

文章编号 1004-924X(2012)06-1153-06

## 航空多角度偏振辐射计的偏振定标

宋茂新\*, 孙斌, 孙晓兵, 洪津

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心, 安徽合肥 230031)

**摘要:**研究了航空多角度偏振辐射计的辐射定标方法,以消除其自身引入的偏振效应,提高偏振辐射计的测量精度。首先,根据引入仪器偏振效应的主要因素推导了含定标系数的仪器探测方程,由仪器在 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 两个状态下对同一信号的探测方程求解了定标系数表达式,并设计了仪器分别处于两个状态下获取信号、求解定标系数的定标方法。最后,分别针对非偏振光源和完全线偏振光源的测试数据求解了所有的定标系数,使用可调偏振度光源验证了偏振定标结果。结果显示,该仪器偏振测量精度不低于 $0.5\%$ ,满足仪器精度指标要求。

**关键词:**偏振遥感仪器;多角度偏振辐射计;偏振定标;偏振光源

**中图分类号:**P415.34;P407.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1153

## Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer

SONG Mao-xin\*, SUN Bin, SUN Xiao-bing, HONG Jin

(Center for Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: smx0369@aiofm.ac.cn

**Abstract:** The polarization calibration of an airborne multi-angle polarimetric radiometer was researched to eliminate the polarization effects induced by itself and to improve its measurement accuracy. First, instrument detection equations with calibration coefficients were derived according to the main factors that have been induced into the instrumental polarization effects, and the expression of calibration coefficients was solved based on the detection equations for the same signal when the instrument was fixed at states of  $0^\circ$  and  $90^\circ$ . Then, the calibration method to get the signals of the two instrument states and to solve the calibration coefficients were designed. Finally, the polarization calibration coefficients were computed from the measured data using a non-polarized light source and a completely linearly polarized one, respectively, and the polarized calibration results were verified by adjusting the polarization degree of the incident light. The results indicate that the instrument can offer a polarized measurement accuracy better than  $0.5\%$ , which meets the requirements of the instrument polarimetry.

**Key words:** polarimetric remote sensing instrument; multi-angle polarimetric radiometer; polarization calibration; polarized light source

收稿日期:2012-03-19;修订日期:2012-04-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40971196)

## 1 引言

偏振是电磁波的重要特征之一,它与物质特性密切相关,是遥感需要获取的主要信息参数。目前,偏振遥感探测主要是通过辐射测量求取目标的斯托克斯矢量,斯托克斯矢量除了包含目标的辐亮度信息,还可以计算目标偏振度,偏振角等,从而为遥感信息解译提供更多维的数据源。由于偏振量是辐射分量的比值,所以保证测量时刻各辐射量的相对精度就可以获得较高的偏振解析精度。但对偏振探测仪器来说,由于光学元件的非理想性,光学膜层、入射光偏振度、入射光角度、仪器装配误差及安装应力等原因都会使仪器引入偏振效应,产生虚假偏振信息,从而制约了偏振遥感技术的应用。因此,为消除偏振仪器自身偏振效应的影响,需要对仪器进行偏振定标。

偏振定标国际上尚未定义<sup>[6]</sup>,相对偏振探测过程来说,偏振定标可认为是在输入已知偏振信息的信号源后,根据仪器的输出求解仪器的探测矩阵。法国 POLDER 和美国 APS 是国际上典型的偏振遥感仪器<sup>[2,4-5]</sup>,其偏振定标都是根据仪器特点,考虑引入偏振效应的主要因素,分析出探测器的探测量与入射光斯托克斯分量的数学方程,做一定的假设近似后得到仪器的探测矩阵,进而通过定标求取仪器探测矩阵中的未知参数。国内中科院安徽光机所陈立刚对偏振相机的定标也进行了一定的理论研究<sup>[7]</sup>。由于 POLDER 与 APS 探测系统中的光学器件都可近似为理想器件,仪器的探测矩阵可解析表达,因此根据仪器探测矩阵中未知系数的位置和关系便可大大降低偏振定标的难度。但如果光学系统中含有非理想光学器件或者器件的探测矩阵未知,便无法解析表达仪器的探测矩阵,这就需要输入不同的偏振信号源,直到可求解仪器的探测矩阵。

