

基于海洋耀斑的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术

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

¹中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 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 提出了基于海洋耀斑的在轨偏振定标方法, 首先建立海洋粗糙面模型, 分析洋面耀斑偏振辐射特性; 其次, 考虑到大气辐射传输特性, 使用6SV辐射传输模型计算大气层顶(TOA)的耀斑偏振特性; 然后, 进一步修正气溶胶偏振的影响, 提出TOA偏振度修正公式, 采用t检验方法验证所提公式中新加二次项的显著性; 最后, 建立关于太阳天顶角的修正系数查找表, 得到模拟偏振度。对POLDER 3解析偏振度进行验证, 其相对误差低于2%。利用所提方法对多角度偏振成像仪(MAPI)进行偏振定标, 偏振定标精度约为2%, 可满足仪器偏振精度要求。根据不确定度分析可知, 所提方法的偏振度总不确定度为1.43%。

关键词 遥感; 偏振; 定标; 海洋耀斑; 偏振度

中图分类号 TP732.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1528002

Onboard Polarization Calibration Technique of Multi-Angle Polarization Imager Based on Sun Glint from Ocean

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;

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

³National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract This study reports a method for the calibration of onboard polarization based on sun glint. First, a rough-surface ocean model was used to analyze the polarization radiation characteristics of the sun glint from the ocean. For radiation transmitted through the atmosphere, the 6SV radiation transmission model was used to calculate the polarization characteristics at the top of the atmosphere (TOA). Further, to correct the effects of aerosols, a correction formula for TOA polarization was proposed; the t test was used to verify the significance of the new quadratic term of the correction formula. Finally, the correction coefficient lookup table for solar zenith angles was established to calculate the simulated degree of polarization. Using polarization data obtained from the radiance observed by POLDER 3, the relative error was verified to be less than 2%. Compared with the degree of polarization observed by the multi-angle polarization imager (MAPI), the polarization calibration accuracy was approximately 2%, which meets the requirements of the instrument polarization precision. The uncertainty showed that the synthetic uncertainty of polarization obtained using this method was 1.43%.

Key words remote sensing; polarization; calibration; sun glint from ocean; degree of polarization

OCIS codes 280.1100; 20.5410

1 引言

搭载于天宫-2的多角度偏振成像仪(MAPI)是中国首台星载偏振成像仪器^[1]。多角度偏振成像仪

可有效反演大气气溶胶、水汽以及云的微物理特性, 已被广泛应用于陆地、海洋和大气遥感等领域, 其空间分辨率为3 km, 刈幅为770 km, 多角度测量数为13, 偏振测量精度为2%^[2]。

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-04-17; 录用日期: 2020-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0504900)

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

偏振作为重要的大气探测手段,从 20 世纪 60 年代开始被应用于卫星探测领域。国外最著名的偏振成像仪为法国研制的 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)^[3-4],该仪器可获得多光谱、多角度的偏振成像信息;国内有中国科学院上海技术物理研究所研制的 MAPI、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的多波段云与气溶胶探测器(CAPI)^[5]以及中国科学院安徽光学精密机械研究所的星载多角度偏振成像仪(DPC)^[6]。卫星载荷的运行环境复杂,仪器性能常常出现衰变,因而在轨定标非常必要^[7]。MAPI 无星上定标器,采用自然景物作为定标源。国内外学者对实验室偏振定标的研究较多,而对在轨偏振定标的研究很少。国外方面,由于 POLDER 无星上定标器,Goloub 等^[8]提出一种基于水云与耀斑的在轨偏振定标算法,该算法在太阳天顶角较小时精度较差。国内方面,杨洪春等^[9]将地球反照光作为光源,通过设计星上线偏振定标器(LPC)和非偏振定标器(NPC)来获得偏振态已知的辐射源,从而进行在轨偏振定标;顾行发等^[10]对在轨偏振定标原理和方法进行探索与验证,采用海洋耀斑和水云作为自然定标源,但该方法未考虑大气反射率的修正;李照洲等^[11]也对 DPC 进行在轨偏振定标,采用海洋耀斑作为定标源,该方法与传统方法相同,也未考虑大气反射率的修正。

海洋耀斑的线偏振度高,偏振特性已知,能通过计算推导出其偏振特性,可作为偏振定标源^[12]。结合 Fresnel 和海洋粗糙表面分布模型,可计算得到海洋耀斑的线偏振态^[13]。而在大气辐射传输过程中,分子和气溶胶的偏振态会发生变化,需要考虑大气影响并计算出大气层顶(TOA)处偏振态,才能对仪器解析出的线偏振度进行定标^[14]。POLDER 采用实测大气反射率对 TOA 处偏振度(DOLP)进行修正^[15],但其修正公式没有考虑二次项的影响,且修正系数固定,没有根据太阳天顶角的变化修正系数,其修正精度存在较大的提升空间。

本文对比了 4 种粗糙海面模型,分析每种模型得到的模拟偏振度与 POLDER 3 解析偏振度的相关性;根据实时国家环境预测中心(NCEP)的风速和风向与中分辨率成像光谱仪(MODIS)的 550 nm 气溶胶光学厚度(AOT)数据,提出新的 TOA 偏振度修正公式,并采用 t 检验方法验证所加二次项的显著性;使用麦考特法拟合非线性公式,提高了修正精度。由于修正系数受太阳天顶角的影响,本文还

