

文章编号 1004-924X(2017)05-1126-09

多通道型偏振成像仪的偏振定标

杨 斌^{1,2}, 颜昌翔¹, 张军强^{1*}, 鞠学平^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了解决多通道型偏振成像仪的偏振定标问题,提出了一种基于积分球无偏光源的偏振定标方法。通过研究偏振光束与光学器件的相互作用,推导出多通道型偏振成像仪的矢量辐射传输模型,确定了需要标定的参数。运用无偏光源标定系统的偏振效应,基于矢量辐射传输模型对中心视场绝对辐射定标系数、光学镜头起偏度和系统低频相对透过率等关键参数进行了标定,通过分析标定结果求解了系统全视场的穆勒矩阵。最后,使用可调偏振度光源验证了仪器典型视场的偏振定标精度。研究表明,基于无偏光源的偏振定标方法可以有效提高多通道型偏振成像仪的偏振定标效率;经偏振定标后仪器在目标偏振度低于 20% 时的偏振测量误差小于 1%,满足大气气溶胶测量精度的要求。

关键词:偏振定标;偏振成像仪;多通道;穆勒矩阵;偏振效应

中图分类号:P415.34;TP706 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1126

Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager

YANG Bin^{1,2}, YAN Chang-xiang¹, ZHANG Jun-qiang^{1*}, JU Xue-ping^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zjq1981_81@163.com

Abstract: A polarimetric calibration method based on non-polarized light source was proposed to solve the problem of polarimetric calibration of the multi-channel polarimetric imager. Through the study of the interaction between polarized beam and optics, the vector radiative transfer model of multi-channel polarimetric imager was deduced and the calibrated parameters were determined. The key parameters such as absolute radiometric calibration coefficients of center viewing field, polarization degree of optical lenses and relative transmittance with system low frequency were calibrated based on the vector radiative transfer model by application of polarimetric effects of the system with non-polarized light source. By analyzing the calibration result, the Mueller matrix of full field of view was solved. Furthermore, the accuracy of polarimetric calibration on typical field of view was verified with a light source with variable polarization degrees. The results show that the polarimetric calibration method based on non-polarized light source can effectively improve the polarization calibration efficiency of

收稿日期:2016-06-16;修订日期:2016-09-02.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A103);国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61505199)

multi-channel polarimetric imager with the measured error of polarization less than 1% and the target degree of polarization less than 20%, thus meeting the requirements of measurement accuracy of atmospheric aerosol.

Key words: polarimetric calibration; polarimetric imager; multi-channel; Mueller matrix; polarimetric effect

1 引 言

偏振是电磁波的矢量特性,它提供独立于强度与光谱的信息。与物质相互作用时电磁辐射的偏振态发生改变,偏振遥感通过测量该变化实现目标特性的反演^[1-3]。相比于传统遥感,偏振遥感获取的信息量大大增加,因此在大气探测、目标识别及环境监测等领域具有重要价值^[4]。

偏振成像仪作为偏振遥感的主要仪器之一,必须保证足够的偏振探测精度,才能使偏振遥感具有实际应用意义。然而,偏振成像仪内部的光学表面会改变入射光的偏振态,这严重影响了仪器的偏振探测精度^[5]。为消除仪器的偏振效应,必须对偏振成像仪进行高精度的偏振定标。偏振定标即是标定系统中影响矢量辐射传输的物理参数,获取系统的穆勒矩阵,无论是在定标理论还是在工程实现方面,它都比传统辐射定标要复杂和困难很多。针对偏振定标问题,法国空研中心研发了POLDER,研究了大视场偏振成像仪的偏振定标,通过建立仪器的探测矩阵标定出探测矩阵中的未知参数,完成了系统偏振效应的量化描述^[6-7]。在国内,陈立刚等对宽视场航空偏振成像仪开展了偏振定标理论研究,为该类仪器的研制奠定了基础^[8]。顾行发等研究了机载多角度偏振相机的定标方法,基于偏振相机辐射模型,初步实现了偏振相机的在轨定标^[9-10]。然而,上述国内外关于偏振定标的研究都是针对只运用一个大视场光学镜头的偏振系统,关于多通道型偏振成像仪的定标研究目前尚未见报道。

多通道型偏振成像仪具有多个前置光学镜头组,不同偏振探测通道使用不同的光学镜头,由此有效提高了各通道间图像的时间配准度,使其在偏振探测的实时性方面具有独特优势。但是,该仪器自身的偏振效应会引起测量误差,因此对偏振定标精度的要求很高。本文研究了多通道型偏振成像仪的高精度偏振定标方法。在推导出多波段云与气溶胶探测仪(Cloud and Aerosol Polarimetric Imager,CAPI)矢量模型的基础上,运用无偏光源标定系统的穆勒矩阵,并基于可调偏振度光源对定标

精度进行了分析与验证,所得结果对该类仪器的偏振定标具有一定的指导意义。

2 仪器介绍

CAPI是由中科院长春光机所承担研制的多通道型偏振成像仪,它由可见-近红外(Visible Near Infrared,VNIR)和短波红外(Short Wave Infrared,SWIR)两个子系统构成,能够实现380,670,870,1375和1640nm5个波段的探测,其中在670nm和1640nm波段具有偏振探测能力。本文主要研究该仪器VNIR子系统中670nm波段探测通道的偏振定标,VNIR子系统的三维模型如图1所示。该子系统有3个光学镜头,且各镜头共视场^[1,11]。

