

多角度偏振成像仪全像面在轨偏振定标方法

张一鹏^{1,2*}, 胡秀清^{3**}, 殷德奎^{1***}, 顾明剑¹

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 多角度偏振成像仪(MAPI)可获得多光谱、多角度的偏振信息,用于反演气溶胶与云的微物理特性。偏振的高精度探测需要精确的偏振定标。由于MAPI未配置星上定标器,因此采用自然景物作为偏振定标源。建立了全视场在轨偏振定标模型,分析了水云偏振特性。选用散射角为 100° 的水云像元作为无偏的定标源。求解了偏振响应矩阵所需的偏振片-滤光片组合的相对透过率、镜头起偏度以及低频相对透过率,最终计算出全像面偏振响应矩阵分布。分析了偏振片-滤光片组合的相对透过率三年平均值的变化,采用实验室定标结果进行验证,得到的相对误差为0.71%。采用最小二乘法拟合了镜头起偏度、低频相对透过率随视场角的变化。采用实验室偏振定标结果进行验证,得到的中心视场相对误差为1.22%。分析了算法的不确定度,得到中心视场合成不确定度为1.27%,边缘视场合成不确定度为2.19%,满足设计指标。所提定标方法对宽视场偏振成像仪的在轨定标有一定的借鉴作用,为气溶胶反演应用提供质量保证。

关键词 大气光学; 偏振; 定标; 水云; 全像面; 偏振响应矩阵

中图分类号 TP732.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1911001

Full Image On-Orbit Polarization Calibration Method of Multi-Angle Polarization Imager

Zhang Yipeng^{1,2*}, Hu Xiuqing^{3**}, Yin Dekui^{1***}, Gu Mingjian¹

¹Key Laboratory of Infrared System Detection & Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract A multi-angle polarization imager (MAPI) can obtain multi-spectral and multi-angle polarization information, which is used to retrieve the microphysical properties of aerosols and clouds. Polarization high-precision detection requires accurate polarization calibration. Since MAPI is without an on-orbit calibrator, we use natural scenes as the sources of polarization calibration. A full-field on-orbit polarization calibration model is established, and the polarization characteristics of water clouds are analyzed. Water cloud pixels with a scattering angle of 100° are selected as unpolarized calibration sources. The relative transmittance of the polarizer-filter combination, the polarization degree of the optical lens, and the low frequency relative transmittance required by the polarization response matrix are solved, and finally the polarization response matrix of the full image is calculated. The average value of relative transmittance of the polarizer-filter combination for three years is analyzed and verified by laboratory calibration results. The relative error is 0.71%. The least squares method is used to fit the variations of the polarization degree of the optical lens and the low frequency relative transmittance with the angle of view. The laboratory polarization calibration results are used to verify that the relative error of the central field of view is 1.22%. The uncertainty of the algorithm is analyzed. The synthetic uncertainty of the central field of view and the marginal field of view is 1.27% and 2.19%, respectively, which meet the design specifications. The calibration method can be used as a reference for the on-orbit calibration of wide-field polarized imaging devices, and provides quality assurance for aerosol inversion.

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-05; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504900)、国家自然科学基金(41871249)

* E-mail: zyp_47@163.com; ** E-mail: huxq@cma.gov.cn; *** E-mail: yin@mail.sitp.ac.cn

Key words atmospheric optics; polarization; calibration; water cloud; full image; polarization response matrix
OCIS codes 110.5405; 280.4788; 120.0280; 290.5855

1 引 言

偏振是电磁波的振动方向特性,电磁波与目标发生相互作用时偏振状态会发生变化,偏振探测是由偏振成像仪根据偏振状态的变化反演目标特性。由于自然界中圆偏振分量极小,目前偏振探测通常只测量线偏振状态^[1]。线偏振(后简称为偏振)探测将传统的遥感探测从三维(强度、相位、方向)拓展到五维(强度、相位、方向、偏振度、偏振方位角)。多角度偏振成像仪(MAPI)是中国科学院上海技术物理研究所研制的宽视场、多角度、多光谱偏振成像仪器,可有效反演大气气溶胶、水汽以及云的微物理特性。

精确的反演离不开遥感仪器的定量化^[2],偏振探测精度是 MAPI 的重要技术指标。然而,仪器自身的偏振效应会改变探测器接收到的入射光偏振态。若仪器偏振效应无法进行定量化,则会严重影响偏振测量的准确性。国内外有很多仪器分析了自身偏振效应^[3-8]。通常仪器的偏振效应由光学系统引起,如不同入射角的光经过光栅、透镜反射或透射,最终形成系统的总偏振效应,一般可采用 Mueller 矩阵对其进行描述。偏振定标的目的是标定影响偏振探测的物理参数,获得仪器的 Mueller 矩阵。由于涉及到非线性以及矢量辐射传输,偏振定标比辐射定标更为困难。Goloub 等^[9]针对 POLDER (Polarization and Directionality of the Earths' Reflectance)传感器,研究了宽视场偏振仪器的实验室定标与在轨定标,通过建立偏振探测系统模型标定探测矩阵的参数。杨斌等^[10]对多通道型偏振成像仪开展了实验室偏振定标,基于无偏定标源获得系统 Mueller 矩阵。代虎等^[11]研究了气溶胶偏振仪的特性,综合考虑入射光偏振态、起偏效应的误差影响。钱鸿鹄等^[12]对 DPC (Spaceborne Directional Polarimetric Camera)非偏振通道的全视场偏振效应进行了研究,为定标和数据处理提供了理论依据。顾行发等^[13]通过建立辐射传输模型,对 DPC 在轨偏振定标原理和方法进行了探索与验证。然而上述国内外关于偏振定标的研究主要针对实验室偏振定标,且未描述偏振效应在像面矩阵上的分布,而关于全像面的在轨偏振定标目前尚未见报道。

在 MAPI 缺乏星上定标器且已在轨运行^[14]的情况下,本文根据仪器宽视场、转轮分时探测的光路结构特点,建立系统级偏振定标模型。分析水云偏振特性,采用满足散射角条件的水云作为无偏定标源,提出了基于 100° 散射角水云的全视场在轨偏振定标方法。设计了偏振效应参数的求解算法,采用最小二乘法拟合出偏振效应参数在像面的分布,最终求解出 565 nm 光谱通道全像面的偏振响应矩阵,并采用实验室定标结果进行验证。重点分析了偏振片-滤光片组合的相对透过率、镜头起偏度和低频相对透过率的偏差对偏振探测精度的影响,其结果显示边缘视场的精度较低,中心视场精度较高。本文研究对宽视场偏振成像仪器的全像面在轨偏振定标有一定的指导意义。