建立了关于太阳天顶角的修正系数查找表,最终得到修正后的模拟偏振度;采用 POLDER 3 数据对算法进行验证,并用验证的算法对 MAPI 解析偏振度进行定标。

2 仪器介绍

MAPI 是宽视场、多光谱、多角度的偏振成像系统,不仅能探测大气、地物的光谱和偏振信息,还能获得多个角度信息。该仪器由三部分构成:CCD 面阵探测器(256×256 个有效像元)、滤光片-偏振片组合转轮和宽视场光学系统。表 1 所示为 MAPI 光谱通道的参数设置。

表 1 MAPI 通道的参数设置

Table 1 Parameter setting of MAPI channels

| Channel | Central wavelength / μm | Polarization |
|---------|------------------------------------|--------------|
| B1 | 0.565 | Yes |
| B2 | 0.670 | Yes |
| B3 | 0.865 | Yes |
| B4 | 0.763 | No |
| B5 | 0.765 | No |
| B6 | 0.910 | No |

MAPI 拥有 6 个光谱通道,3 个为无偏振通道,3 个为偏振通道。每个偏振通道有 3 个检偏通道可用于解算目标的线偏振特性,另外 1 个通道可用于测量暗电流强度。如图 1 所示,采用滤光轮的方法,即前端共用主光学系统,后端共用面阵探测器,分时获得不同光谱通道的图像。图 1 中划线的通道为检偏通道,每 3 个一组,安装有不同透过方向的偏振片来获取光强信息,通过解析矩阵解析出目标的线偏振特性。利用 MAPI 对目标进行连续观测,可获得目标的双向反射特性,有利于提高定量遥感精度。每个通道单次沿轨飞行可获取目标 13 个角度的观测结果。MAPI 多角度成像原理如图 2 所示,其中 FOV 表示视场,IFOV 表示瞬时视场。

MAPI 通过检偏通道解析 3 个 Stokes 参量 I 、

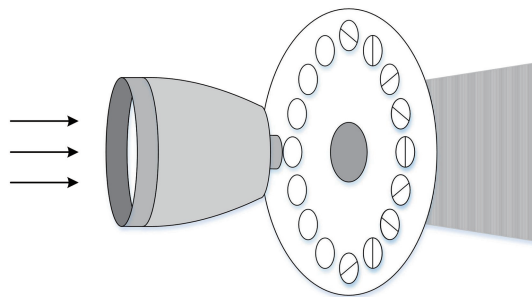


图 1 MAPI 工作原理图

Fig. 1 Schematic of MAPI

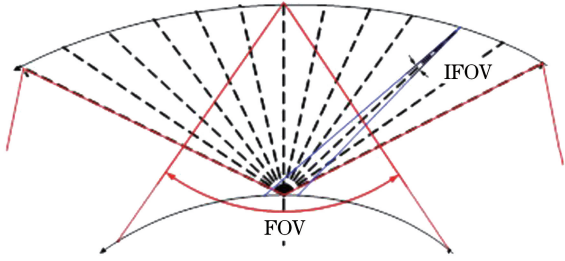


图 2 MAPI 多角度成像原理

Fig. 2 Multi-angle imaging principle of MAPI

Q、U, 检偏通道透过轴方向为 -60° 、 0° 和 60° , 其转换矩阵公式为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: L_1 、 L_2 和 L_3 分别为 3 个检偏通道解算的辐亮度。本研究讨论的偏振度均为线偏振度, 下文中简称“偏振度”。

3 定标方法

本研究的 MAPI 在轨偏振定标采用海洋耀斑作为偏振定标源。在分析洋面耀斑偏振辐射特性的过程中, 首先选取合适的粗糙海面模型进行对比分析; 然后考虑大气辐射传输的影响, 计算 TOA 耀斑偏振度; 最后进行气溶胶偏振特性修正, 得到模拟偏振度, 并采用标准仪器的解析偏振度验证算法的有效性, 再用该算法对目标仪器解析偏振度进行定标。

3.1 耀斑偏振度特性分析

采用耀斑角阈值法确定耀斑区域, 耀斑角小于 30° 时区域可判定为耀斑区域。

偏振度 P_g 是指线偏振光强占总光强的比例, 其定义式^[16]为

$$P_g = \left| \frac{I_{\perp}^2 - I_{\parallel}^2}{I_{\perp}^2 + I_{\parallel}^2} \right|, \quad (2)$$

式中: I_{\perp} 和 I_{\parallel} 分别表示垂直和平行于入射面的光强。

镜面反射时, 在两种介质交界处, 入射角 θ_i 确定, 其反射光的反射率和偏振度都可通过 Fresnel 公式计算得到^[17]。偏振度可以表示为

$$P_g = \frac{2 \sin \theta_i \tan \theta_i \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{n^2 - \sin^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i \tan^2 \theta_i}, \quad (3)$$

式中: n 为折射率。

图 3 所示为入射角与偏振度的变化关系。沿着镜面方向, θ_i 为 53° , 此时反射光为完全线偏振光, 此入射角也称为布儒斯特角。

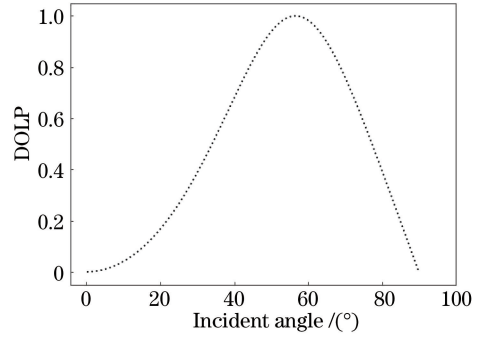


图 3 入射角与偏振度关系

Fig. 3 Relationship between incident angle and DOLP

平静水面可对太阳光产生镜面反射, 但洋面不是理想镜面, 当洋面因风的作用变得粗糙时, 具有适当倾角的微面元反射的光可被遥感仪器观测到^[18]。

图 4 为微面元模型示意图。

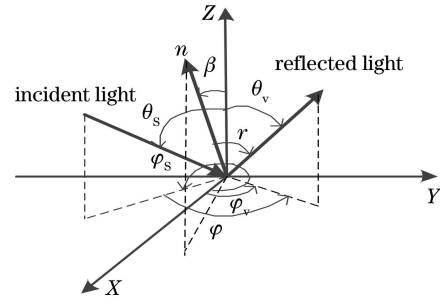


图 4 微面元模型

Fig. 4 Micro-plane model

耀斑的方向反射率可以表示^[19]为

$$\rho_g(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{\pi p(Z'_x + Z'_y) R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v \cos^4 \beta}, \quad (4)$$