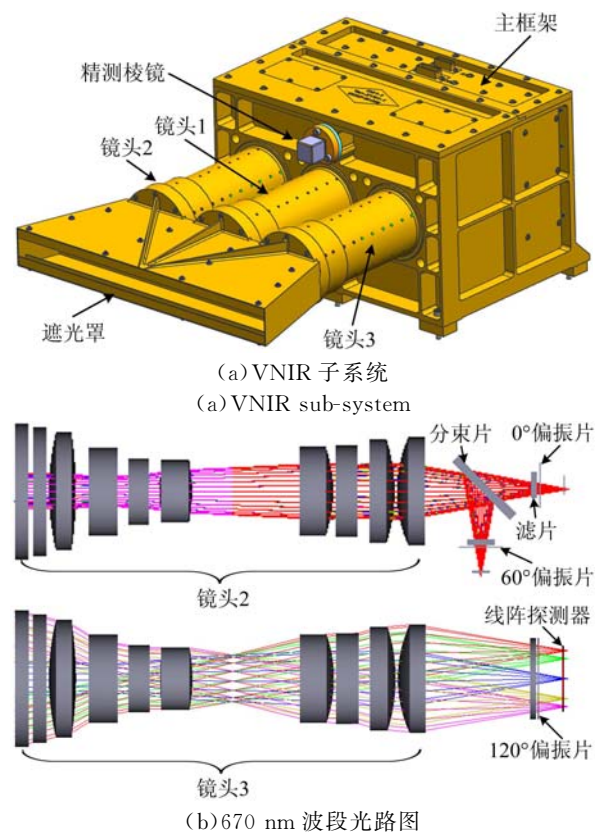


图1 VNIR子系统及670nm波段光路示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of VNIR sub-system and light path in 670 nm waveband

670 nm 波段的探测由 3 个偏振通道共同完成,各通道分别装有通光轴取向为 0° , 60° 和 120° 的偏振片,并通过窄带滤光片选择波段。3 个偏振通道使用各自的线阵探测器(有效像元数为 1 600),探测器的中心像元对准光轴,采用推扫方式成像,穿轨方向视场为 $\pm 16^\circ$ 。这种多通道设计使探测具有较好的实时性,显著提高了仪器对动目标的偏振探测能力,同时还有助于提高数据采集效率,保证足够的积分时间。

3 多通道型偏振成像仪的模型推导

CAPI 矢量辐射模型的几何参数定义如图 2 所示,以垂直和平行于 CCD 像元阵列的方向为 X 轴和 Y 轴,以像元阵列中心 O 为原点,建立全局坐标系 O-XYZ。穿轨方向视场角为 θ 的光束经光学系统入射到像元阵列上的 G 点,在平行和垂直于入射面的方向建立局部坐标系 σ -xy,投影到像面上即为 G 点的局部坐标系 G-xyz。偏振片通光轴方向与 X 轴夹角为 α ,入射光在全局坐标系中的投影与 X 轴夹角为 φ ,则其通光轴方向与 x

轴夹角为 $\varphi - \alpha$ 。由于 CAPI 使用线阵探测器,所以 φ 只能取 $\pm \frac{\pi}{2}$,当 $\theta > 0$ 时, $\varphi = \frac{\pi}{2}$;当 $\theta < 0$ 时, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ 。

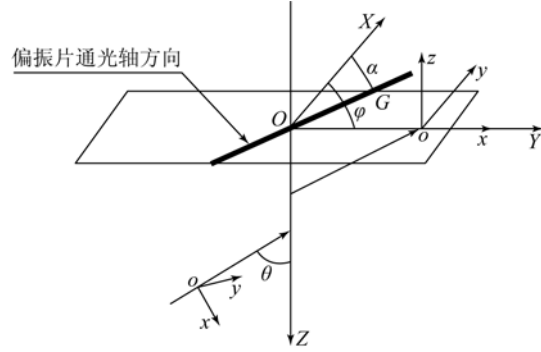


图 2 辐射模型几何参数的定义

Fig. 2 Definition of geometric parameters of radiometric model

首先考虑光学镜头的偏振效应,对于入射光 $H(\theta, \varphi)$,光学镜头在局部坐标系 σ -xy 下的穆勒矩阵为^[12]:

$$\mathbf{M}_L^k(\theta, \varphi) = \frac{T_s^k(\theta, \varphi) + T_p^k(\theta, \varphi)}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & D^k(\theta, \varphi) & 0 \\ D^k(\theta, \varphi) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1 - [D^k(\theta, \varphi)]^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $T_s^k(\theta, \varphi)$ 和 $T_p^k(\theta, \varphi)$ 分别为此入射条件下垂直和平行于入射面的光学镜头透过率; k 代表不同波段,这里取 670 nm 波段; $D^k(\theta, \varphi)$ 为光学镜头起偏度。由于 670 nm 波段不同偏振通道对应的光学镜头结构参数相同且共视场,所以可认为其起偏度 $D^k(\theta, \varphi)$ 一致,定义为:

$$D^k(\theta, \varphi) = \frac{T_s^k(\theta, \varphi) - T_p^k(\theta, \varphi)}{T_s^k(\theta, \varphi) + T_p^k(\theta, \varphi)}. \quad (2)$$

