} I_1}{\sqrt{1 + \tan^2(2\sigma_{\text{orient}})}}, \quad U' = \frac{P_{\text{target}} I_1}{\sqrt{1 + \tan^2 2\sigma_{\text{orient}}}} \tan(2\sigma_{\text{orient}}). \quad (12)$$

利用上述校正模型,可得到目标真实的斯托克斯参量。由于采用分别探测偏振参数与强度参数的方法,系统校正参数的标定难度降低,测量精度提高。

#### 4.2 校正参数的标定

标定系统中采用偏振方向连续变化的线偏振光(光强不变)正入射偏振探测系统,通过分析出射光的光强,得到各个校正参数。标定系统示意图如图 6 所示。

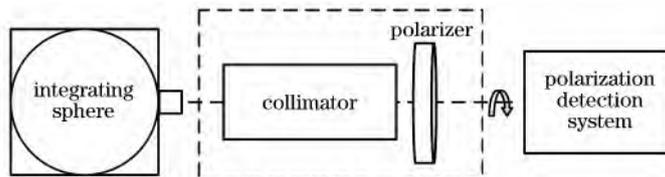


图 6 标定系统示意图

Fig. 6 Diagram of calibration system

设入射线偏振光的光强为  $I_0$ , 偏振方向  $\theta_0$ , 对应斯托克斯矢量  $S_{\text{in}} = I_0 [1 \quad \cos 2\theta_0 \quad \sin 2\theta_0]^T$ 。由(10)式可得,入射线偏振光经偏振探测系统后,出射光强  $I'_{\text{out}}(\theta_0, \theta)$  可表示为

$$I'_{\text{out}}(\theta_0, \theta) = \frac{t_{\text{sys}}^2 I_0}{8} \{ \epsilon^2 + \cos 2\theta_0 [\epsilon_1 \cos 2\theta_1 (1 + \epsilon^2) + \cos 2\theta (\cos^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \sin^2 2\theta_1) (1 - \epsilon^2)] + \cos 2\theta_1 \sin 2\theta \sin 2\theta_1 (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) (1 - \epsilon^2) + \sin 2\theta_0 [\epsilon_1 \sin 2\theta_1 (1 + \epsilon^2) + \sin 2\theta (\sin^2 2\theta_1 + \sqrt{1 - \epsilon_1^2} \cos^2 2\theta_1) (1 - \epsilon^2) + \cos 2\theta_1 \cos 2\theta \sin 2\theta_1 (1 - \sqrt{1 - \epsilon_1^2}) (1 - \epsilon^2)] + \epsilon_1 (1 - \epsilon^2) (\cos 2\theta \cos 2\theta_1 + \sin 2\theta \sin 2\theta_1) + 1 \}. \quad (13)$$

在探测器进行暗电流校正以及响应非均匀性校正后,每个偏振测量通道测得的像元亮度值(DN 值)均为接收光强的正比例函数,设 DN 值为  $N$ 。对于各个偏振探测通道的视场点,其 DN 值随入射线偏振光方向  $\theta_0$  变化的关系均符合(13)式的模型,利用该模型进行最小二乘法拟合,即可得到各像元对应的微偏振片消光比  $\epsilon^2$ 、离轴反射系统起偏度  $\epsilon_1$  以及离轴反射系统起偏角度  $\theta_1$ 。

由(13)式可知,各通道各像元的亮度值近似为一种余弦形式,拟合后可得到对应的振幅响应参数  $N'(i, j)$  [即表示  $t_{\text{sys}}^2 I_0(i, j)$ ], 其中  $i$  为偏振探测通道 ( $i=1, 2, 3$ ),  $j$  为线阵探测器的像元 ( $j=0$  对应中心像元)。因偏振探测通道未经辐射定标,该参数以亮度值为单位。由于入射到各偏振通道的线偏振光强度相同,利用(14)式即可得到偏振探测系统各像元相对于第一个偏振探测通道中心像元的透射率  $\bar{t}_{i,j}^2$  为

$$\bar{t}_{i,j}^2 = N'_{i,j} / N'_{1,0}. \quad (14)$$

强度探测通道的辐射定标可按分段线性拟合进行定标及非均匀性校正<sup>[13]</sup>,在此不再赘述。

在上述多线阵分焦平面型偏振探测系统的校正参数标定方案中,消光比、起偏度等参数均可由拟合模型直接得出,无须对偏振通道进行辐射定标及绝对透射率测量,其校正准确性较高。该系统可对非均匀性及起偏效应进行准确校正,得到目标真实的偏振信息,从而为偏振信息的定量化应用提供基础。

## 5 实验验证

实验中利用同轴反射式光学系统的偏瞳使用模拟离轴反射光学系统,并在后焦面放置旋转偏振片(检偏器)及探测器,构成离轴反射偏振探测系统。稳定光源先入射到积分球得到无偏光,再通过旋转偏振片(起偏器)得到不同方向的线偏光(光强不变),从而得到实验所需的线偏光。由于光源经积分球后能量分散,为保证较高的信噪比,需要能量密度高且光束口径小的入射光源,因此选用激光器(670 nm)作为入射光源。旋