式中: θ_s 为太阳天顶角; θ_v 为观测天顶角; φ_s 为太阳方位角, φ_v 为观测方位角, 两者之差为相对方位角; n 为海水的折射率; $R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ 为 Fresnel 反射系数; β 为微面元的倾斜角度; Z'_x 和 Z'_y 分别为倾斜度的两个分量; $p(Z'_x + Z'_y)$ 为微面元的概率密度函数。Zhang 等^[20]利用 MODIS 观测数据, 分析比较了几种主流的粗糙海面模型, 发现各向异性的 Cox-Munk 模型(以下简称“CMA 模型”)在 12 个 MODIS 耀斑观测场景中具有最高的相关系数。而 Cox-Munk Gram-Charlier 模型(以下简称“CMGC 模型”)、各向异性的 Breon-Henriot(以下简称“BHA 模型”)以及 Breon-Henriot Gram-Charlier 模型(以下简称“BHGC 模型”)也拥有较高的相关系数。4 种模型的区别仅在于 $p(Z'_x + Z'_y)$ 不同, 其模型参数见文献[20]。采用以上 4 种模型分别进行在轨偏振定标实验。

风速影响海面粗糙度,进而影响洋面的反射率和白沫^[21]。风速对反射率和偏振度的影响如图 5 所示。

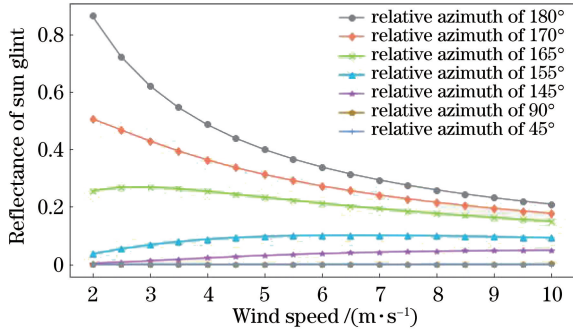


图 5 风速对耀斑反射率的影响

Fig. 5 Effect of wind speed on reflectance of sun glint

由图 5 可知:当相对方位角大于 160°时,反射率随风速增大而减小;当相对方位角小于 160°时,反射率随风速增大而略增大。风速增大时,反射率减小,但对偏振度无影响。白沫的产生会导致偏振度降低,因此需要限定风速来降低其对偏振度的影响。通常将风速限定在 4~7 m/s 范围内,对应的反射率为 0.2~0.6。

3.2 大气辐射传输

TOA 处偏振度即为进入 MAPI 的偏振度,其模型^[8]可以近似描述为

$$\rho_{\text{TOA}} \approx (\rho_g + \rho_w + \rho_f) \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a, \quad (5)$$

$$\rho_{\text{pol-TOA}} \approx \rho_{\text{pol-g}} \exp(-M\delta) + \rho_{\text{pol-m}} + \rho_{\text{pol-a}}, \quad (6)$$

式中: ρ_{TOA} 和 $\rho_{\text{pol-TOA}}$ 分别是 TOA 处反射率和偏振反射率; ρ_m 和 $\rho_{\text{pol-m}}$ 分别是分子反射率与分子偏振反射率; ρ_a 和 $\rho_{\text{pol-a}}$ 分别是气溶胶反射率和气溶胶偏振反射率; ρ_g, ρ_w, ρ_f 分别为海洋耀斑的反射率、离水辐亮度和白沫的反射率,在耀斑偏振定标中, ρ_w 和 ρ_f 是干扰项; M 为空气质量因子; δ 为大气总光学厚度。在风速设定为 4~7 m/s 的条件下,可忽略白沫的影响。565, 670, 865 nm 这 3 条通道对应的离水辐亮度 ρ_w 分别为 0.0072, 0.00048, 0。采用 865 nm 通道作为定标基准,865 nm 通道 TOA 处的偏振度为

$$P_{\text{TOA}} \approx \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a}, \quad (7)$$

式中: P_g, P_m, P_a 分别为海洋耀斑、分子和气溶胶的偏振度。

采用 6SV 矢量辐射传输模型计算白沫、大气上行辐射的分子与气溶胶的偏振度、反射率等参数。

本研究选择宽阔无云的热带海域的海洋耀斑进行定标,因此设置大气环境模型为热带,选用典型的海洋气溶胶模型。采用仪器实际观测几何角并选择 865 nm 通道作为基准通道。从 NCEP 风速再分析产品中读取风速风向,从 MODIS 的 Aqua 星气溶胶月平均产品中读取 550 nm 的 AOT。选择海洋双向反射分布函数(BRDF)模式,输入的海水盐度为 3.43‰,叶绿素的质量浓度为 0.05 mg·m⁻³^[22],最终得到 ρ_m, P_m, ρ_a, P_a 与 δ ,用于计算 TOA 处偏振度。