CAPI 使用小视场、透射式光学镜头,该镜头起偏度很小^[13],所以 $[D^k(\theta, \varphi)]^2$ 为小量,在矢量辐射传输模型的推导过程中可认为 $[D^k(\theta, \varphi)]^2 \approx 0$,则镜头的穆勒矩阵简化为:

$$\mathbf{M}_L^k(\theta, \varphi) = \frac{T_s^k(\theta, \varphi) + T_p^k(\theta, \varphi)}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & D^k(\theta, \varphi) & 0 \\ D^k(\theta, \varphi) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其次考虑滤光片和偏振片的偏振效应,当通光轴方向取向为 0° 时,滤光片和偏振片的穆勒矩阵为^[12]:

$$\mathbf{M}_N^k = \frac{\tau_s^k + \tau_p^k}{2} \begin{bmatrix} 1 & \eta^k & 0 \\ \eta^k & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1 - (\eta^k)^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: τ_s^k 和 τ_p^k 分别为滤光片、偏振片在垂直和平行于入射面的透过率, η^k 为消光比。对于入射光 $H(\theta, \varphi)$,滤光片和偏振片在局部坐标系 σ -xy 下的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_N^{k,a}(\theta, \varphi) = \mathbf{R}(-(\varphi - \alpha^a)) \cdot \mathbf{M}_N^k \cdot \mathbf{R}(\varphi - \alpha^a) = \frac{\tau_s^{k,a} + \tau_p^{k,a}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \eta^k \zeta^a & \eta^k \xi^a \\ \eta^k \zeta^a & (\zeta^a)^2 + \sqrt{1 - (\eta^k)^2} (\xi^a)^2 & (1 - \sqrt{1 - (\eta^k)^2}) \xi^a \zeta^a \\ \eta^k \xi^a & (1 - \sqrt{1 - (\eta^k)^2}) \xi^a \zeta^a & (\xi^a)^2 + \sqrt{1 - (\eta^k)^2} (\zeta^a)^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: \mathbf{R} 表示坐标的旋转变换矩阵; a 为偏振通道序号, 取值 1, 2, 3, 分别对应 0° , 60° 和 120° 偏振通道, ξ^a 和 ζ^a 分别定义为:

$$\xi^a = \sin 2(\varphi - \alpha^a), \quad \zeta^a = \cos 2(\varphi - \alpha^a). \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} S_{\text{out},0}^{k,a}(\theta, \varphi) \\ S_{\text{out},1}^{k,a}(\theta, \varphi) \\ S_{\text{out},2}^{k,a}(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_N^{k,a}(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{M}_L^k(\theta, \varphi) \cdot \begin{bmatrix} S_{\text{in},0}^k(\theta, \varphi) \\ S_{\text{in},1}^k(\theta, \varphi) \\ S_{\text{in},2}^k(\theta, \varphi) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于探测器只能响应总辐射强度 $S_{\text{out},0}^{k,a}(\theta, \varphi)$, 将式(3)和式(5)代入式(7)可得:

$$S_{\text{out},0}^{k,a}(\theta, \varphi) = \frac{(\tau_s^{k,a} + \tau_p^{k,a})(T_s^k(\theta, \varphi) + T_b^k(\theta, \varphi))}{4} \cdot \{ [1 + \eta^k \zeta^a D^k(\theta, \varphi)] S_{\text{in},0}^k(\theta, \varphi) + [\eta^k \zeta^a + D^k(\theta, \varphi)] S_{\text{in},1}^k(\theta, \varphi) + \eta^k \xi^a S_{\text{in},2}^k(\theta, \varphi) \}. \quad (8)$$

由于光学系统特性与探测谱段、探测器性能等有关, 参考传统的绝对辐射定标模型, 可得出 k 谱段、 a 偏振通道的偏振定标模型为:

$$\text{DN}_i^{k,a} = A_0^{k,a} P^k(\theta, \varphi) g_i^k [P_1^{k,a}(\theta, \varphi) S_{\text{in},0}^k(\theta, \varphi) + P_2^{k,a}(\theta, \varphi) S_{\text{in},1}^k(\theta, \varphi) + P_3^{k,a}(\theta, \varphi) S_{\text{in},2}^k(\theta, \varphi)] + B_i^{k,a}, \quad (9)$$