2 偏振定标方法

2.1 偏振定标模型

图 1 为探测器像素矩阵的坐标系,以及几何参数之间的关系。

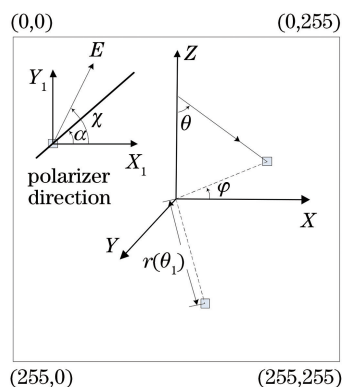


图 1 MAPI 像面矩阵成像坐标系及几何参数之间的关系
 Fig. 1 Imaging coordinate system and relationship among geometric parameters of MAPI image matrix

图 1 中 χ 为偏振方位角, α 为检偏器角度, φ 为像元方位角, $r(\theta_1)$ 为像元到像面中心的距离, θ 为视场角, 可以用目标像元到中心像元的距离表示, 距离与视场角呈线性关系。图 2 显示像元位置与视场角的关系。

根据 Stokes 各分量的光学传递原理, 可以推导出实际的传输模型^[15]。文献[9, 12]给出 DN 值与光强的一次线性关系, 本文的在轨偏振定标模型采用实验室辐射定标得到的多项式拟合解算出辐亮度 L_r , 建立起 Stokes 参数与 L_r 的定量关系:

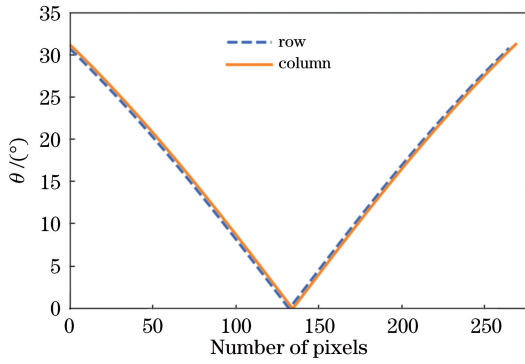


图 2 视场角 θ 与像元位置的关系

Fig. 2 Relationship between viewing angle θ and pixel position

$$\mathbf{L}_r = \frac{p \cdot T_a}{A} (p_{1\alpha(\theta)} \mathbf{I} + p_{2\alpha(\theta)} \mathbf{Q} + p_{3\alpha(\theta)} \mathbf{U}), \quad (1)$$

式中: T_a 为滤光片-偏振片组合的平均相对透过率, 定义为滤光片-偏振片组合的透过率与中间滤光片-偏振片组合通道透过率的比值, MAPI 每个偏振波段有 3 个检偏通道^[16], 通道 $a=1, 2, 3$; A 为光源表面面积; $\mathbf{I}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}$ 为 Stokes 矢量 \mathbf{S} 的分量; $p_{1\alpha(\theta)}, p_{2\alpha(\theta)}, p_{3\alpha(\theta)}$ 为偏振参数[下标 $1\alpha(\theta), 2\alpha(\theta), 3\alpha(\theta)$ 分别指代不同检偏器角度 α 与视场角 θ], 作为 $\mathbf{I}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}$ 的系数, 可表示为

$$p_{1\alpha(\theta)} = 1 + \eta \epsilon(\theta) \cos(2\alpha), \quad (2)$$

$$p_{2\alpha(\theta)} = \epsilon(\theta) + \eta \cos(2\alpha), \quad (3)$$

$$p_{3\alpha(\theta)} = \eta \sin(2\alpha), \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{\text{pol}} \cos(2\chi), \quad \mathbf{U} = \mathbf{I}_{\text{pol}} \sin(2\chi), \quad (5)$$

式中: $\epsilon(\theta)$ 为光学镜头起偏度, 描述光学镜头的偏振效应, 是视场角 θ 的函数, 不同视场下系统自身偏振度不同, 通过多项式拟合可以得到函数 $\epsilon(\theta)$; η 为偏振片的透过效率, 描述为单一光学元件检偏器的偏振透过效率, 此参数在不同文献中称呼不同^[16-17], 但不影响其实际物理意义, 其与视场角无关, 一般认为偏振片是空间均一的且不随时间改变, 通常取常数;

\mathbf{I}_{pol} 为偏振光。

入瞳前的 Stokes 矢量 \mathbf{S} 与仪器获得的辐亮度 \mathbf{L}_r 之间的关系为

$$\mathbf{L}_r = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{M} 为系统的 Mueller 矩阵, 可表示为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{A} \cdot \begin{bmatrix} p \cdot T_1 \cdot p_{1,a_1} & p \cdot T_1 \cdot p_{2,a_1} & p \cdot T_1 \cdot p_{3,a_1} \\ p \cdot T_2 \cdot p_{1,a_2} & p \cdot T_2 \cdot p_{2,a_2} & p \cdot T_2 \cdot p_{3,a_2} \\ p \cdot T_3 \cdot p_{1,a_3} & p \cdot T_3 \cdot p_{2,a_3} & p \cdot T_3 \cdot p_{3,a_3} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: p_{i,a_j} 为第 j 个检偏通道的第 i 个偏振参数, 其中 $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$; p 为光学镜头低频部分的相对透过率, 定义为边缘视场响应值与中心视场响应值之比, 视场透过率的不同导致响应面不均匀, p 是视场角 θ 的函数, 随着视场角的变化而改变, 通过多项式拟合可以得到函数 $p(\theta)$, 其中 $p(0)=1$; 理想情况下, 3 个通道的透过率相同, 由于器件材料批次不同、装配过程导致透过率有差异, 通道 $a=1, 3$ 的透过率需要乘以一个系数 T_a 。通常认为滤光片-偏振片组合的相对透过率是空间均一的。

仪器获得的辐亮度与入瞳前 Stokes 矢量分别为

$$\mathbf{L}_r = [L_{r1} \quad L_{r2} \quad L_{r3}]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{Q} \quad \mathbf{U}]^T, \quad (9)$$

式中: L_{r1}, L_{r2}, L_{r3} 分别为 3 个检偏通道仪器获得的辐亮度。对 Mueller 矩阵进行求逆即可获得偏振响应矩阵, 用于求出目标的 Stokes 矢量, 进而反演目标的偏振态和偏振方位角:

$$\mathbf{S} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{L}_r, \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{M}^{-1}, \quad (11)$$

$$\mathbf{M}^{-1} = \mathbf{M}^* / |\mathbf{M}|, \quad (12)$$

$$\mathbf{M}^* =$$

$$\begin{bmatrix} T_2 T_3 (p_{2,a_2} p_{3,a_3} - p_{2,a_3} p_{3,a_2}) & -T_2 T_3 (p_{1,a_2} p_{3,a_3} - p_{3,a_2} p_{1,a_3}) & T_2 T_3 (p_{1,a_2} p_{2,a_3} - p_{2,a_2} p_{1,a_3}) \\ -T_1 T_3 (p_{2,a_1} p_{3,a_3} - p_{2,a_2} p_{3,a_1}) & T_1 T_3 (p_{1,a_1} p_{3,a_3} - p_{3,a_1} p_{1,a_3}) & -T_1 T_3 (p_{1,a_1} p_{2,a_3} - p_{2,a_1} p_{1,a_3}) \\ T_1 T_2 (p_{2,a_1} p_{3,a_2} - p_{3,a_1} p_{2,a_2}) & -T_1 T_2 (p_{1,a_1} p_{3,a_2} - p_{3,a_1} p_{1,a_2}) & T_1 T_2 (p_{1,a_1} p_{2,a_2} - p_{2,a_1} p_{1,a_2}) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