3.3 修正

数据分析显示, $P_{\text{TOA}} < P_g$,这是由大气传输中分子、气溶胶散射导致的。(7)式只考虑了各种影响的叠加,实际的传输过程中要考虑几种影响因素的耦合。用相对差异 ξ 来表征这种耦合作用,即

$$\xi = \frac{P_{\text{TOA}} - P_g}{P_g}. \quad (8)$$

本研究借鉴 POLDER 模型^[8]进行数值模拟,发现 ξ 对 AOT 敏感,而对气溶胶模型的敏感度较低。图 6 所示为大气反射率 ρ_{TOA} 与 ξ 的变化关系,其中 δ_{550} 为 550 nm 气溶胶光学厚度,可以看出 δ_{550} 取不同数值时, $\ln \xi$ 随 $\ln \rho_{\text{TOA}}$ 的变化曲线的斜率基本相同,表明 δ_{550} 对 ξ 与 ρ_{TOA} 的关系几乎没有影响。 ξ 可表示为

$$\xi = K \rho_{\text{TOA}}^\gamma, \quad (9)$$

式中: K 为系数; ρ_{TOA} 表示 TOA 处的总反射率; $\gamma = -1.1 \pm 0.1$,此处的 γ 是通过固定 θ_s ,利用 θ_v 与多种 AOT 计算得到的。

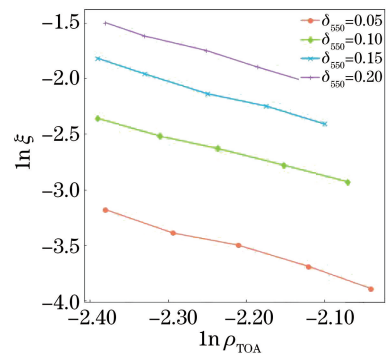


图 6 ρ_{TOA} 与 ξ 的关系

Fig. 6 Relationship between ρ_{TOA} and ξ

865 nm 波段分子散射对 TOA 处反射率的影响很小,而气溶胶对其影响大,这得益于 MAPI 的多角度观测特性。同一目标的观测角度差异大,选择该目标相对方位角为 0°的背向观测值,求出修正大气反射率 ρ_{atm}^* 为

$$\rho_{\text{atm}}^* = \rho_{\text{atm}} - \rho_{\text{atm-m}}, \quad (10)$$

式中: $\rho_{\text{atm-m}}$ 为去除气溶胶影响的大气反射率; ρ_{atm}^* 表示消除分子影响的大气反射率。

风速为 2, 5, 10, 20 m/s 时, ρ_{atm}^* 与 ξ 的变化关系如图 7 所示。

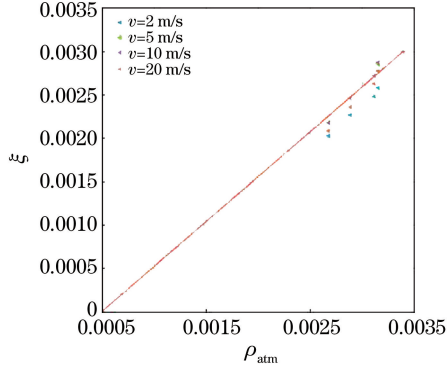


图 7 不同风速下 ρ_{atm}^* 与 ξ 的变化关系

Fig. 7 Relationship between ρ_{atm}^* and ξ with different wind speeds

由图 7 可知, ρ_{atm}^* 与 ξ 存在非完全线性关系, 其中曲线有截距项, 结合(10)式, 其关系可假设为

$$\xi = a_0 + a_1 \cdot \rho_{\text{TOA}}^\gamma + a_2 \cdot \rho_{\text{TOA}}^\gamma \cdot \rho_{\text{atm}}^* + a_3 \cdot \rho_{\text{TOA}}^\gamma \cdot (\rho_{\text{atm}}^*)^2, \quad (11)$$

式中: $a_j (j=0, 1, 2, 3)$ 为与 θ_s 有关的系数。

与文献[15]的修正公式相比, (11)式多了气溶胶反射率的二次项, 采用 t 检验方法来分析气溶胶反射率二次项的影响。原假设 H0: 二次项对结果无显著影响; 备选假设 H1: 二次项对结果有显著影响。经过计算查表可知, 所加二次项对结果有显著影响。

为增加定标算法的适用性, 采用 6 种 AOT (0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.07, 0.10), 4 种风速 (4, 5, 6, 7 m/s), 观测几何角 $\theta_s \in (40^\circ, 50^\circ)$ 、 $\theta_v \in (40^\circ, 45^\circ)$, 拟合求出系数 a_0, a_1, a_2, a_3 以满足收敛判断要求。

不同 θ_s 对应的系数差异较大, 如只选择一组固定系数, 低偏振度下不能很好拟合反射率与 ξ 的关系。因此建立系数查找表, 计算不同 θ_s 作用下的系数, 在定标时通过代入不同的 θ_s 来查找对应的系数。可使用 ρ_{atm}^* 、 ρ_{TOA} 来求出大气修正后的 TOA 处的偏振度 $P_{\text{re}}^{[8]}$:

$$P_{\text{re}} = P_g(1 + \xi). \quad (12)$$

TOA 处偏振度 P_{TOA} 与修正后模拟偏振度 P_{re} 的对比如图 8 所示, 可以看出, 分布为一条直线, 经过最小二乘法拟合, 可得到

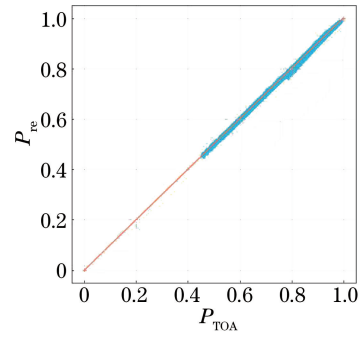


图 8 TOA 处偏振度 P_{TOA} 与修正后模拟偏振度 P_{re} 的对比

Fig. 8 Comparison of P_{TOA} and P_{re}

$$P_{\text{re}} = a \cdot P_{\text{TOA}} + b, \quad (13)$$

式中: $a = 0.9975$; $b = 0.0023$ 。相关系数 $r = 0.9997$, (11) 式中系数 a_2 的值最大, a_2 在 $\theta_s = 47.3^\circ$ 取得最大值, 为 0.927。