其中: $\text{DN}_i^{k,a}$ 为系统响应值; i 表示像元 G 的编号, 与 θ 和 φ 一一对应; $A_0^{k,a}$ 表示中心视场的绝对辐射定标系数; $B_i^{k,a}$ 为辐射响应偏置; $P^k(\theta, \varphi)$ 表示系统

$$\mathbf{M}^k(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} A_0^{k,1} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_1^{k,1}(\theta, \varphi) & A_0^{k,1} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_2^{k,1}(\theta, \varphi) & A_0^{k,1} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_3^{k,1}(\theta, \varphi) \\ A_0^{k,2} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_1^{k,2}(\theta, \varphi) & A_0^{k,2} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_2^{k,2}(\theta, \varphi) & A_0^{k,2} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_3^{k,2}(\theta, \varphi) \\ A_0^{k,3} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_1^{k,3}(\theta, \varphi) & A_0^{k,3} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_2^{k,3}(\theta, \varphi) & A_0^{k,3} \cdot P^k(\theta, \varphi) \cdot P_3^{k,3}(\theta, \varphi) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

求解出各视场的穆勒矩阵, 即完成仪器的偏振定标。

本文推导的偏振定标模型与文献[6]给出的模型形式类似, 但不同之处在于 CAPI 的 670 nm 波段同时具备 3 个偏振探测通道, 不再采用大视场光学镜头结合旋转偏振片的分时探测方式, 因此该偏振定标模型中的参数具有独特的物理意义, 基于此模型的偏振定标过程也存在差异。

4 仪器的偏振定标与实验结果

目前, 典型偏振仪器的定标一般使用偏振度可调的偏振光源^[14]。本文推导的偏振定标模型也适用于偏振光源定标法, 但由于 CAPI 各光学镜头之间存在一定距离, 且视场为 $\pm 16^\circ$, 所以运用偏振光源无法一次覆盖所有镜头的全视场, 而偏振定标过程中光源或仪器的任何移动都会影响定标精度。针对这种情况, 本文提出了基于积分球的无偏光源偏振定标法, 该方法可以有效减小

设入射光 $\mathbf{H}(\theta, \varphi)$ 的斯托克斯矢量为 $[S_{\text{in},0}^k(\theta, \varphi), S_{\text{in},1}^k(\theta, \varphi), S_{\text{in},2}^k(\theta, \varphi)]^T$, 通过 a 偏振通道的斯托克斯矢量为 $[S_{\text{out},0}^{k,a}(\theta, \varphi), S_{\text{out},1}^{k,a}(\theta, \varphi), S_{\text{out},2}^{k,a}(\theta, \varphi)]^T$, 则:

的低频相对透过率; g^k 表示系统的高频相对透过率, 可以通过像元合并来抑制; $P_1^{k,a}(\theta, \varphi)$ 、 $P_2^{k,a}(\theta, \varphi)$ 和 $P_3^{k,a}(\theta, \varphi)$ 为系统的偏振参数, 其定义分别为:

$$\begin{aligned} P_1^{k,a}(\theta, \varphi) &= 1 + \eta^k \zeta^a D^k(\theta, \varphi), \\ P_2^{k,a}(\theta, \varphi) &= \eta^k \zeta^a + D^k(\theta, \varphi), \\ P_3^{k,a}(\theta, \varphi) &= \eta^k \xi^a. \end{aligned} \quad (10)$$

由于 CPAI 使用的偏振片的消光比大于 0.999 8, 因此在实际偏振定标过程中取 $\eta^k = 1$, 则系统在视场 (θ, φ) 下的穆勒矩阵为:

偏振定标误差, 提高定标效率。

偏振定标中采用出光口径为 2 m 的积分球, 其出射光偏振度低于 0.1%, 可认为是无偏光。将 CAPI 镜头对准积分球出光口, 保证仪器各通道全视场完全处于积分球的均匀出光口处, 并使用地物波谱仪 ASD 监视出光口辐亮度, 实验装置如图 3 所示。

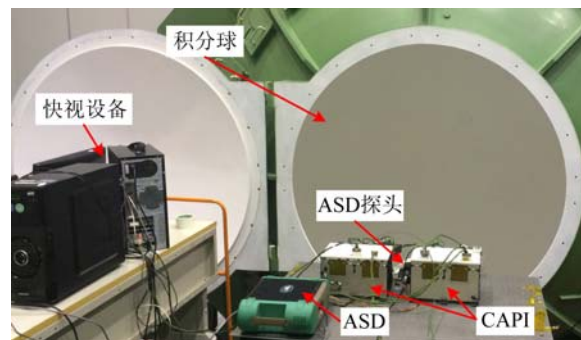


图 3 基于积分球的定标实验装置

Fig. 3 Experimental devices for calibration based on integral sphere

由式(10)和式(11)可知,CAPI 偏振定标需
要标定的关键参数为中心视场绝对辐射定标系数
 $A_0^{k,a}$ 、光学镜头起偏度 $D^k(\theta, \varphi)$ 和系统低频相对透
过率 $P^k(\theta, \varphi)$ 。

4.1 $A_0^{k,a}$ 的标定

为了确定 CAPI 响应 DN 值与入瞳辐亮度之
间的定量关系,需要获取绝对辐射定标系数。由
于积分球是无偏光源,所以 $S_{m,1}^k = S_{m,2}^k = 0$; 对于
中心视场, $P_1^{k,a} = 1$ 且 $P^k = 1$, 则根据式(9)可得中
心视场的绝对辐射定标系数为:

$$A_0^{k,a} = \frac{DN_0^{k,a} - B_0^{k,a}}{S_{m,0}^k}, \quad (12)$$

其中 $S_{m,0}^k$ 由经过标准辐射传递校正的 ASD 测得。
为了降低随机误差对定标精度的影响,选取中心像
元两侧各 16 个像元作为中心视场像元,对各像元
响应求均值并对图像进行平滑处理,各偏振通道的
中心视场绝对辐射定标系数的测量值如表 1 所示。