本文研究了航空多角度偏振辐射计的标定方法,由于探测系统具有小视场单元探测的特点,所有光学器件都可认为是理想器件,而引入虚假偏振信息的主要来源是装配误差及安装应力,所以进行偏振定标时首先推导出考虑非理想因素的仪器探测矩阵,然后根据未知系数的特点设计定标方案。

## 2 仪器原理介绍

多角度偏振辐射计的光学原理如图 1 所示,第一面反射镜需按图旋转  $90^\circ$ ,实际系统还有与 A, A' 类似的两对通道 B, B' 及 C, C' 被省略。以一对通道 A, A' 为例,目标信号通过正交镜组进入相同的光学系统,每路信号经前置望远镜和渥拉斯顿棱镜后被分成振动方向互成  $90^\circ$  的两束线偏振光,分色片分束后通过聚焦透镜和滤光片被二元探测器接收, A, A' 光路中的渥拉斯顿棱镜相对仪器坐标的理想方位角分别为  $0^\circ$  和  $45^\circ$ ,以产生  $0, 90, 45, 135^\circ$  4 个振动方向的线偏振分量。航空多角度偏振辐射计 B, B' 通道中装有两片分色片,可进行两个波段的探测, C, C' 只探测一个波段,波段与通道的对应关系见表 1。

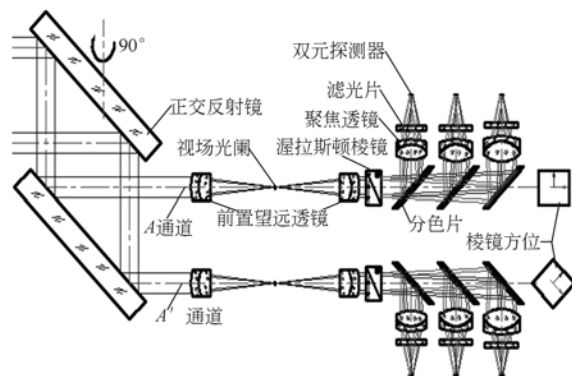


图 1 多角度偏振辐射计的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-angle polarization radiometer

## 3 仪器探测矩阵的推导

多角度偏振辐射计在偏振解析前的光学器件只有正交镜与望远镜,仪器在  $\pm 0.5^\circ$  视场可认为正交镜组理想消偏,望远镜不产生偏振效应,正交镜组的正交角度误差也很容易控制在可使偏振效应消失的范围<sup>[10]</sup>,只考虑透镜安装应力及棱镜方位误差所引起的仪器探测矩阵的非理想性,将有应力的望远镜等效为有一定相位延迟的直线位相器,两块渥拉斯顿棱镜相当于 4 个不同方

位角的直线偏振器。以仪器坐标系为参照坐标系,一对通道中的两块渥拉斯顿棱镜的理想方位角偏差假设为  $\epsilon_1, \epsilon_2$ , 则 4 个偏振器的方位角分别为:  $0^\circ + \epsilon_1, 90^\circ + \epsilon_1, 45^\circ + \epsilon_2, 135^\circ + \epsilon_2$ 。假设正交镜, 位相器, 偏振器的米勒矩阵分别为  $\mathbf{M}_m, \mathbf{M}_r, \mathbf{M}_p$ , 偏振器的方位角用  $\theta_p$  表示, 位相器与偏振器存在方位夹角  $\theta_r$ , 正交镜与位相器存在方位夹角  $\theta_m$ , 入射光的斯托克斯矢量  $\mathbf{S} = [I \ Q \ U \ V]'$ , 不考虑探测器的偏振敏感性, 经偏振器解析到达探测器的斯托克斯矢量  $\mathbf{S}_d$  可表示为:

$$\mathbf{S}_d(\theta_p) = \mathbf{M}_p(\theta_p) \cdot [T(\theta_r) \cdot \mathbf{M}_r \cdot T(-\theta_r)] \cdot [T(\theta_m) \cdot \mathbf{M}_m \cdot T(-\theta_m)] \cdot \mathbf{S} \quad (1)$$