通过简化并代入 $T_2=1$, 得到

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} -T_3 p_{2,a_2} p_{3,a_1} & T_3 p_{1,a_2} p_{3,a_1} & T_3 (p_{1,a_2} p_{2,a_1} - p_{2,a_2} p_{1,a_1}) \\ 2T_1 T_3 p_{2,a_1} p_{3,a_1} & -2T_1 T_3 p_{1,a_1} p_{3,a_1} & 0 \\ -T_1 p_{2,a_2} p_{3,a_1} & T_1 p_{1,a_2} p_{3,a_1} & -T_1 (p_{2,a_1} p_{1,a_2} - p_{1,a_1} p_{2,a_2}) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$| \mathbf{M} | =$$

$$T_1 T_2 T_3 [p_{1,a_1}(p_{2,a_2} p_{3,a_3} - p_{2,a_3} p_{3,a_2}) - p_{2,a_1}(p_{1,a_2} p_{3,a_3} - p_{3,a_2} p_{1,a_3}) + p_{3,a_1}(p_{1,a_2} p_{2,a_3} - p_{2,a_2} p_{1,a_3})] \quad (15)$$

偏振定标的关键是求出偏振响应矩阵,因此需要求解 T_a 、 p 、 ϵ 和 η ,这些参数是偏振定标的重点。

2.2 水云偏振特性

通过 libRadtran 软件包模拟计算水云的偏振特性^[18]。运用 MYSTIC 矢量辐射传输模型将大气模型简化为三层系统^[19]:第一层为气溶胶和分子层,第二层为光学厚度可调的水云层介质,第三层为光学厚度固定的分子散射层。水云光学厚度设为 5^[20]。气溶胶模型选择为海洋气溶胶模型,865 nm 气溶胶光学厚度设为 0.2,地表反照率设为 0,865 nm 波段处复折射指数 $m = 1.33 + 2.93 \times 10^{-7}i$ ^[21]。采用米氏散射理论求解水云的散射相函数。

图 3 所示是 865 nm 波段相函数和偏振相函数与散射角的关系,在水云有效半径和光学厚度固定的情况下,可见光波段与近红外波段内的偏振特性

类似^[20]。图 3(a)为水云的相函数与散射角的关系,可以看出:相函数在散射角为 60°~104°的范围内随散射角的增大而下降,在散射角为 104°时有极小值;相函数在散射角为 104°~140°的范围内随散射角的增大而增大,在散射角为 140°左右出现极大值,在散射角大于 140°时有抖动,且在较大范围内没有稳定趋势。图 3(b)为水云的偏振相函数与散射角的关系,偏振相函数在散射角为 80°~100°范围内时几乎为 0,说明在这种散射角范围内偏振贡献几乎为 0,散射角在 140°左右时偏振相函数也出现了极大值,且幅度较大,这也是著名的“虹”现象,只有水云具有此现象,而冰云没有此现象^[22],因而据此可以区分冰云与水云。为了选取无偏振影响的定标辐射源,设置偏振相函数阈值为 5×10^{-3} ,则在 78°~104°散射角范围内的水云像元可以作为无偏定标辐射源。

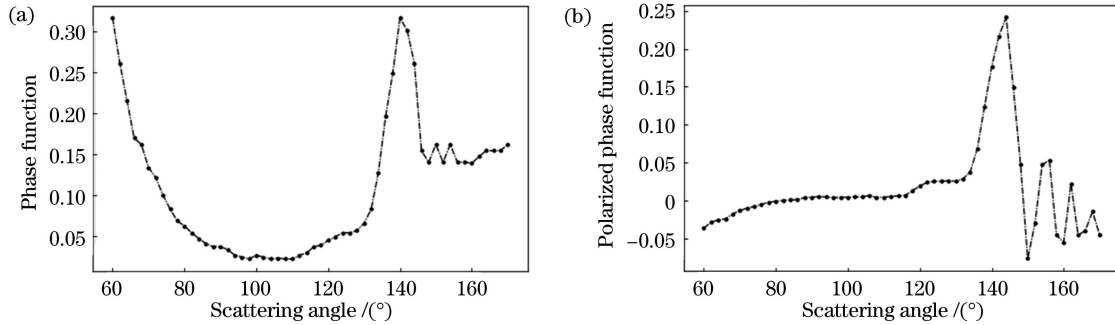


图 3 相函数和偏振相函数与散射角的关系。(a)相函数与散射角的关系;(b)偏振相函数与散射角的关系

Fig. 3 Relationship among phase function, polarized phase function, and scattering angle. (a) Relationship between phase function and scattering angle; (b) relationship between polarized phase function and scattering angle

2.3 水云偏振定标方法

通过云检测挑选出云像元,并计算 140°散射角的偏振相函数,以分辨水云与冰云。最后选出 78°~104°散射角范围内的水云像元,求解 T_a ,再求解与入射角相关的 $\epsilon(\theta)$ 和 p ,最后计算偏振响应矩阵。

获得无偏定标源的方法为:对原始数据进行坏点校正,原始响应值为 14 bit,实际应用中只采用中间 12 bit,如果具有高 DN(digital number)的区域出现突兀暗点,说明进位导致数据超出范围而变小,需要再加上 4096;采用云检测筛选出图像中有云的

像元,计算散射角,挑选出散射角为 140°的云像元,计算其归一化偏振辐亮度。如果出现虹现象,则认为该幅图中的云相态为水云;如果未出现虹现象,则此幅图中云相态为冰云。若该图云相态为水云,则筛选出 70°~104°的水云像元作为无偏定标源。而偏振定标的方法为:采用无偏定标源对仪器偏振特性参量分别进行定标,获得分量与视场角的关系,再求出全视场的 Mueller 矩阵,得到仪器响应辐亮度与目标偏振态的关系。最后对定标方法进行精度分析,确定偏振定标精度。图 4 为在轨偏振定标算法流程图。