表 1 中心视场的绝对辐射定标系数

Tab. 1 Absolute radiometric calibration coefficients in center field of view

通道	$A_0^{k,a}/(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot DN^{-1})$
$0^\circ (\alpha=1)$	222.22
$60^\circ (\alpha=2)$	294.12
$120^\circ (\alpha=3)$	500

标定结果表明,各通道中心视场的绝对辐射
定标系数相差较大。一方面由于 0° 和 60° 通道采
用分光方式共用同一组光学镜头,到达像面的能
量显著降低;另一方面因为各偏振片、滤光片的透
过率不同,且探测器的辐射响应系数也存在差异。
这种差异性说明对于多通道型偏振探测仪的偏振
定标,辐射定标是必不可少的,其偏振定标精度依
赖于辐射定标精度。

4.2 $D^k(\theta, \varphi)$ 的标定

参数 $P_1^{k,a}(\theta, \varphi)$ 、 $P_2^{k,a}(\theta, \varphi)$ 和 $P_3^{k,a}(\theta, \varphi)$ 是表
征光学系统偏振特性的关键参量,均与光学镜头
起偏度 $D^k(\theta, \varphi)$ 有关,因此需要对 $D^k(\theta, \varphi)$ 进行高
精度标定。首先假设 CAPI 每个镜头为理想的光
学系统,不存在偏振效应,则此时整个系统只有偏
振片具有显著的偏振效应,它与探测器构成完整
的测偏系统。当任意偏振度的光入射至 CAPI 入
瞳时,探测器响应可表示为:

$$DN_i^{k,a} = A_i^{k,a} [S_{m,0}^k(\theta, \varphi) + \zeta^a S_{m,1}^k(\theta, \varphi) + \xi^a S_{m,2}^k(\theta, \varphi)] + B_i^{k,a}. \quad (13)$$

为抑制探测器响应非均匀性对偏振定标精度
的影响,这里通过对探测器的辐射定标测定了各
像元的线性响应系数,并求取了各像元响应非一
致性的校正系数,基于此对探测器的响应非均匀性
进行初步校正。式(13)中 $DN_i^{k,a}$ 为校正后的系统
响应值,将式(13)改写为矩阵形式并整理可得:

$$\begin{bmatrix} S_{m,0}^k(\theta, \varphi) \\ S_{m,1}^k(\theta, \varphi) \\ S_{m,2}^k(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_{PEC}^k(\theta, \varphi))^{-1} \begin{bmatrix} DN_i^{k,1} - B_i^{k,1} \\ DN_i^{k,2} - B_i^{k,2} \\ DN_i^{k,3} - B_i^{k,3} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{M}_{PEC}^k(\theta, \varphi)$ 表示当光学镜头为理想光学系统
时,仪器在 k 波段的穆勒矩阵,其表达式为:

$$\mathbf{M}_{PEC}^k(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} A_i^{k,1} & A_i^{k,1} \cdot \zeta^1 & A_i^{k,1} \cdot \xi^1 \\ A_i^{k,2} & A_i^{k,2} \cdot \zeta^2 & A_i^{k,2} \cdot \xi^1 \\ A_i^{k,3} & A_i^{k,3} \cdot \zeta^3 & A_i^{k,3} \cdot \xi^1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

若 CAPI 的光学镜头为理想光学系统,则当
非偏振光入射时,测偏系统输出的偏振度为 0; 但
实际的 CAPI 光学镜头存在一定的偏振效应,此
时当非偏振光入射时,测偏系统的测量结果即表
征了光学镜头自身的偏振响应特性。所以,实际
光学镜头在视场 (θ, φ) 下的起偏度 $D^k(\theta, \varphi)$ 为:

$$D^k(\theta, \varphi) = \sqrt{[S_{m,1}^k(\theta, \varphi)]^2 + [S_{m,2}^k(\theta, \varphi)]^2} / S_{m,0}^k(\theta, \varphi). \quad (16)$$

在求解起偏度时,对相邻 20 个像元的响应取
平均值,然后对 $\varphi = -\pi/2$ 和 $\varphi = \pi/2$ 下 80 个合
并像元的起偏度测量值进行多项式拟合,求解光
学镜头起偏度随视场的变化,拟合公式为:

$$D^k(|\theta|) = a_4 |\theta|^4 + a_3 |\theta|^3 + a_2 |\theta|^2 + a_1 |\theta| + a_0. \quad (17)$$