4 验证与不确定度分析

4.1 验证

数据挑选的标准如下: 风速为 4~7 m/s, 选择具有高偏振度的耀斑区域, $\theta_s \in (40^\circ, 50^\circ)$, $\theta_v \in (40^\circ, 45^\circ)$, $\varphi \in (160^\circ, 180^\circ)$, 并以粗糙海面“微面元”的倾斜角度为阈值。图 9 所示为不同阈值下的偏振度对比。

为验证本文算法的精度, 选择 PARASOL 卫星搭载的 POLDER 3 载荷解析偏振度为标准, 对本文算法修正的 TOA 处的偏振度与 POLDER 3 解析偏振度进行比较, 再采用本文算法对 MAPI 观测数据进行定标。

选取 2012 年 8 月 30 日 POLDER 3 观测数据, 并通过 NCEP 10 m 风速产品获得风速和风向, 通过 MODIS Aqua 的月平均气溶胶产品 MYD04 得到 550 nm 的 AOT。代入 4 种粗糙海面模型, 其他条件不变, 得到修正后模拟 TOA 线偏振度, 与 POLDER 3 解析线偏振度进行对比。采用与文献[20]一致的评价指标——相关系数、斜率、截距对 4 种模型进行量化分析, 结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 在 3 个光谱通道中, 865 nm 通道在 4 种模型中都有最大的相关系数。对于 865 nm 通道, BHA 模型拥有最高的相关系数、最接近 1 的斜率和最接近 0 的截距。CMGC 和 BHGC 模型的相关系数较小, CMA 模型的相关系数与 BHA 接近。在 670 nm 通道上也有相似的结论。而在 490 nm 通道上, CMGC 与 BHGC 的相关系数较大, 而 CMA 与 BHA 的相关系数较小。BHA 模型在

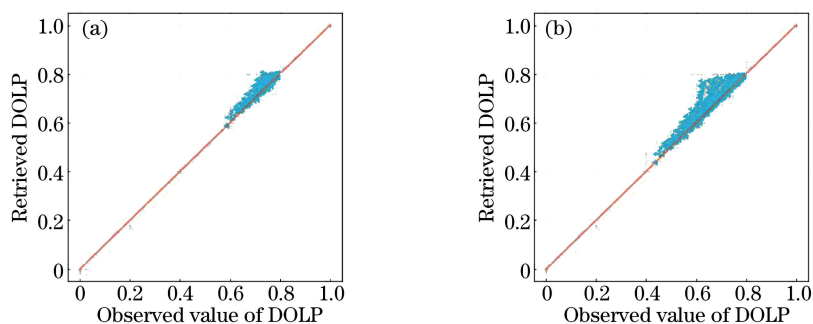


图 9 不同 β 下解析偏振度与模拟偏振度的对比。(a) $\beta < 6^\circ$; (b) $\beta < 7^\circ$

Fig. 9 Comparison between observed DOLP and retrieved DOLP with different β . (a) $\beta < 6^\circ$; (b) $\beta < 7^\circ$

表 2 4 种模型评估结果

Table 2 Evaluation results of four models

| Channel | Parameter | CMGC model | CMA model | BHGC model | BHA model |
|---------|-------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| 865 nm | Correlation coefficient | 0.965 | 0.966 | 0.965 | 0.966 |
| | Intercept | 0.016 | 0.013 | 0.017 | 0.002 |
| | Slope | 0.946 | 0.937 | 0.942 | 0.987 |
| 670 nm | Correlation coefficient | 0.947 | 0.947 | 0.947 | 0.948 |
| | Intercept | 0.016 | 0.022 | 0.015 | 0.017 |
| | Slope | 0.924 | 0.926 | 0.925 | 0.929 |
| 490 nm | Correlation coefficient | 0.929 | 0.927 | 0.928 | 0.927 |
| | Intercept | -0.018 | -0.008 | -0.009 | -0.011 |
| | Slope | 1.042 | 1.052 | 1.043 | 1.062 |

2 个检偏通道内都有最高的相关系数,故选用 BHA 粗糙海面模型。

各向异性(CMA、BHA)模型的相关系数均高于 CMGC 和 BHGC,与文献[20]的结论一致。而 BHA 相关系数略高于 CMA,这与文献[20]的结论相反,这是因为 BHA 模型使用了 POLDER 的反射数据对 CM 模型进行参数优化,因而解析偏振度与 BHA 模型的相关系数最高。

865 nm 通道的耀斑解析偏振度与修正后模拟偏振度的对比如图 10 所示,865 nm、670 nm、490 nm 3 个通道的观测值与模拟值的相对误差如图 11 所示。

从图 11 可以看出,3 个光谱波段的模拟偏振度与解析偏振度值接近,在偏振度值较大的区域内,模拟偏振度略高于解析偏振度。865,670,490 nm 这 3 个通道的相对误差分别为 1.46%、1.76% 和 1.97%,均低于 2%。这在一定程度上验证了模拟