根据文献[4]的计算结果, 可得到 4 个方位角偏振器解析出的斯托克斯矢量, 因为探测器只探测强度分量, 设 4 个强度分量分别为  $I_{0+\epsilon_1}, I_{90+\epsilon_1}, I_{45+\epsilon_2}, I_{135+\epsilon_2}$ , 进一步运算得:

$$I_{0+\epsilon_1} + I_{90+\epsilon_1} = I[1 + p_{\text{inst}} p \cos(2\chi_{\text{inst}} - 2\chi)] \quad (2)$$

$$\frac{I_{0+\epsilon_1} - I_{90+\epsilon_1}}{I_{0+\epsilon_1} + I_{90+\epsilon_1}} \cdot \alpha_1 \cdot \xi(p) = (\cos 2\epsilon_1 \cdot q_{\text{inst}} + \sin 2\epsilon_1 \cdot u_{\text{inst}}) - (\cos 2\epsilon_1 \cdot q + \sin 2\epsilon_1 \cdot u) \quad (3)$$

$$\frac{I_{45+\epsilon_2} - I_{135+\epsilon_2}}{I_{45+\epsilon_2} + I_{135+\epsilon_2}} \cdot \alpha_2 \cdot \xi(p) = (\cos 2\epsilon_2 \cdot u_{\text{inst}} -$$

$$\begin{bmatrix} q \\ u \end{bmatrix} = \frac{-1}{\cos(2\epsilon_1 - 2\epsilon_2)} \begin{bmatrix} \cos 2\epsilon_2 & -\sin 2\epsilon_1 \\ \sin 2\epsilon_2 & \cos 2\epsilon_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{S_0 - K_1 S_{90}}{S_0 + K_1 S_{90}} \cdot \alpha_1 \cdot \xi(p) - (\cos 2\epsilon_1 \cdot q_{\text{inst}} + \sin 2\epsilon_1 \cdot u_{\text{inst}}) \\ \frac{S_{45} - K_2 S_{135}}{S_{45} + K_2 S_{135}} \cdot \alpha_2 \cdot \xi(p) - (\cos 2\epsilon_2 \cdot u_{\text{inst}} - \sin 2\epsilon_2 \cdot q_{\text{inst}}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 4 仪器的定标

由公式(6)可知, 要求解目标偏振信息  $q, u$ , 未知系数包括与增益相关的  $K_1, K_2$ , 以及  $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}, \alpha_1, \alpha_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ , 而  $C_{12}, C_0$  对偏振解析无影响。实验室偏振定标的目的便是求解除  $C_0$  外的未知系数, 定标步骤和结果如下:

#### 4.1 $\alpha_1, \alpha_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ 的测定

以上 4 个系数与仪器加工装调参数相关, 定标前测得。由于渥拉斯顿棱镜的材质是方解石晶体, 生产工艺稳定, 未对所有波段做测试, 根据 633 nm 波段抽样测试, 消光系数大于  $10^3$ , 所以

$$\alpha_1 = \frac{\epsilon_1 + 1}{\epsilon_1 - 1} \approx 1.002, \alpha_2 = \frac{\epsilon_2 + 1}{\epsilon_2 - 1} \approx 1.002。 \epsilon_1, \epsilon_2$$

在装配中测得, 各通道棱镜相对仪器坐标的方位误

$$\sin 2\epsilon_2 \cdot q_{\text{inst}}) + (\sin 2\epsilon_2 \cdot q - \cos 2\epsilon_1 \cdot u) \quad (4)$$

式中  $u = \frac{U}{I}, q = \frac{Q}{I}, p = \sqrt{q^2 + u^2}, \tan(2\chi) = u/q,$

$p_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}, q_{\text{inst}}, \chi_{\text{inst}}$  是仪器自身引入的偏振量, 满足相同的归一化关系式,  $\alpha_1 = \frac{\epsilon_1 + 1}{\epsilon_1 - 1}, \alpha_2 = \frac{\epsilon_2 + 1}{\epsilon_2 - 1}, \epsilon_1, \epsilon_2$  是两块棱镜的消光系数,  $\xi(p) = 1 + p_{\text{inst}} p \cos(2\chi_{\text{inst}} - 2\chi)。$