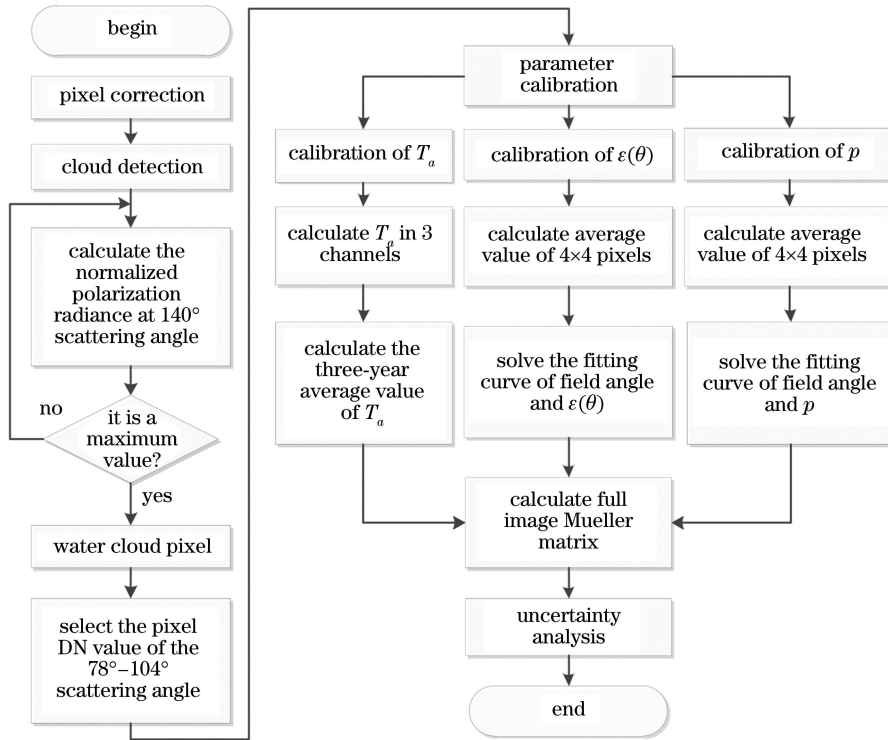


图 4 在轨偏振定标算法流程图

Fig. 4 Flow chart of on-orbit polarization calibration algorithm

3 分析与讨论

3.1 平均相对透过率

平均相对透过率 T_a 与像元位置无关, 只与检偏通道有关。因而计算透过率时需要求平均值, 而

且为了防止其他参数对求解产生影响, 选取 60×60 的中心像元, 因为中心像元 p 为 1, 在求解时可以约去 p ; $\varepsilon(\theta)$ 为 0, 可以忽略。以中间检偏通道 B2 为基准, 求解 B1 与 B3 的平均相对透过率, T_a 的表达式为

$$T_a = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left\{ \frac{L_{r1}(i,j)}{1 + \eta \varepsilon \cos[2\alpha_a(i,j)]} \cdot \frac{1 + \eta \varepsilon \cos[2\alpha_a(i,j)]}{L_{r2}(i,j)} \right\} \approx \frac{1}{N} \sum_{i,j} \frac{L_{r1}(i,j)}{L_{r2}(i,j)}, \quad (16)$$

式中: N 为像元数; L_{r1} 为第一/三检偏通道的辐亮度; L_{r2} 为第二检偏通道的辐亮度; i, j 为像元在像面中的位置; $\alpha_a(i, j)$ 为第 a 个检偏器的角度。

对像元数据进行预处理和云检测, 以确定无偏水云像元的响应值, 求解像元的辐亮度, 最后根据 (16) 式求解 T_a , 并将其与实验室偏振定标结果进行对比验证。

表 1 为滤光片-偏振片组合的平均相对透过率在三年内的变化。其中相对误差 δ 可表示为

$$\delta = \frac{|T_c - T_m|}{T_m} \times 100\%, \quad (17)$$

式中: T_m 为实验室偏振定标中平均相对透过率的测量结果; T_c 为在轨偏振定标中平均相对透过率的计算结果。

从表 1 中的定标结果可以看出, 从年份来看, 2017 年的相对误差最小。相对误差在三年内的整体趋势为先下降后上升。从偏振通道来看, 565 nm 通道的相对误差最小, 即 565 nm 通道的数据与实验室偏振定标结果更为相近。整体来看, 2017 年 565 nm 通道 1 的相对误差最小, 为 0.67%。2016 年 670 nm 通道 3 的相对误差最大, 达到 5.28%。2017 的相对误差最小的可能的原因为 2017 年的数据最全, 2016 年和 2018 年数据较少, 再统计会影响结果的精度。由于 565 nm 通道的相对误差最小, 针对 565 nm 通道进行分析并求解全像面偏振响应矩阵。

3.2 起偏度

在轨飞行条件下, 满足覆盖全像面的厚水云几

表 1 滤光片-偏振片组合的平均相对透过率在三年内的变化

Table 1 Change of average relative transmittance of filter-polarizer combination in three years

Channel	Laboratory polarization calibration result	Annual average value in 2016	Relative error δ in 2016 / %	Annual average value in 2017	Relative error δ in 2017 / %	Annual average value in 2018	Relative error δ in 2018 / %
565 nm, channel 1	1.0266	1.0145	1.17	1.0197	0.67	1.0162	1.01
565 nm, channel 3	1.0493	1.0371	1.16	1.0568	0.71	1.0381	1.06
670 nm, channel 1	1.0105	0.9752	3.49	0.9851	2.51	0.9772	3.29
670 nm, channel 3	1.0060	0.9528	5.28	0.9772	2.86	0.9543	5.13
865 nm, channel 1	1.0263	0.9871	3.81	0.9960	2.95	0.9845	4.07
865 nm, channel 3	0.9833	0.9624	2.12	0.9693	1.42	0.9529	3.09

乎不存在,每幅图像也仅有部分区域满足散射角条件,所以将相近时间段内不同图像中满足散射角条件的水云像元响应值进行值域统一,将其放入面阵像元矩阵(256×256)的对应位置,并进行4×4像元合并,用于求解起偏度 ϵ 在像面上的分布, ϵ 可以表示为

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=i_0}^{i_0+3} \sum_{j=j_0}^{j_0+3} \left\{ 2 \left[L_{r2}(i, j) - \frac{L_{r1}(i, j)}{T_1} \right] \right\}}{16 \cdot 3\eta}, \quad (18)$$

式中: (i_0, j_0) 为4×4像元组中的左上角像元; $\eta = 0.998$ 。将565 nm光谱通道每幅图像中满足散射角条件的水云像元响应值放入面阵像元矩阵的同一位置,并统一响应值的值域范围,将响应值减去本底噪声,并代入 T_1 和 η ,求得4×4像元组的平均值,全视场分布如图5所示。