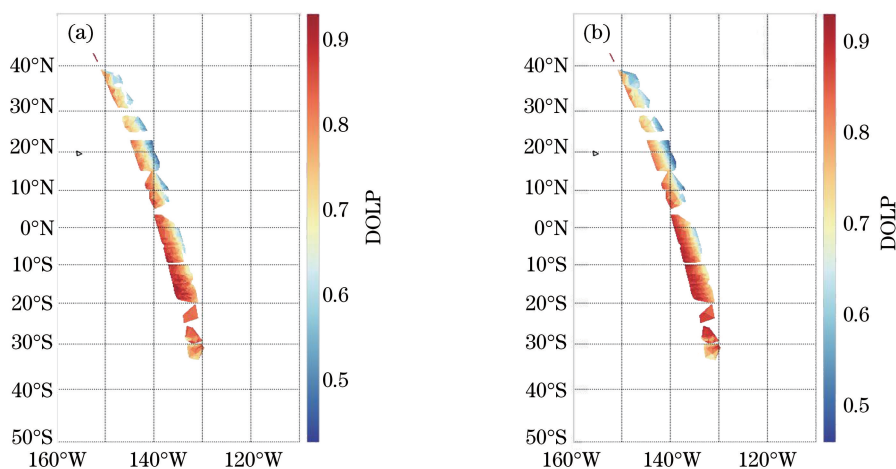


图 10 865 nm 通道的耀斑解析偏振度。(a) POLDER 3 解析偏振度;(b)修正后模拟偏振度

Fig. 10 DOLP of flare at 865 nm channel. (a) Observed DOLP of POLDER 3;(b) retrieved DOLP

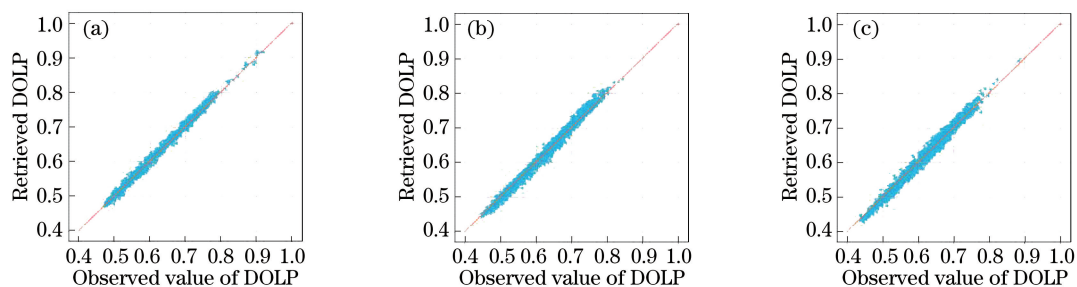


图 11 不同通道的 POLDER 3 解析偏振度与修正后模拟偏振度的变化关系。(a) 865 nm;(b) 670 nm;(c) 490 nm

Fig. 11 Comparison between observed DOLP of POLDER 3 and retrieved DOLP at different channels.

(a) 865 nm; (b) 670 nm; (c) 490 nm

偏振度算法的合理性。

4.2 定标结果

选用 2016 年 10 月 13 日 MAPI 观测数据,并采用 NCEP 10 m 风速风向产品和 MODIS 550 nm 气

溶胶光学厚度产品选择几何条件满足要求的耀斑区域点进行云检测与去除,在 865 nm 通道下得到的结果如图 12 所示,3 个波段的解析偏振度与修正后模拟偏振度的对比结果如图 13 所示。

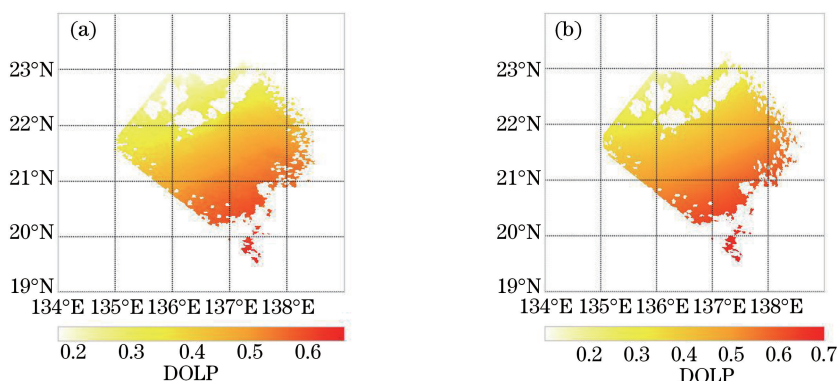


图 12 865 nm 通道的 MAPI 解析偏振度 (a) MAPI 解析偏振度;(b)修正后模拟偏振度

Fig. 12 DOLP of MAPI at 865 nm channel. (a) Observed DOLP of MAPI;(b) retrieved DOLP

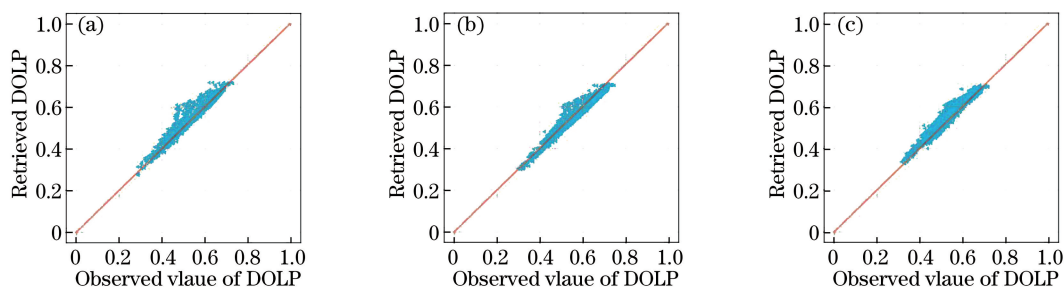


图 13 不同通道的 MAPI 解析偏振度与修正后模拟偏振度的变化关系。(a) 865 nm;(b) 670 nm;(c) 490 nm

Fig. 13 Comparison between MAPI observed DOLP and retrieved DOLP at different channels.