设  $S_0, S_{90}, S_{45}, S_{135}$  分别代表探测同一波段  $I_{0+\epsilon_1}, I_{90+\epsilon_1}, I_{45+\epsilon_2}, I_{135+\epsilon_2}$  分量的探测器 DN 值;  $K_1$  是传递  $I_{0+\epsilon_1}, I_{90+\epsilon_1}$  的系统增益比, 即入射光为非偏振光或圆偏振光时,  $S_0, S_{90}$  探测器的 DN 值之比;  $K_2$  是传递  $I_{45+\epsilon_2}, I_{135+\epsilon_2}$  的系统增益比;  $C_{12}$  是成对通道间的系统增益比;  $C_0$  是绝对辐射定标系数。4 路光强与 4 路 DN 值的关系<sup>[2]</sup>分别为:

$$\begin{aligned} I_{0+\epsilon_1} &= C_0 S_0 \\ I_{90+\epsilon_1} &= C_0 K_1 S_{90} \\ I_{45+\epsilon_2} &= C_0 C_{12} S_{45} \\ I_{135+\epsilon_2} &= C_0 C_{12} S_{135} \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)、(4)求解关于目标信号偏振量  $q, u$  的方程, 并表示成矩阵形式:

差和对应波段如表 1。

表 1 各通道对应波段及棱镜误差

Tab. 1 Corresponding wave bands and prism errors of each channel

| 通道 | 波段/nm       | 绝对误差/(°)     |       |
|----|-------------|--------------|-------|
| A  | 490 665 960 | $\epsilon_1$ | 0.485 |
| A' | 490 665 960 | $\epsilon_2$ | 0.555 |
| B  | 555 865     | $\epsilon_1$ | 0.545 |
| B' | 555 865     | $\epsilon_2$ | 0.465 |
| C  | 1 640       | $\epsilon_1$ | 0.495 |
| C' | 1 640       | $\epsilon_2$ | 0.465 |

#### 4.2 $K_1, K_2$ 的定标

当仪器和测试景物偏振度很低时,  $\xi(p) = 1 +$

$p_{\text{inst}} p \cos(2\chi_{\text{inst}} - 2\chi) \approx 1$ , 将  $\alpha_1, \alpha_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$  系数代入式(3)、(4)得:

$$\frac{S_0 - K_1 \cdot S_{90}}{S_0 + K_1 \cdot S_{90}} \approx (q_{\text{inst}} + 0.008 \cdot u_{\text{inst}}) - (q + 0.008 \cdot u) \approx q_{\text{inst}} - q, \quad (7)$$

$$\frac{S_{15} - K_2 \cdot S_{135}}{S_{15} + K_2 \cdot S_{135}} \approx (u_{\text{inst}} - 0.008 \cdot q_{\text{inst}}) + (0.008 \cdot q - u) \approx u_{\text{inst}} - u. \quad (8)$$

当仪器沿光轴转动  $90^\circ$  时, 入射斯托克斯矢量相对仪器坐标系变为:  $\mathbf{S} = [I - Q - U \ V]'$ , 按照同样推导方法可得:

$$\frac{S_0' - K_1 \cdot S_{90}'}{S_0' + K_1 \cdot S_{90}'} \approx (q_{\text{inst}} + 0.03 \cdot u_{\text{inst}}) + (q + 0.03 \cdot u) \approx q_{\text{inst}} + q, \quad (9)$$

$$\frac{S_{15}' - K_2 \cdot S_{135}'}{S_{15}' + K_2 \cdot S_{135}'} \approx (u_{\text{inst}} - 0.03 \cdot q_{\text{inst}}) - (0.03 \cdot q - u) \approx u_{\text{inst}} + u. \quad (10)$$

根据式(7)、(8)、(9)、(10) 可得

$$\frac{1}{2} \frac{S_0 S_0' - K_1^2 S_{90} S_{90}'}{S_0 S_0' + K_1^2 S_{90} S_{90}'} = \frac{q}{1 + (q^2 - q_{\text{inst}}^2)}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} \frac{S_{15} S_{15}' - K_2^2 S_{135} S_{135}'}{S_{15} S_{15}' + K_2^2 S_{135} S_{135}'} = \frac{u}{1 + (u^2 - u_{\text{inst}}^2)}. \quad (12)$$