图 4 为拟合曲线,拟合结果如表 2 所示。

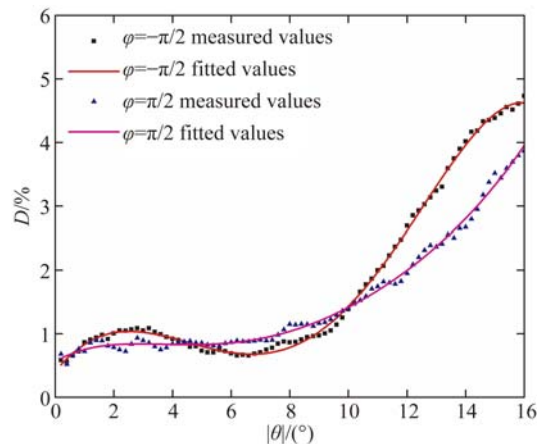


图 4 光学镜头起偏度随视场的变化曲线

Fig. 4 Curve of polarization degree of optics with viewing angle

表 2 光学镜头起偏度的多项式拟合结果

Tab. 2 Polynomial fitting of polarization degree of optics

方位角 φ/rad	多项式拟合系数					拟合 残差
	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0	
$-\pi/2$	0.000 2	0.011 8	-0.160 1	0.578 6	0.402 3	0.055 4
$\pi/2$	-0.000 7	0.012 6	-0.091 1	0.270 0	0.560 9	0.065 3

由图 4 可知,光学镜头起偏度的变化趋势为随视场角的增大而增大;边缘视场的偏振度约为 4%,若不标定,会引入较大的偏振度测量误差。理论上系统在中心视场不起偏,但 CAPI 的中心视场标定结果约为 0.5%,这主要是由于探测器中心像元没有严格对准光轴,且积分球出射光也存在一定偏振度。当 $\varphi = -\pi/2$ 且 $3^\circ < |\theta| < 8^\circ$ 时,光学镜头起偏度较小,这是由光学元件加工、装调误差及探测器的响应非均匀性校正残差等因素造成的,这些因素还导致镜头起偏度随视场的变化失去对称性,使得 $\varphi = -\pi/2$ 和 $\varphi = \pi/2$ 对应的起偏度曲线不重合。

对比分析光学镜头起偏度的测量值和拟合结果可知,对全视场下的起偏度进行多项式拟合具有统计特性,可以有效消除光学元件缺陷、探测器异常响应等因素的影响,一定程度上提高了系统的偏振定标精度。

4.3 $P^k(\theta, \varphi)$ 的标定

系统低频相对透过率 $P^k(\theta, \varphi)$ 是由于光学镜头各视场透过率不同导致的,各视场透过率与中心视场透过率之比即为低频相对透过率。当无偏光入射 CAPI 时,式(9)可以简化为:

$$DN_i^{k,a} = A_0^{k,a} P^k(\theta, \varphi) g_i^k P_1^{k,a}(\theta, \varphi) S_{m,0}^{k,a}(\theta, \varphi) + B_i^{k,a}, \quad (18)$$

其中系统高频相对透过率 g_i^k 主要取决于探测器噪声,可以通过像元合并的方式进行抑制,则系统的低频相对透过率可以表示为:

$$P^k(\theta, \varphi) = \frac{DN_i^{k,a} - B_i^{k,a}}{A_0^{k,a} P_1^{k,a}(\theta, \varphi) S_{m,0}^{k,a}(\theta, \varphi)}. \quad (19)$$

在求解系统低频相对透过率时,对相邻 20 个像元的响应取平均值,然后对 $\varphi = -\pi/2$ 和 $\varphi = \pi/2$ 下 80 个合并像元的系统低频相对透过率测量值进行多项式拟合,拟合公式如下:

$$P^k(|\theta|) = b_3 |\theta|^3 + b_2 |\theta|^2 + b_1 |\theta| + b_0. \quad (20)$$

图 5 为拟合曲线,拟合结果如表 3 所示。

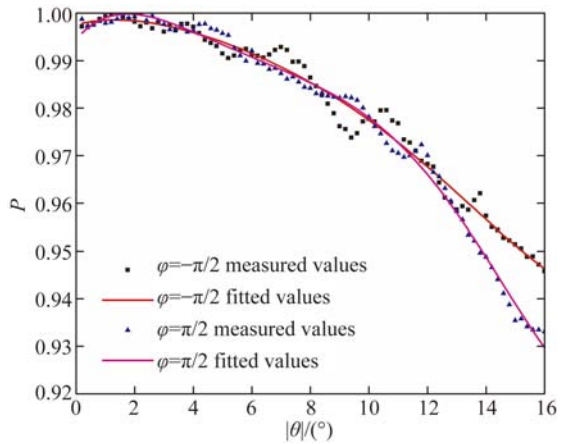


图 5 低频相对透过率随视场的变化曲线

Fig. 5 Variation of low part of transmission with viewing angle

表 3 低频相对透过率的多项式拟合结果

Tab. 3 Polynomial fitting of low part of transmission

方位角 φ/rad	多项式拟合系数				拟合 残差
	b_3	b_2	b_1	b_0	
$-\pi/2$	0.000 1	-0.000 8	0.001 6	0.997 5	0.002 2
$\pi/2$	0.000 4	-0.003 0	0.007 1	0.994 5	0.001 6