(a) 865 nm; (b) 670 nm; (c) 490 nm

由图 13 可知,点均集中在 $y = x$ 直线附近,模拟计算的偏振度比解析偏振度偏大,可能是因为观测区域有薄云,解析偏振度降低。

筛选 2016—2018 年 MAPI 观测数据,得到 73 个热带海域耀斑样本。865 nm 波段由于受离水辐亮度、分子散射的影响较小,相对误差最小,达到 1.73%;565 nm 波段受水辐亮度的影响不能忽

略,且受分子散射的影响大,相对误差最大,为 2.43%;670 nm 波段的相对误差在两者之间,为 1.89%。用偏振度的相对误差进行表征,偏振定标精度均在 2% 左右。

4.3 不确定度分析

通过分析计算各因素的不确定度贡献,求得合成不确定度,最后汇总每个因素的不确定贡献。

1) 假设参数的影响

模型简化以及参数假设值会对结果产生影响,如海洋盐度和海洋叶绿素浓度。各假设值与真实值差异不大,仅列主要假设的影响,叶绿素的质量浓度

取 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,海水盐度取 3.43% 。叶绿素的质量浓度和海水盐度在不同热带海域的差距为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.2% ,假设参数贡献的不确定度为

$$u_p = \frac{\sqrt{\Delta P_{re}(g)^2 + \Delta P_{re}(s)^2}}{P_{re}}, \quad (14)$$

$$\Delta P_{re}(g) = \left\{ a \left\{ \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{[\rho_g + \rho_w(g)] \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} - \frac{\rho_g P_g \exp(-\delta M) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} \right\} / \rho_w(g) \right\} \cdot \frac{\partial \rho_w(g)}{\partial g}, \quad (15)$$

$$\Delta P_{re}(s) = \left\{ a \left\{ \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{[\rho_g + \rho_w(s)] \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} - \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} \right\} / \rho_w(s) \right\} \cdot \frac{\partial \rho_w(s)}{\partial g}, \quad (16)$$

式中: g 为海洋叶绿素的质量浓度; s 为海洋盐度。

2) 风速引用的影响

NCEP 的 10 m 风速产品是再分析得到的,相较于实测的精度较低,而风速对耀斑反射率的影响较大,在 $4 \sim 7 \text{ m/s}$ 范围内,偏差不小于 0.23 m/s 。风速贡献的不确定度 u_{ws} 为

$$u_{ws} = \frac{\Delta P_{re}(v_{ws})}{P_{re}}, \quad (17)$$

$$\Delta P_{re}(v_{ws}) = \frac{\partial P_{re}}{\partial v_{ws}} = \frac{a [P_g \exp(-M\delta) \cdot (\rho_m + \rho_a) - \exp(-M\delta) \cdot (\rho_m P_m + \rho_a P_a)]}{[\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a]^2} \cdot \frac{\partial \rho_g}{\partial v_{ws}}, \quad (18)$$

式中: v_{ws} 为风速; $\frac{\partial \rho_g}{\partial v_{ws}}$ 采用程序求偏导得到。

3) 离水辐亮度的影响

考虑到水体反射的影响,565,670,865 nm 这 3 个波段的离水反射率分别为 $\rho_w = 0.0072, 0.00048, 0$ 。离水辐亮度贡献的不确定度为

$$u_w = \frac{\Delta P_{re}(w)}{P_{re}}, \quad (19)$$

$$\Delta P_{re}(w) = a \left[\frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{(\rho_g + \rho_w) \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} - \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} \right] / \rho_w, \quad (20)$$

式中: w 为离水辐亮度。采用局部线性化的方法进行求导,可得到离水辐亮度的不确定度贡献。

4) 白沫的影响

为了防止白沫对偏振度产生影响,选取 $4 \sim 7 \text{ m/s}$ 风速的海域,其白沫反射率约为 1.9×10^{-4} 。白沫贡献的不确定度为

$$u_f = \frac{\Delta P_{re}}{P_{re}}, \quad (21)$$

$$\Delta P_{re} = a \left[\frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{(\rho_g + \rho_f) \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} - \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a} \right] / \rho_f. \quad (22)$$

同样采用局部线性化的方法进行求导,可得到白沫的不确定度贡献。

5) 总光学厚度影响

考虑 6SV 模型采用 550 nm AOT 计算总光学厚度,总光学厚度对耀斑偏振度有退偏作用,海洋上空 AOT 偏差约为 0.05,总光学厚度贡献的不确定度为

$$u_{ot} = \frac{\Delta P_{re}(\delta)}{P_{re}}, \quad (23)$$

$$\Delta P_{re}(\delta) = \frac{\partial P_{re}}{\partial \delta} = \frac{aM\rho_g \exp(-M\delta) [\rho_m(P_m - P_g) + \rho_a(P_a - P_g)]}{[\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a]^2} \quad (24)$$