当测量偏振度极低的光源, 即  $q \approx 0, u \approx 0$  并假设  $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$  很小时, 由式(11)、(12)可得:

$$K_1 \approx \sqrt{\frac{S_0 \cdot S_0'}{S_{90} \cdot S_{90}'}}, \quad (13)$$

$$K_2 \approx \sqrt{\frac{S_{15} \cdot S_{15}'}{S_{135} \cdot S_{135}'}}. \quad (14)$$

定标光源采用了内径 1 m, 出光口径 20 cm, 偏振度低于 0.1% 的积分球, 将仪器正对积分球口, 入瞳距离积分球口约 1.3 m, 保证仪器六路视场完全处于积分球均匀出光口径内, 使仪器处于正常探测状态, 设为 0 态, 然后将仪器沿入射光轴翻转  $90^\circ$ , 记为 90 态, 测得数据代入式(13)(14), 得  $K_1, K_2$ , 结果如表 2 所示。

表 2  $K_1, K_2$  的定标结果

Tab. 2 Calibration results of  $K_1$  and  $K_2$

| 波段/nm | $K_1$     | $K_2$     |
|-------|-----------|-----------|
| 490   | 1.034 049 | 1.076 853 |
| 555   | 1.001 792 | 0.976 677 |
| 665   | 0.988 625 | 0.956 917 |
| 865   | 1.103 570 | 0.993 130 |
| 960   | 0.749 334 | 0.944 635 |
| 1 640 | 1.344 282 | 0.682 795 |

### 4.3 $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$ 的定标

当测量完全线偏振光, 处理式(7)、(8)、(9), (10)可求得:

$$q_{\text{inst}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{S_0 - K_1 \cdot S_{90}}{S_0 + K_1 \cdot S_{90}} + \frac{S_0' - K_1 \cdot S_{90}'}{S_0' + K_1 \cdot S_{90}'} \right], \quad (15)$$

$$u_{\text{inst}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{S_{15} - K_2 \cdot S_{135}}{S_{15} + K_2 \cdot S_{135}} + \frac{S_{15}' - K_2 \cdot S_{135}'}{S_{15}' + K_2 \cdot S_{135}'} \right]. \quad (16)$$

定标光源采用积分球光通过消光比高于  $10^4$  的偏振片产生的线偏振光, 由于偏振片口径不能同时覆盖一对通道, 使用二维平移台移动偏振片分别进行测量, 并用高精度的电旋转台旋转偏振片代替仪器自身的旋转, 忽略光源的不稳定误差, 测得数据代入式(15)(16), 结果如表 3 所示。

表 3  $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$  的定标结果

Tab. 3 Calibration results of  $q_{\text{inst}}$  and  $u_{\text{inst}}$

| 波段/nm | $q_{\text{inst}}$ | $u_{\text{inst}}$ |
|-------|-------------------|-------------------|
| 490   | 0.000 663         | -0.003 76         |
| 555   | 0.001 408         | -0.002 53         |
| 665   | -0.000 074        | -0.000 96         |
| 865   | -0.000 001        | -0.001 00         |
| 960   | -0.001 770        | -0.003 25         |
| 1 640 | -0.000 200        | 0.000 177         |

### 4.4 $C_{12}$ 的定标

根据式(5)得:

$$C_{12} = \frac{S_0 + K_1 \cdot S_{90}}{S_{15} + K_2 \cdot S_{135}}, \quad (17)$$

利用定标  $K_1, K_2$  的测试数据计算  $C_{12}$ 。

表 4  $C_{12}$  的定标结果

Tab. 4 Calibration results of  $C_{12}$

| 波段/nm | $C_{12}$    |
|-------|-------------|
| 490   | 1.014 281 9 |
| 555   | 1.141 143 0 |
| 665   | 1.028 181 0 |
| 865   | 1.109 242 0 |
| 960   | 0.878 163 0 |
| 1 640 | 1.457 275 0 |

### 4.4 偏振精度验证

通过测量偏振度可调的偏振光源验证了仪器的偏振测量精度。偏振光源的原理是利用自然光

通过玻片堆产生偏振光,通过转动波片堆改变入射光角度,从而产生不同偏振度的线偏振光<sup>[11]</sup>。因为波片堆角度控制精度优于  $0.5^\circ$ ,由此带来的最大偏振度误差,仪器测量值及测量误差见表 5。