转偏振片(起偏器)通过 Newport 精密旋转台控制,角度精度高于  $0.08^\circ$ 。由于受激光器波长、偏振片通光孔径及探测器像元数(单像元)的限制,仅标定某一视场点在波长为  $670\text{ nm}$  处的起偏度及起偏角度,以验证该标定方案。该标定系统装置图如图 7 所示。



图 7 标定系统装置图

Fig. 7 Setup of calibration system

实验过程:1) 调整激光器、积分球、线偏振片(起偏器)及探测器,使它们共轴;2) 测量经积分球后出射光的偏振性,测量精度须达到  $0.76\%$ ;3) 切入反射式偏振探测系统,检偏器角度固定(以  $0^\circ$  为例),将激光器、积分球、线偏振片(起偏器)整体平移至偏瞳位置;4) 控制 Newport 精密旋转台以带动起偏器每隔  $1^\circ$  旋转一次,连续变化  $340^\circ$  并同步采集到达探测器的光强;5) 每个偏振角度下采集 30 组数据,并取平均值;6) 移除起偏器,利用该离轴反射偏振探测系统测量此时积分球出射无偏光的偏振度。实验结果及模型拟合曲线如图 8 所示。

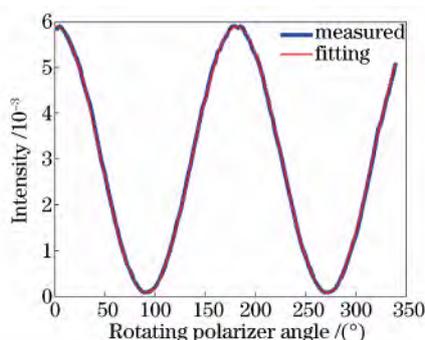


图 8 实验数据及模型拟合曲线

Fig. 8 Experimental data and model fitting curve

由拟合结果可知,该视场点在波长为  $670\text{ nm}$  处的起偏度为  $7.97\%$ ,起偏角度为  $36^\circ$ ,检偏器的消光比为  $1/200$ ,结合(11)式,得到校正后入射无偏光的偏振度为  $0.85\%$ 。

实验的测量精度受激光器的稳定性、积分球出射的无偏光偏振度、旋转线偏振片(起偏器)的消光比以及到达探测器的光强信噪比的限制。探测光强信噪比较高,起偏器的消光比高于  $1/300$ ,导致积分球出射无偏光的偏振性测量不确定度为  $0.4\%$ ,因此测量精度的限制因素仅为激光器的不稳定性。

由于受激光器波长宽度的限制,上述验证实验仅得到了模拟系统在  $670\text{ nm}$  波长处的起偏度。当采用高功率宽波段积分球光源作为无偏光源时,可得到所有波长共同作用下的起偏度。当入射光源的不稳定性低于  $0.05\%$  时(稳压电源控制的卤钨灯不稳定性低于  $0.01\%$ ),该校正方案得到的目标偏振度的不确定度低于  $0.1\%$ 。

## 6 结 论

针对偏振遥感探测的特点,选用了易于实现的多线阵分焦平面型实时偏振探测系统,分析了微偏振片消光比对测量精度的影响,构建了离轴三反四线阵偏振探测系统的校正模型,制定了相应的参数标定方案,修正了光学系统和偏振器件本身的非均匀性及起偏效应,得到了目标真实的偏振参数。该研究对偏振遥感探

测及目标反演具有重要意义。模拟及实验结果表明,该标定方案在受限于设备稳定性的情况下,测量精度可达到 0.5%,满足当前偏振探测精度的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Gao Ming, Song Chong, Gong Lei. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213002.  
高明, 宋冲, 巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213002.
- 2 Zhan Yonghong, Liu Qing, Yang Di, *et al.* Inversion of complex refractive index for rough-surface objects[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2178-2184.  
战永红, 刘卿, 杨迪, 等. 表面粗糙材质的复折射率反演[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2178-2184.
- 3 Cremer F, de Jong W, Schutte K. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines[J]. Optical Engineering, 2002, 41(5): 1021-1032.
- 4 Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, *et al.* Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3175-3182.  
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
- 5 Ratliff B M, LaCasse C F, Tyo J S. Interpolation strategies for reducing IFOV artifacts in microgrid polarimeter imagery [J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9112-9125.
- 6 Brock N J, Kimbrough B T, Millerd J E. A pixelated polarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements[C]. SPIE, 2011, 8160: 81600W.
- 7 Diner D J, Chipman R A, Beaudry N A, *et al.* An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space[C]. SPIE, 2005, 5659: 88-96.
- 8 4D, Technology. Polar cam snap shot micropolarizer cameras [EB/OL]. (2016-02-15)[2016-05-10]. <http://www.4dtechnology.com/products/polarcam.php>.
- 9 Tyo J S, LaCasse C F, Ratliff B M. Total elimination of sampling errors in polarization imagery obtained with integrated microgrid polarimeters[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3187-3189.
- 10 Liao Yanbiao. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 58.  
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 58.
- 11 Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jinsong. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 33-34.  
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 33-34.
- 12 Bass M. Handbook of optics [M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2009: 14, 21.
- 13 Thierry B D, Yves A, Laherrere J M, *et al.* Preflight calibration of the POLDER instrument [C]. SPIE, 1993, 2553: 218-231.