其他因素包括数据引用的截断、气体吸收等对不确定度的贡献较小,并未列入合成不确定度。偏振度的合成不确定度为

$$u_{total} = \sqrt{u_p^2 + u_{ws}^2 + u_w^2 + u_f^2 + u_{ot}^2} \quad (25)$$

各不确定度如表 4 所示,可以看到,3 个通道偏振度的合成不确定度最大值为 1.43%。

表 4 3 个通道偏振度的不确定度

Table 4 Uncertainty of degree of polarization of three channels

| Channel | 865 nm | 670 nm | 565 nm |
|--|--------|--------|--------|
| Hypothesis uncertainty / % | 0.11 | 0.14 | 0.21 |
| Wind speed uncertainty / % | 1.18 | 1.18 | 1.19 |
| Water-leaving radiance uncertainty / % | 0 | 0.02 | 0.08 |
| Foam reflectance uncertainty / % | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Optical thickness uncertainty / % | 0.79 | 0.76 | 0.76 |
| Synthetic uncertainty / % | 1.42 | 1.41 | 1.43 |

5 结 论

根据偏振反射理论,推导了海洋耀斑偏振模型,分析了不同粗糙海面模型对算法精度的影响。根据大气辐射传输模式,得到 TOA 偏振度。基于大气偏振影响分析,提出了 TOA 偏振度修正公式,采用 t 检验方法验证所提修正公式二次项的显著性。建立了修正系数查找表。经与 POLDER 3 比对,验证了所提方法的合理性,并对 MAPI 进行偏振定标。分析并求解所提算法的合成不确定度。采用系数查找表得到不同太阳天顶角下的修正系数,其定标结果在太阳天顶角较大时与固定系数法的精度相当,在太阳天顶角较小时系数查找表方法的误差减小了,该法在 $\theta_s \in (40^\circ, 50^\circ)$ 时都有很好的表现。采用所筛选的数据样本,865 nm 波段所提算法的精度为 1.46%,MAPI 偏振定标精度为 1.73%。

不确定度的分析结果显示,风速、气溶胶产品的数值偏差对结果不确定度的贡献较大,如能采用实地测量值将提升算法的精度。该研究对于提高仪器测量精度具有一定的意义,为在轨偏振定标研究提供了有效的验证手段,有利于提高偏振遥感定量化

反演海洋、气溶胶等参数的精度。

参 考 文 献

- [1] Zhang W. Progress of Tiangong-2 space science and application mission [J]. Space International, 2016 (12):18-23.
张伟. 天宫-2 空间科学与应用任务及进展 [J]. 国际太空, 2016(12):18-23.
- [2] Gao M, Zhao G H, Gu Y D. Space science and application mission in China's space station [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 721-732.
高铭, 赵光恒, 顾逸东. 我国空间站的空间科学与应用任务 [J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 721-732.
- [3] Peers F, Bellouin N, Waquet F, et al. Comparison of aerosol optical properties above clouds between POLDER and AeroCom models over the South East Atlantic Ocean during the fire season [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(8): 3991-4000.
- [4] Deschamps P Y, Breon F, Leroy M, et al. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 598-615.
- [5] Chen X, Yang D X, Cai Z N, et al. Aerosol retrieval sensitivity and error analysis for the cloud and aerosol polarimetric imager on board TanSat: the effect of multi-angle measurement [J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 183.
- [6] Yang W F, Hong J, Qiao Y L. Optical design of spaceborne directional polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822005.
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 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.
- [7] 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.
- [8] Goloub P, Toubbe B, Herman M, et al. In-flight polarization calibration of POLDER [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2957: 299-310.
- [9] Yang H C, Yang B Y, Song M X, et al. Onboard polarimetric calibration methods of spaceborne scanning polarimeter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110002.
杨洪春, 杨本永, 宋茂新, 等. 星载偏振扫描仪的星

- 上偏振定标方法[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110002.
- [10] 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.
- [11] Li Z Z, Qie L L, Xie Y S, et al. In-flight polarimetric calibration of directional polarization camera on GF-5 satellite[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(01): 22-27.
李照洲, 伽丽丽, 谢一淞, 等. GF-5 卫星多角度偏振成像仪在轨偏振定标 [J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(01): 22-27.
- [12] Harten G V, Diner D J, Daugherty B J S, et al. Calibration and validation of Airborne Multiangle Spectro Polarimetric Imager (AirMSPI) polarization measurements[J]. Applied Optics, 2018, 57(16): 4499-4513.
- [13] Chen X F, Gu X F, Cheng T H, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1648-1653.
陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1648-1653.
- [14] Harmel T, Chami M. Estimation of the sunglint radiance field from optical satellite imagery over open ocean: multidirectional approach and polarization aspects[J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(1): 76-90.
- [15] Toubbe B, Bailleul T, Deuze J L, et al. In-flight calibration of the POLDER polarized channels using the Sun's glitter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 513-524.
- [16] Born M, Wolf E. Historical introduction [J]. Principles of Optics Edition, 1980, 68(1): xxi-xxviii.
- [17] O'Brien D M, Polonsky I, O'Dell C, et al. Testing the polarization model for TANSO-FTS on GOSAT against clear-sky observations of sun glint over the ocean [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(12): 5199-5209.
- [18] Shaw J A, Vollmer M. Blue sun glints on water viewed through a polarizer [J]. Applied Optics, 2017, 56(19): G36.
- [19] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838-850.
- [20] Zhang H, Wang M H. Evaluation of sun glint models using MODIS measurements [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2010, 111(3): 492-506.
- [21] Gao J, Wang S P, Gu X F, et al. The polarization characteristics distribution and correction method of the polarization coupling error in ocean remote sensing system [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1633-1638.
高军, 王舒鹏, 顾行发, 等. 海洋遥感偏振特性分布与偏振误差补偿方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1633-1638.
- [22] Yang B, Yan C X. Multi-spectral polarized properties of ocean aerosol [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 2736-2741.
杨斌, 颜昌翔. 海洋气溶胶多光谱偏振特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 2736-2741.