表 5 偏振测量误差

Tab. 5 Measurement errors of polarization

| 玻片堆<br>入射角<br>/ $^\circ$ | 490 nm           |           |           | 555 nm           |           |           | 665 nm           |           |           |
|--------------------------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
|                          | 理论值<br>(%)       | 测值<br>(%) | 误差<br>(%) | 理论值<br>(%)       | 测值<br>(%) | 误差<br>(%) | 理论值<br>(%)       | 测值<br>(%) | 误差<br>(%) |
| 0                        | $0 \pm 0.0017$   | 0.16      | 0.16      | $0 \pm 0.0017$   | 0.34      | 0.34      | $0 \pm 0.0017$   | 0.06      | 0.06      |
| 10                       | $0.70 \pm 0.067$ | 1.27      | 0.57      | $0.69 \pm 0.07$  | 0.87      | 0.18      | $0.68 \pm 0.073$ | 0.61      | -0.07     |
| 20                       | $2.88 \pm 0.15$  | 2.99      | 0.11      | $2.85 \pm 0.16$  | 2.92      | 0.07      | $2.82 \pm 0.16$  | 2.67      | -0.15     |
| 30                       | $6.86 \pm 0.26$  | 6.70      | -0.16     | $6.80 \pm 0.26$  | 6.72      | -0.08     | $6.73 \pm 0.26$  | 6.48      | -0.25     |
| 40                       | $13.17 \pm 0.40$ | 12.77     | -0.40     | $13.06 \pm 0.40$ | 12.80     | -0.26     | $12.93 \pm 0.40$ | 12.49     | -0.44     |
| 50                       | $22.52 \pm 0.58$ | 21.71     | -0.81     | $22.34 \pm 0.58$ | 21.81     | -0.53     | $22.15 \pm 0.57$ | 21.44     | -0.71     |
| 60                       | $35.33 \pm 0.75$ | 34.16     | -1.17     | $35.09 \pm 0.75$ | 34.12     | -0.97     | $34.82 \pm 0.74$ | 33.82     | -1.02     |
| 65                       | $42.80 \pm 0.78$ | 41.44     | -1.36     | $42.52 \pm 0.79$ | 41.53     | -0.99     | $42.21 \pm 0.8$  | 41.23     | -0.98     |

| 玻片堆<br>入射角<br>/ $^\circ$ | 865 nm           |           |           | 960 nm           |           |           | 1 640 nm         |           |           |
|--------------------------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
|                          | 理论值<br>(%)       | 测值<br>(%) | 误差<br>(%) | 理论值<br>(%)       | 测值<br>(%) | 误差<br>(%) | 理论值<br>(%)       | 测值<br>(%) | 误差<br>(%) |
| 0                        | $0 \pm 0.0016$   | 0.09      | 0.09      | $0 \pm 0.0016$   | 0.37      | 0.37      | $0 \pm 0.0016$   | 0.12      | 0.12      |
| 10                       | $0.67 \pm 0.07$  | 0.63      | -0.04     | $0.67 \pm 0.07$  | 0.52      | -0.15     | $0.66 \pm 0.07$  | 0.48      | -0.18     |
| 20                       | $2.79 \pm 0.15$  | 2.65      | -0.14     | $2.79 \pm 0.14$  | 2.42      | -0.37     | $2.73 \pm 0.14$  | 2.47      | -0.26     |
| 30                       | $6.66 \pm 0.25$  | 6.42      | -0.24     | $6.64 \pm 0.24$  | 6.2       | -0.44     | $6.51 \pm 0.24$  | 6.08      | -0.43     |
| 40                       | $12.8 \pm 0.40$  | 12.37     | -0.43     | $12.78 \pm 0.37$ | 12.21     | -0.57     | $12.52 \pm 0.37$ | 12.01     | -0.51     |
| 50                       | $21.94 \pm 0.57$ | 21.19     | -0.75     | $21.9 \pm 0.53$  | 21.05     | -0.85     | $21.49 \pm 0.53$ | 20.75     | -0.74     |
| 60                       | $34.53 \pm 0.74$ | 33.61     | -0.92     | $34.48 \pm 0.69$ | 33.4      | -1.08     | $33.9 \pm 0.69$  | 32.84     | -1.06     |
| 65                       | $41.89 \pm 0.79$ | 40.91     | -0.98     | $41.84 \pm 0.73$ | 40.78     | -1.06     | $41.2 \pm 0.73$  | 40.15     | -1.05     |