测量结果表明,系统低频相对透过率的整体变化趋势为随视场的增大而减小,边缘视场的相对透过率相比中心视场降低了约 6%。由于光学元件加工、装调误差等因素的影响,左右视场的低频相对透过率失去对称性,尤其是对于边缘视场, $\varphi = -\pi/2$ 和 $\varphi = \pi/2$ 下的测量结果存在较大偏离。若不进行标定和修正,会使仪器测出的斯托克斯参量存在视场非均匀性误差。同时,系统低频相对透过率随视场的变化曲线出现局部波动,而通过多项式拟合,可抑制该波动对偏振定标精度的影响。因此,为提高偏振成像仪器的偏振定标精度,需测量系统全视场下的低频相对透过率,并以此修正系统的穆勒矩阵。

将各视场的标定参数分别代入式(10),即求得系统在全视场下的穆勒矩阵,本文只给出典型的中心视场和边缘视场的穆勒矩阵,如表 4 所示。由标定结果可知,不同视场的穆勒矩阵存在差异,这表明系统的偏振效应随视场而改变。

表 4 CAPI 典型视场的穆勒矩阵

Tab. 4 Mueller matrices of typical viewing angles

视场	穆勒矩阵/($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot DN^{-1}$)
中心视场	$\begin{bmatrix} 220.89 & -220.88 & -1.02 \\ 292.65 & 152.37 & 249.86 \\ 501.70 & 293.52 & -407.24 \end{bmatrix}$
边缘视场	$\begin{bmatrix} 230.33 & -230.32 & -1.11 \\ 307.93 & 168.22 & 258.14 \\ 513.67 & 288.15 & -425.24 \end{bmatrix}$

由上述定标过程和实验结果可知,无偏光源定标法在定标过程中任何仪器都不需要移动,有效减少了误差源;并且采用多项式拟合得出全视场下光学镜头的起偏度和低频相对透过率,提高了系统的偏振定标精度。

5 偏振定标精度验证

通过可调偏振度光源验证仪器的偏振定标精度。偏振光源包括积分球和起偏器,起偏器由两块对称放置的平板玻璃堆构成,转动平板玻璃堆改变光的入射角,从而改变出射光的偏振度,该偏振度可以根据菲涅尔定律求出^[15]。实验采用中科院长春光机所研制的可调偏振度光源,其平板玻璃转角精度优于 0.2° ,实验装置如图 6 所示。为保证测量精度,实验前运用经纬仪将偏振光源坐标系统一至 CAPI 光学坐标系中。

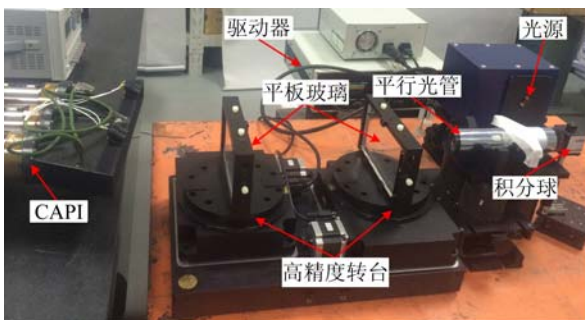
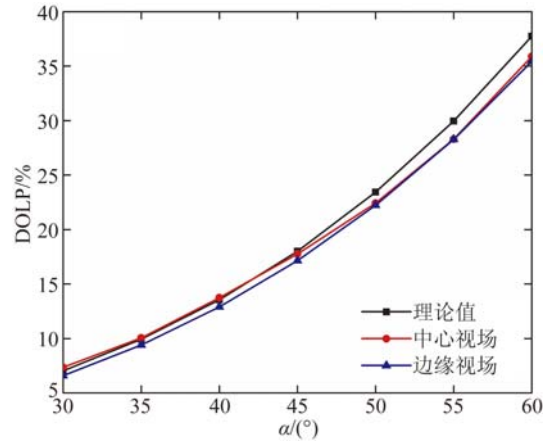


图 6 基于可调偏振度光源的定标精度验证装置

Fig. 6 Devices for calibration precision validation based on light source with variable polarization degree

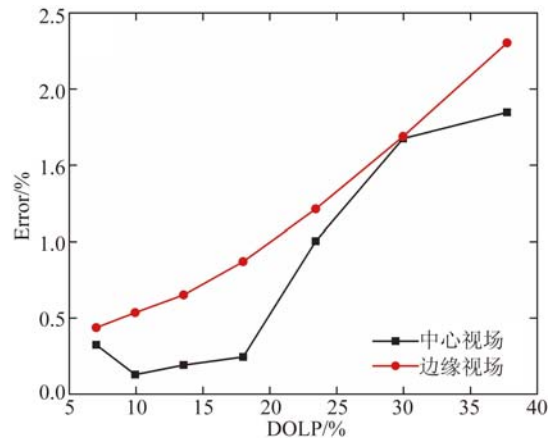
运用可调偏振度光源产生已知偏振信息的线偏振光,分别入射至 CAPI 典型的中心视场和边

缘视场,根据 CAPI 测量结果反演入瞳处偏振度,并与理论值进行比较,从而验证该仪器的偏振定标精度。为减小偏振光源自身误差的影响,实验中选取的平板玻璃堆转角为 $30^\circ \sim 60^\circ$,实验结果如图 7 所示。



(a) DOLP 误差随平板玻璃堆转角的变化曲线

(a) Variation of error of DOLP with rotation angle of glass plates



(b) DOLP 误差随 DOLP 的变化曲线

(b) Variation of error of DOLP with value of DOLP

图 7 CAPI 偏振测量结果

Fig. 7 Results of polarization measurement using CAPI

实验结果表明,相比于中心视场,边缘视场的偏振测量精度较低,这是由于仪器自身偏振效应随视场的增大而增强,所以偏振定标后仪器在边缘视场的残余偏振效应仍大于中心视场。在两种典型视场下,偏振测量误差均随目标偏振度的增大而增大,由于 CAPI 主要用于测量大气气溶胶,其目标偏振度一般较小。由图 7 可知,当目标偏振度低于 20% 时,该仪器的偏振测量误差低于 1%。

在偏振定标精度验证实验中,受限于偏振光

源的基本工作原理和尺寸,一次实验只能测量某通道的某视场,且为保证精度必须在每次移动装置之后重新统一坐标系;而基于积分球的无偏光源定标方法则可以在一次测量中覆盖所有通道的全部视场。因此,对于多通道型偏振成像仪器,无偏光源偏振定标法显著提高了定标效率。

6 结 论

本文推导了多通道型偏振成像仪的偏振定标模型,在此基础上提出一种基于积分球的无偏光

源偏振定标方法。运用该方法对 CAPI 进行了偏振定标实验,并验证了偏振定标精度。实验结果表明,为提高多通道型偏振成像仪的偏振定标精度,必须对中心视场的绝对辐射定标系数以及全视场的光学镜头起偏度和系统低频相对透过率进行高精度标定。由定标精度验证结果可知,无偏光源偏振定标方法可以有效标定系统自身的偏振效应,仪器标定后在目标偏振度低于 20% 时,偏振测量误差小于 1%,满足精度要求。该方法显著提高了偏振定标效率,对多通道型偏振成像仪器的定标具有重要的理论和现实意义。

参考文献:

- [1] 代虎. 偏振探测与成像系统研究及优化[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2015.
DAI H. *Investigation and Optimization of Polarimetry and Polarimetric Imaging System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [2] 胡亚东,胡巧云,孙斌,等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. 光学精密工程,2015,23(3):652-659.
HU Y D, HU Q Y, SUN B, *et al.*. Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 652-659. (in Chinese)
- [3] 郝增周,龚芳,潘德炉,等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. 光学学报,2012,32(1):0101002-1-9.
HAO Z ZH, GONG F, PAN D L, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002-1-9. (in Chinese)
- [4] 弓洁琼,詹海刚,刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(4):1088-1095.
GONG J Q, ZHAN H G, LIU D ZH. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2010, 30(4): 1088-1095. (in Chinese)
- [5] 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.
SONG M X, SUN B, SUN X B, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1153-1158. (in Chinese)
- [6] BRET-DIBAT T, ANDER Y, LAHERRERE J M. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [J]. *SPIE*, 1995,2553:218-231.
- [7] HAGOLLE O, GOLOUB P, DESCHAMPS P Y, *et al.*. Results of POLDER in-flight calibration [J]. *IEEE T. Geosci. Remote*, 1999, 37(3): 1550-1566.
- [8] 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):227-231.
CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, *et al.*. Project of calibration method for polarization camera [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 227-231. (in Chinese)
- [9] GU X F, QIAO Y L, WANG J N, *et al.*. High-resolution directional polarimetric camera (DPC) used in the remote sensing of aerosol properties [J]. *SPIE*, 2010, 7807: 7807W-1-7.
- [10] ZHANG J Q, SHAO J B, YAN C X. Cloud and aerosol polarimetric imager [J]. *SPIE*, 2014, 9142: 91420X.
- [11] 顾行发,陈兴峰,程天海,等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标[J]. 物理学报,2011,60(7):070702-1-8.
GU X F, CHEN X F, CHENG T H, *et al.*. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(7): 070702-1-8. (in Chinese)
- [12] BASS M. *Handbook of Optics*[M]. 3rd ed.. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [13] 陈立刚,孟凡刚,袁银麟,等. 航空偏振相机的光学偏振特性实验研究[J]. 光电子·激光,2011,22(11):1629-1632.

CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, *et al.*. Experimental study for the polarization characteristics of airborne polarization camera [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22 (11): 1629-1632. (in Chinese)

- [14] 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): 0412003-1-11.

KANG Q, LI J J, CHEN L G, *et al.*. Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412003-1-11. (in Chinese)

- [15] CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, *et al.*. High-precision variable polarization light source [J]. *Procedia Eng.*, 2012, 29: 1835-1839.

作者简介:



杨 斌(1990—),男,山东滨州人,博士研究生,2013年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事多光谱偏振成像仪器误差分析及定标方面的研究。E-mail: yangbin8086@163.com

导师简介:



颜昌翔(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术,多光谱、超光谱空间遥感成像技术、偏振探测技术等方面的研究。E-mail: yan cx@ciomp.ac.cn.com.cn

通讯作者:



张军强(1981—),男,江苏泰兴人,博士,副研究员,主要从事偏振、光谱仪器的研制、光机系统整体性能评价等方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com