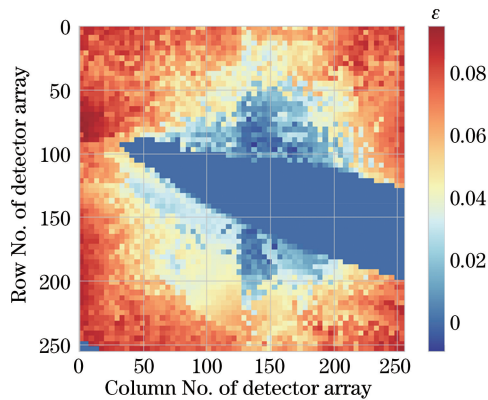


图 5 光学镜头起偏度在像面矩阵中的分布

Fig. 5 Distribution of polarization degree of optical lens in image matrix

取中心像元与(0,0)之间连线上像元的 ϵ 值,按照每个4×4像元组距中心像元的距离 d 的大小顺

序排列,并进行多项式拟合,求解 ϵ 随视场角的变化,拟合公式为

$$\epsilon = a_5 d^5 + a_4 d^4 + a_3 d^3 + a_2 d^2 + a_1 d + a_0, \quad (19)$$

式中: a_l 为系数, $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ 。取中心像元与(255,0)像元之间对角线上像元的 ϵ 值,重复以上步骤,最终求得两条对角线上的拟合曲线。

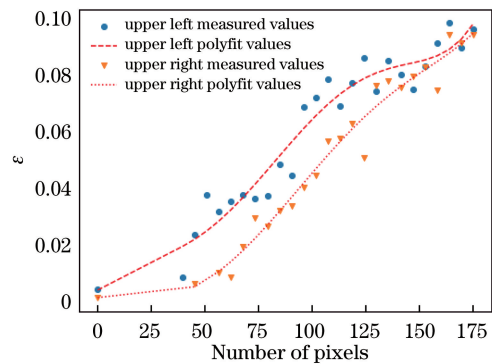


图 6 光学镜头起偏度随像元位置的变化曲线

Fig. 6 Variation in polarization degree of optical lens with pixel position

图6中横坐标为每个4×4像元组位置到中心像元的距离,纵坐标为 $\epsilon(\theta)$,面阵像元矩阵的坐标号与视场角是一一对应的,可用每个4×4像元组位置到中心的距离代替视场角。 $\epsilon(\theta)$ 随视场角的增大而增大,若不进行定标,则会产生较大的偏振误差。从图6中可以看出,两个对角线的值的分布是不同的,并未重合,该现象可能是由光学元件加工、装调误差及探测器的响应非均匀性校正残差等因素导致的,这些因素还导致 $\epsilon(\theta)$ 随视场的变化失去对称性。采用了最小二乘法进行拟合,拟合曲线参数见表2。

表 2 镜头起偏度拟合曲线参数

Table 2 Fitting curve parameters of polarization degree of optical lens

Region	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
Upper left diagonal of image matrix	9.77×10^{-12}	-4.11×10^{-9}	5.70×10^{-7}	2.81×10^{-5}	8.38×10^{-4}	3.94×10^{-3}
Upper right diagonal of image matrix	4.56×10^{-12}	-1.96×10^{-9}	2.56×10^{-7}	6.23×10^{-6}	4.77×10^{-6}	1.31×10^{-3}

对全视场下的 $\epsilon(\theta)$ 进行多项式拟合,得到的拟合结果具有统计特性,多项式拟合操作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,可在一定程度上提高系统的偏振定标精度。

3.3 低频相对透过率

低频相对透过率 p 通常采用沙漠场作为定标源进行定标^[23]。本文方法采用水云进行定标,利用上文求解的 $\epsilon(\theta)$ 分布求解 p :

$$p = \frac{A \cdot \sum_{i=i_0}^{i_0+3} \sum_{j=j_0}^{j_0+3} L_{r2}(i, j)}{16 \cdot I(1 + \eta\epsilon)}, \quad (20)$$

式中: I 为光强。 ϵ 依然采用对 4×4 像元求平均值的结果,将 565 nm 光谱通道每幅图像中满足散射角要求的水云像元响应值放入面阵像元矩阵,并求解 p 的分布,其分布如图 7 所示。从图 7 可以看出,中心区域透过率高,边缘区域透过率低,其中中间区域①是数据缺省区域,左下角也有数据缺省区域。

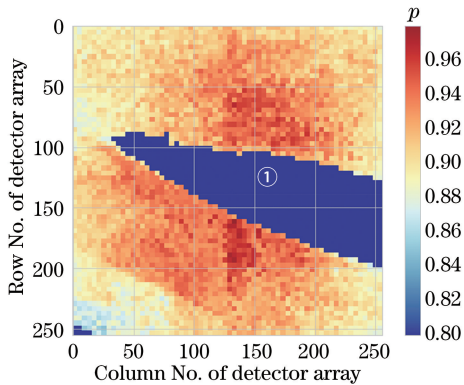


图 7 镜头低频相对透过率像面矩阵分布图

Fig. 7 Distribution of low frequency relative transmittance of optical lens in image matrix

将 $(0,0)$ 至像面中心以及 $(0,255)$ 至像面中心的 p 值,按照像元位置到中心距离的大小进行排序,求解 p 随视场角的变化:

表 3 镜头低频相对透过率拟合曲线参数

Table 3 Fitting curve parameters of low frequency relative transmittance of optical lens

Region	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
Upper left diagonal of image matrix	5.18×10^{-12}	-2.59×10^{-9}	4.60×10^{-7}	-3.66×10^{-5}	7.54×10^{-4}	0.97
Upper right diagonal of image matrix	-1.15×10^{-11}	4.96×10^{-9}	7.57×10^{-7}	4.54×10^{-6}	1.13×10^{-3}	0.97

$$p = b_5 d^5 + b_4 d^4 + b_3 d^3 + b_2 d^2 + b_1 d + b_0, \quad (21)$$

式中: b_s 为系数, $s=0,1,2,3,4,5$ 。

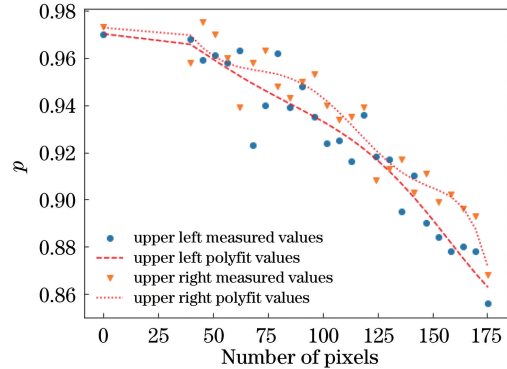


图 8 镜头低频相对透过率随像元位置的变化曲线

Fig. 8 Variation in low frequency relative transmittance of optical lens with pixel position

图 8 为镜头低频相对透过率 p 随像元位置的变化曲线,可以看出, p 随视场角的增大而减小,边缘视场 p 比中心低了近 14%,若不进行标定和修正,则会使仪器测出的 Stokes 参量存在视场非均匀性误差。同时,系统 p 随视场角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。采用最小二乘法进行拟合,镜头低频相对透过率拟合曲线参数如表 3 所示。

将各视场的标定参数代入(7)式,求得系统在全视场下的偏振响应矩阵。该矩阵不包括辐射定标,因为辐射定标是非线性的,不能仅用单一系数表示辐射定标系数。本文只给出中心视场和左右边缘视场的 Mueller 矩阵,如表 4 所示。

由上述定标结果可知,偏振成像仪的自身偏振特性会影响偏振探测结果,而中心视场与边缘视场的 Mueller 矩阵有较大差异,若不进行偏振定标,测量数据会与真实值有较大差异。

表 4 偏振响应矩阵

Table 4 Polarization response matrix

Position	Polarization response matrix
Central field of view	$\begin{bmatrix} 0.992 & -0.494 & -0.857 \\ 0.973 & 0.971 & 0 \\ 1.028 & -0.512 & 0.888 \end{bmatrix}$
Upper left field of view of image matrix	$\begin{bmatrix} 0.826 & -0.332 & -0.760 \\ 0.966 & 0.964 & 0 \\ 0.856 & -0.344 & 0.787 \end{bmatrix}$
Upper right field of view of image matrix	$\begin{bmatrix} 0.831 & -0.338 & -0.762 \\ 0.964 & 0.963 & 0 \\ 0.861 & -0.350 & 0.790 \end{bmatrix}$

3.4 验 证

为了验证采用全像面在轨偏振定标算法求解不同视场偏振响应矩阵的合理性,采用强偏自然定标源海洋耀斑的 MAPI 观测数据,分别通过在轨定标的偏振响应矩阵与实验室定标的偏振响应矩阵求解其偏振度 (DOLP, 其值用 D_{olp} 表示), 其结果如图 9 所示。

如图 9 所示,中心视场偏振度拟合曲线斜率为 1.043,截距为 -0.012 ;而左上角边缘视场斜率为

0.954,截距为 0.077。中心视场偏振度与实验室定标结果吻合度高,其相对误差为 1.22%。而边缘视场偏振度高于实验室定标结果,在偏振度较低时边缘视场已经有一定的偏振度了,甚至达到 0.077。此现象说明仪器在边缘视场时自身有起偏效应。随着偏振度的升高,边缘视场偏振度与实验室定标得到的偏振度差值几乎无变化,说明边缘视场有加性偏振度,在数据反演时需将其去除。

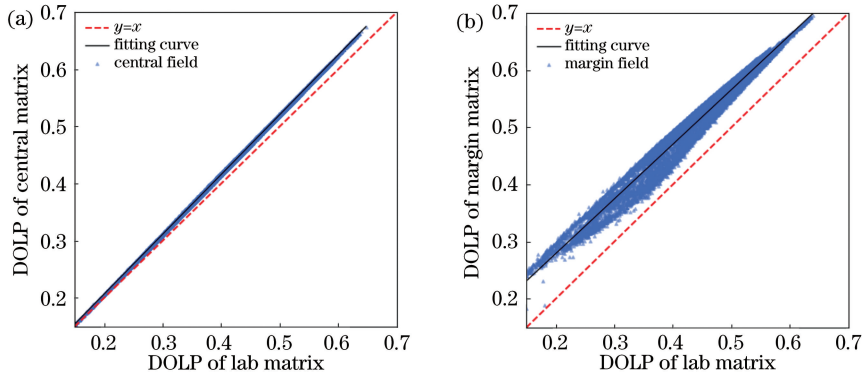


图 9 在轨偏振定标结果与实验室偏振定标结果对比。(a)中心视场;(b)边缘视场

Fig. 9 Comparison between on-orbit polarization calibration results and laboratory polarization calibration results.

(a) Central field; (b) margin field

3.5 精度分析

偏振成像仪器反演目标偏振态的方法为通过辐射定标得到仪器 DN 值与辐亮度的关系,再通过偏振定标获得辐亮度与目标偏振态的关系。目标偏振态可由偏振度与偏振方位角来表示。辐亮度与目标偏振态之间的关系受到仪器的 T_a 、 $\varepsilon(\theta)$ 与 p 的影响。三个检偏通道辐亮度与目标的偏振态是一一对

应的,因而可以采用三个检偏通道的辐亮度来表征目标的偏振状态。拟合的辐亮度与实际辐亮度之间会有一定的误差,而且再次进行全视场低频拟合时也会有误差。这种误差反映了定标的精度,对应仪器全视场空间 p 、 $\varepsilon(\theta)$ 和 T_a 共同影响的精度。将 (2)~(5) 式代入 (1) 式,解析出每一个检偏通道的辐亮度:

$$\bar{L}_{r1} = \frac{p \{ [1 - \eta\varepsilon(\theta)/2] + D_{olp} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta - \varepsilon(\theta)/2] - D_{olp} \cdot \sin(2\beta) \cdot \sqrt{3} \eta/2 \}}{p \{ [1 - \eta\varepsilon(\theta)/2] + D_{olp} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta - \varepsilon(\theta)/2] - D_{olp} \cdot \sin(2\beta) \cdot \sqrt{3} \eta/2 \}} L_{r1}, \quad (22)$$

$$\bar{L}_{r2} = \frac{p \{ [1 + \eta \epsilon(\theta)] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta + \epsilon(\theta)] \}}{p_1 \{ [1 + \eta \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta + \epsilon(\theta)/2] \}} L_{r2}, \quad (23)$$

$$\bar{L}_{r3} = \frac{p \{ [1 - \eta \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta - \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \sin(2\chi) \cdot \sqrt{3} \eta/2 \}}{p_1 \{ [1 - \eta \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta - \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \sin(2\chi) \cdot \sqrt{3} \eta/2 \}} L_{r3}, \quad (24)$$

式中： \bar{L}_{r1} 、 \bar{L}_{r2} 、 \bar{L}_{r3} 分别为拟合出的三个检偏通道辐亮度。采用偏振度与偏振方位角确定偏振态，从而代替 I 、 Q 、 U ，采用差分的方法求解起偏度和低频相对透过率的微小变化量引起的误差。用 $\Delta\epsilon$ 表示 $\epsilon(\theta)$ 拟合中的最大残差绝对值， $\Delta\epsilon=0.014$ ；用 Δp 表示 p 拟合中的最大残差绝对值， $\Delta p=0.019$ 。则偏差 uncertainty 可以表示为

$$u(L_{r1} p) = \frac{\Delta L_{r1}}{L_{r1}} = \frac{\partial \bar{L}_{r1}}{\partial p} \Big|_{\bar{p}=p+\Delta p} \cdot \frac{\Delta p}{L_{r1}} = \frac{p}{p + \Delta p} - 1, \quad (25)$$

$$u(L_{r2} p) = u(L_{r3} p) = u(L_{r1} p), \quad (26)$$

$$u(L_{r1} \epsilon) = \frac{\Delta L_{r1}}{L_{r1}} = \frac{\partial \bar{L}_{r1}}{\partial \epsilon(\theta)} \Big|_{\epsilon(\theta)=\epsilon(\theta)+\Delta\epsilon} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{L_{r1}} = \frac{[1 - \eta \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta - \epsilon(\theta)/2] - D_{\text{olp}} \cdot \sin(2\chi) \cdot \sqrt{3} \eta/2}{1 - \eta [\epsilon(\theta) + \Delta\epsilon]/2 + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot \{ \eta - [\epsilon(\theta) + \Delta\epsilon]/2 \} - D_{\text{olp}} \cdot \sin(2\chi) \cdot \sqrt{3} \eta/2} - 1, \quad (27)$$

$$u(L_{r2} \epsilon) = \frac{\Delta L_{r2}}{L_{r2}} = \frac{\partial \bar{L}_{r2}}{\partial \epsilon(\theta)} \Big|_{\epsilon(\theta)=\epsilon(\theta)+\Delta\epsilon} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{L_{r2}} = \frac{[1 + \eta \epsilon(\theta)] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta + \epsilon(\theta)]}{1 + \eta [\epsilon(\theta) + \Delta\epsilon] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta + \epsilon(\theta) + \Delta\epsilon]} - 1, \quad (28)$$

$$u(L_{r3} \epsilon) = \frac{\Delta L_{r3}}{L_{r3}} = \frac{\partial \bar{L}_{r3}}{\partial \epsilon(\theta)} \Big|_{\epsilon(\theta)=\epsilon(\theta)+\Delta\epsilon} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{L_{r3}} = \frac{[1 - \eta \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot [\eta - \epsilon(\theta)/2] + D_{\text{olp}} \cdot \sin(2\chi) \cdot \sqrt{3} \eta/2}{1 - \eta [\epsilon(\theta) + \Delta\epsilon]/2 + D_{\text{olp}} \cdot \cos(2\chi) \cdot \{ \eta - [\epsilon(\theta) + \Delta\epsilon]/2 \} + D_{\text{olp}} \cdot \sin(2\chi) \cdot \sqrt{3} \eta/2} - 1, \quad (29)$$

式中： $u(L_{r1} p)$ 、 $u(L_{r2} p)$ 、 $u(L_{r3} p)$ 分别为第一、二、三个检偏通道 p 的不确定度； $u(L_{r1} \epsilon)$ 、 $u(L_{r2} \epsilon)$ 、 $u(L_{r3} \epsilon)$ 分别为第一、二、三个检偏通道 ϵ 的不确定度； ΔL_{r1} 、 ΔL_{r2} 、 ΔL_{r3} 分别为第一、二、三个检偏通道拟合值与真实值的偏差。最终求得的 3 个通道的仪器偏差 uncertainty 如图 10 所示，固定 $\beta=90^\circ$ ，DOLP

在 0~1 之间变化。

从图 10(a) 可看出， p 的不确定度不随偏振度的变化而变化，只随 p 值的增大而减小，即对于像面中的像元，中心视场像元 p 较大时 uncertainty 较小，边缘视场 p 较小时 uncertainty 较大，达到 0.012。从图 10(b) 可看出， $\epsilon(\theta)$ 的不确定度受到入射偏振

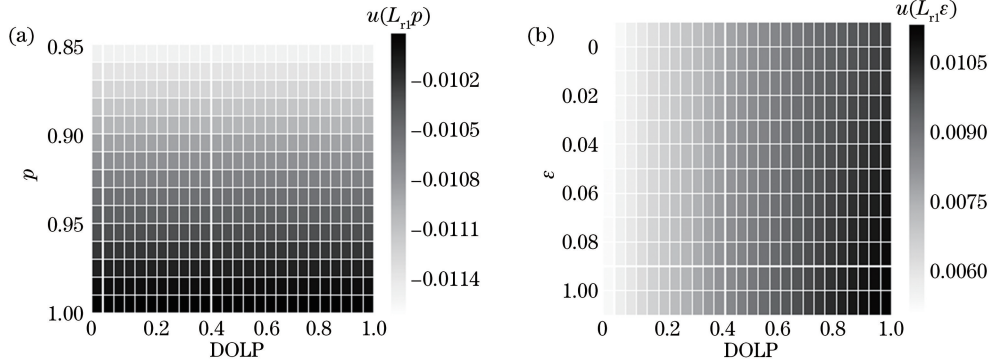


图 10 检偏通道 1 的不确定度。(a) $u(L_{r1} p)$ 随偏振度的变化；(b) $u(L_{r1} \epsilon)$ 随偏振度的变化

Fig. 10 Uncertainty of polarizer channel 1. (a) $u(L_{r1} p)$ varies with degree of polarization;

(b) $u(L_{r1} \epsilon)$ varies with degree of polarization

度和视场角的影响,偏振度越大则不确定度越大,达到 0.011, $\epsilon(\theta)$ 越大,即视场角越大,不确定度也越大。

图 11(a)与图 10(a)的情况类似。从图 11(b)可看出: $\epsilon(\theta)$ 的不确定度受到入射偏振度及视场角的影响,偏振度越小,不确定度越大,达到 0.02; $\epsilon(\theta)$ 越大,即视场角越大,不确定度越小。这是因为

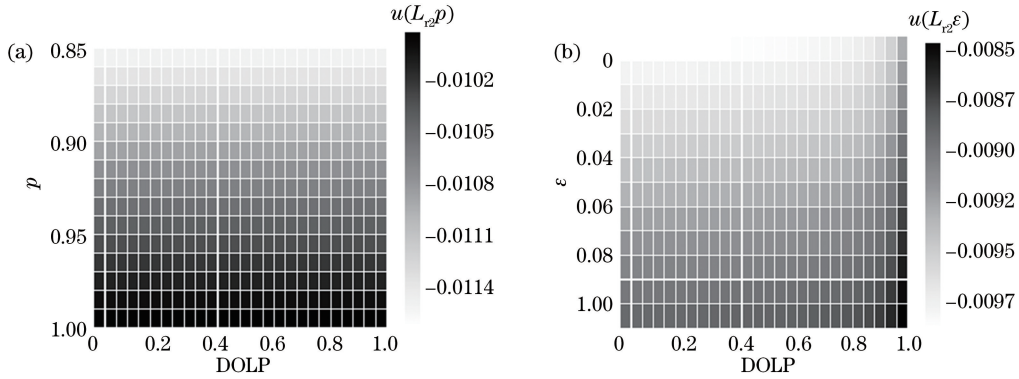


图 11 检偏通道 2 的不确定度。(a) $u(L_{r2}p)$ 随偏振度的变化;(b) $u(L_{r2}\epsilon)$ 随偏振度的变化
 Fig. 11 Uncertainty of polarizer channel 2. (a) $u(L_{r2}p)$ varies with degree of polarization;
 (b) $u(L_{r2}\epsilon)$ varies with degree of polarization

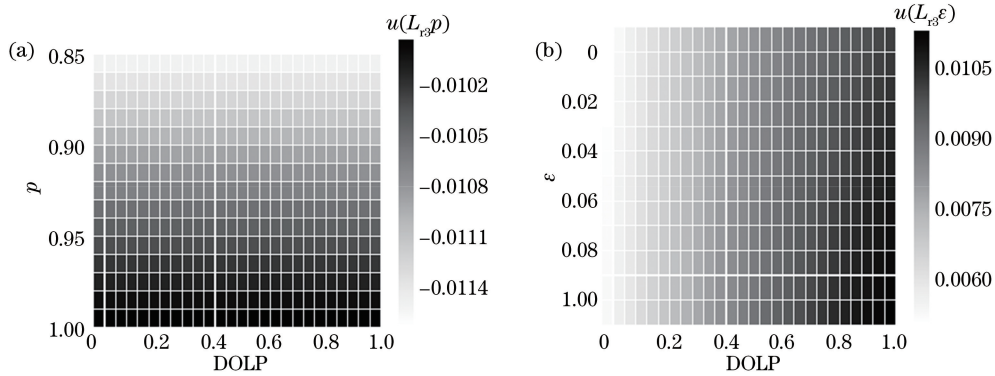


图 12 检偏通道 3 的不确定度。(a) $u(L_{r3}p)$ 随偏振度的变化;(b) $u(L_{r3}\epsilon)$ 随偏振度的变化
 Fig. 12 Uncertainty of polarizer channel 3. (a) $u(L_{r3}p)$ varies with degree of polarization;
 (b) $u(L_{r3}\epsilon)$ varies with degree of polarization

综上所述,565 nm 通道水云在轨偏振定标的全像面合成不确定度为

$$u(s) = \sqrt{u^2(T_i) + u^2(p) + u^2(\epsilon)}, \quad (30)$$

式中: $u(T_i)$ 、 $u(p)$ 、 $u(\epsilon)$ 分别为滤光片-偏振片组合的平均相对透过率、镜头起偏度、镜头低频相对透过率的不确定度。从而可得边缘视场的不确定度为 2.19%, 中心视场的不确定度为 1.27%。

4 结 论

在轨偏振定标对于仪器反演有着重要意义,反映了仪器在轨偏振定标结果的变化。根据 MAPI 的宽视场光学系统特点,推导出了仪器全视场偏振定标模型;根据水云偏振特性,研究了满足无偏定标

偏振方位角设为 90° , 偏振方位角与 0° 透光轴形成消光。

从图 12(a)与图 10(a)情况类似。从图 12(b)可看出: $\epsilon(\theta)$ 的不确定度受到入射偏振度及视场角的影响,偏振度越大,则不确定度越大,达到 0.011; $\epsilon(\theta)$ 越大,即视场角越大,不确定度也越大。

源的水云散射角条件,提出了基于水云的全视场在轨偏振定标方法。进一步求解关键偏振参数,包括 3 个光谱通道的偏振片-滤光片组合的平均相对透过率。针对 565 nm 通道拟合出镜头低频相对透过率、镜头起偏度与视场角的关系,并求解出定标后各个视场下的偏振响应矩阵。利用实验室偏振定标结果进行验证,其中心视场相对误差为 1.22%。最后对定标算法的不确定度进行分析,得到中心视场的不确定度为 1.27%, 边缘视场的不确定度为 2.19%, 满足精度要求。实验结果表明,为提高多角度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。此定标方法

对全视场在轨偏振定标有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Leroy M, Deuzé J L, Bréon F M, et al. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17023-17037.
- [2] Gong P. Some essential questions in remote sensing science and technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 13-23.
宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 13-23.
- [3] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, et al. Results of POLDER in-flight absolute calibration [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3221: 122-131.
- [4] He W J, Fu Y G, Liu Z Y, et al. Three-dimensional polarization aberration functions in optical system based on three-dimensional polarization ray-tracing calculus [J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 128-134.
- [5] Liu Y C, Lo Y L, Liao C C. Compensation of non-ideal beam splitter polarization distortion effect in Michelson interferometer [J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 153-161.
- [6] Ortega-Quijano N, Marvdashti T, Ellerbee Bowden A K. Enhanced depolarization contrast in polarization-sensitive optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2350-2353.
- [7] Li W Q, Zhang C W, Jiang H, et al. Depolarization artifacts in dual rotating-compensator Mueller matrix ellipsometry [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055701.
- [8] Fu L W, Berrier A, Li H Y, et al. Depolarization of a randomly distributed plasmonic meander metasurface characterized by Mueller matrix spectroscopic ellipsometry [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 28056-28064.
- [9] Goloub P, Toubbe B, Herman M, et al. In-flight polarization calibration of POLDER [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2957: 299-310.
- [10] Yang B, Yan C X, Zhang J Q, et al. Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1126-1134.
杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像仪的偏振定标 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1126-1134.
- [11] Dai H, Yan C X, Zhang X J. Polarization performance analysis of aerosol polarimeter [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(4): 280-288.
代虎, 颜昌翔, 张新洁. 气溶胶偏振探测仪偏振特性分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(4): 280-288.
- [12] Qian H H, Meng B H, Yuan Y L, et al. Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(10): 100701.
钱鸿鹄, 孟炳寰, 袁银麟, 等. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析 [J]. *物理学报*, 2017, 66(10): 100701.
- [13] 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 Physica Sinica*, 2011, 60(7): 070702.
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.
- [14] Xiao H L, Hajdas W, Wu B B, et al. In-flight energy calibration of the space-borne Compton polarimeter POLAR [J]. *Astroparticle Physics*, 2018, 103: 74-86.
- [15] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2572: 79-90.
- [16] Yin D K. Multi-angle polarization detection technology [J]. *Infrared*, 2019, 40(1): 1-6, 23.
殷德奎. 多角度偏振探测技术 [J]. *红外*, 2019, 40(1): 1-6, 23.
- [17] Chen X F, Liu L, Ge S L, et al. Research progress for in-flight calibration of the large view polarized multispectral camera [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 343-349.
陈兴峰, 刘李, 葛曙乐, 等. 大视场偏振多光谱相机的在轨辐射定标研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(2): 343-349.
- [18] Emde C, Buras-Schnell R, Kylling A, et al. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1647-1672.
- [19] Cheng T H, Chen L F, Gu X F, et al. Cloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1849-1855.
程天海, 陈良富, 顾行发, 等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证 [J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1849-1855.
- [20] Liu Q, Chu J K, Wang J, et al. Research and simulation analysis of atmospheric polarization

- properties under water cloud condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301004.
- 刘琦, 褚金奎, 王兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析 [J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0301004.
- [21] Kim D, Lee J. Measuring cloud droplet effective radius and liquid water content using changes in degree of linear polarization along cloud depth [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3378-3381.
- [22] Borovoi A G, Konoshonkin A V, Kustova N V, et al. Contribution of corner reflections from oriented ice crystals to backscattering and depolarization characteristics for off-zenith lidar profiling [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 212: 88-96.
- [23] Cosnefroy H, Briottet X, Leroy M, et al. A field experiment in Saharan Algeria for the calibration of optical satellite sensors [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(16): 3337-3359.