由测量数据可看出,考虑到光源精度因素,多角度偏振辐射计的偏振测量精度在目标偏振度低于 0.2 的条件下,测量误差低于 0.5%。相对而言,短波 490 nm 的偏振测量精度偏低,与国外的结果类似,具体原因需要进一步分析。此外,随被测目标偏振度的提高,偏振误差增大,也与国外的结论相符<sup>[2-4]</sup>。

## 5 结 论

本文对航空多角度偏振辐射计进行了标定实验,求解了相关的定标系数,验证了偏振定标结

果。实验显示,偏振辐射计自身的偏振效应很低,说明仪器的装配精度良好,探测原理和探测方法选择合理。由偏振精度验证可知,仪器的偏振定标有效,在入射光偏振度低于 20% 时,精度可认为高于 0.5%。

文中的定标是在仪器扫描角度为  $0^\circ$  下完成的,由于装配误差导致的正交镜旋转轴与后继光学系统的光轴不平行以及扫描反射镜的膜层一致性问题,会导致定标系数随扫描角度的变化而不同,所以还需要做不同扫描角度下的响应测试以做进一步的判断。

## 参考文献:

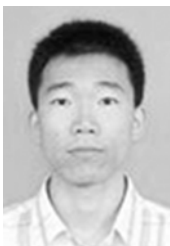
[1] TRAVIS L D. *Earth Observing Scanning Polarimeter EOS Reference Handbook*[M]. NASA, Wash-

ington DC, 1995:77-129.

[2] CAIRNS B, EDGAR E, RUSSEL L, *et al.*. The research scanning polarimeter: calibration and ground-based measurements [J]. SPIE, 1999, 3754:

- 186-196.
- [3] RICHARD J, NARDELL P C, CAIRNS B, *et al.*. Aerosol Polarimetry Sensor for the Glory Mission [J]. *SPIE*, 2007, 6786: 67865L-1-L-17.
- [4] GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. Aerosol polarimetry sensor calibration [R]. *Glory Project*, 2010.
- [5] THIERRY B D, YVES A, LAHERRERE J M, *et al.*. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [J]. *SPIE*, 1993, 2553: 218-231.
- [6] 顾行发, 陈兴峰, 程天海. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标 [J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 070702-1-070702-8.  
GU X F, CHEN X F, CHENG T H. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(7): 070702-1-070702-8. (in Chinese)
- [7] 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 偏振相机的光学定标方案研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 126-231.  
CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, *et al.*. Calibration method for polarization camera [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 126-231. (in Chinese)
- [8] 陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 非理想正交反射镜消偏性能的模拟研究 [J]. *应用光学*, 2008, 29(4): 633-638.  
CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, *et al.*. Simulation study on depolarization for imperfect orthogonal mirrors [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(4): 633-638. (in Chinese)
- [9] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度 [J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(5): 822-827.  
LI Y P, YU B X, WANG Y P. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-827. (in Chinese)
- [10] 陈立刚, 洪津, 乔延利. 一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2384-2387.  
CHEN L G, HONG J, QIAO Y L. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2384-2387. (in Chinese)
- [11] LABORATOIRE D'OPTIQUE ATMOSPHERIQUE-Universite des Sciences et Technologies de Lille. Polarizing Box Polbox User's Guide [R]. 1998.
- [12] 廖廷彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003, 45-63.  
LIAO T B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 45-63. (in Chinese)

#### 作者简介:



孙 斌(1987—),男,山东济南人,博士研究生,2009年于哈尔滨工业大学(威海)获得学士学位,主要从事偏振光学遥感的研究。E-mail: sunbin09@mail.ustc.edu.cn



孙晓兵(1966—),男,安徽巢湖人,博士,研究员,2005年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事目标/背景遥感特征表征技术、光学偏振遥感技术的研究。E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn



宋茂新(1983—),男,山东乳山人,博士研究生,2007年于山东大学获得学士学位,主要从事高光谱遥感方面的研究。E-mail: smx0369@aiofm.ac.cn

#### 导师简介:



洪 津(1969—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得工学学士学位,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn