

引用格式: TU Bihai, YAO Pingping, LI Shu, et al. Polarization Parameter Validation of Directional Polarimetric Camera Based on Cloud Polarization[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0512003

涂碧海,姚萍萍,李树,等.基于云偏振的偏振成像仪参量检验方法[J].光子学报,2021,50(5):0512003

基于云偏振的偏振成像仪参量检验方法

涂碧海^{1,2,3},姚萍萍^{1,3},李树⁴,提汝芳^{1,3},孟炳寰^{1,3},黄禅^{1,2,3},洪津^{1,3}

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所,合肥 230031)

(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

(3 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,合肥 230031)

(4 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院,广西 桂林 541004)

摘要:依据云偏振辐射传输仿真结果,选取具有偏振虹特性的水云作为实验目标,对关键偏振参量的空间环境适应性进行检验。针对偏振成像仪宽幅成像特点,通过云相态识别大面积水云,使用水云不同检偏方向的测量数据,根据仪器偏振辐射模型,对相对透过率、起偏度参量进行检验。计算结果表明:相对透过率变化小于0.2%,光学镜头起偏度变化小于0.01,仪器状态稳定,同时验证了偏振成像仪通过云偏振特性对云相态的辨识能力。检验方法及结果可为偏振成像仪在轨检测、定标提供依据,为使用多角度偏振数据的云反演应用提供参考。

关键词:测量;偏振成像仪;云偏振;云相态;相对透过率

中图分类号:TH386.5

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215005.0512003

Polarization Parameter Validation of Directional Polarimetric Camera Based on Cloud Polarization

TU Bihai^{1,2,3}, YAO Pingping^{1,3}, LI Shu⁴, TI Rufang^{1,3}, MENG Binghuan^{1,3}, HUANG Chan^{1,2,3}, HONG Jin^{1,3}

(1 *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China*)

(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(3 *Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China*)

(4 *College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract: According to the simulation results of cloud polarization radiative transfer, the water cloud with polarization rainbow characteristics is selected as the experimental target to test the space environment adaptability of key polarization parameters. On the basis of the characteristics of polarization imager directional polarimetric camera, the large area water cloud is identified by cloud phase state. The relative transmittance and polarizability parameters are verified according to the polarization radiation model of the instrument by using the measurement data of different polarizing directions of water cloud. The experimental results show that the change of relative transmittance is less than 0.2%, the variation of

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(No.30-Y20A19-9007-15/17),高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(No.50-Y20A38-0509-15/16)

第一作者:涂碧海(1977—),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为偏振遥感仪器定标与检测。Email: tubihai@aiofm.ac.cn

导师:洪津(1969—),男,研究员,博导,主要研究方向为光谱偏振遥感技术和航天遥感工程技术。Email: hongjin@aiofm.ac.cn

通讯作者:姚萍萍(1985—),女,助理研究员,博士,主要研究方向为偏振遥感相机成像技术和光电子技术。Email: ppyao@aiofm.ac.cn

收稿日期:2020-09-14; **录用日期:**2020-11-03

<http://www.photon.ac.cn>

polarizing degree for optical lens is less than 0.01, and the instrument state is stable. At the same time, the ability of polarization imager to identify cloud phase state by cloud polarization characteristics is verified. The methods and test results provide reference for on orbit detection and calibration of polarization imager, and provide basis for inversion of cloud products using multi angle polarization data.

Key words: Measurement; Polarization imager; Polarization of cloud; Phase of cloud; Relative transmittance

OCIS Codes: 120.4570; 120.5410; 120.4640; 100.2960

0 引言

多角度偏振成像仪(Directional Polarimetric Camera, DPC)是一种超广角、画幅式、低畸变成像的卫星传感器,通过超广角镜头获取偏振辐射信息的空间分布,多角度、多光谱偏振信息可提高气溶胶、云参数确定能力^[1-3],多角度信息能反映目标偏振双向分布^[4-5]。在轨测试及气溶胶、云产品反演结果显示,仪器偏振探测精度满足设计指标^[6-9]。偏振辐射模型中,关键偏振参量对仪器精度有重要意义,为保障仪器运行,需要对参量进行监督、检验,检验方法可作为在轨定标参考。

为减少偏振影响,多种空间遥感仪器增加了偏振测量通道进行校正^[10-11]。偏振成像仪通过三个不同方向的检偏,实现入射光偏振态的测量,广角镜头起偏效应和通道间辐射参数差异(相对透过率)是影响偏振测量的关键参量。在轨期间,需要检验关键参量在空间环境改变条件下的变化。由于难以满足穿轨、沿轨 $\pm 50^\circ$ 视场内星上定标需求,未设置相关星上定标设备。对幅宽约为1 850 km的大视场进行检验需要大面积、均匀地物,较常用具有强偏振特性的海洋耀光进行偏振检测^[6-7,12],而云的性状较为复杂,相关研究较少,设定检偏相对方位角的简化计算方法对使用云目标的检测进行了理论分析^[13-14]。在轨运行期间,需要针对偏振成像仪特点,依据实际测量数据,研究具体偏振参量检测方法。

云的覆盖率大于50%,数据获取丰富,且水云具有明显的偏振虹特性,可通过云相态识别大面积水云作为参考目标进行检验。云相态识别是云反演的关键要素,对云相态的识别主要有热红外波段的三光谱亮温法^[15],可见、近红外反射率比值法^[16],激光探测的退偏比廓线法^[17-18]。球形粒子构成的水云和冰晶粒子组成的冰云在散射角 140° 附近偏振反射率有显著的区别,依据水云偏振虹特征,可不依赖温度和红外强度等信息,进行云相态识别,获取水云数据。

本文针对偏振成像仪宽幅特点,开展了基于云偏振特性的偏振参量检验方法研究,利用球形粒子构成的水云偏振辐射性能相对稳定的特点,通过云相态辨识获取大范围水云数据进行参量检验。首先介绍偏振成像仪测量原理和关键偏振参量,然后根据云偏振特性仿真结果,利用大散射角的低偏振区域进行相对透过率检验,采用统计方法通过偏振测量模型检验镜头起偏度变化。

1 偏振成像仪原理及关键偏振参量

偏振成像仪属于大视场遥感仪器,位于708 km太阳同步轨道,仪器参数见表1,主要包含5个非偏振波段和3个偏振波段。

表1 偏振成像仪参数说明
Table 1 Parameter description of polarization imager

Content	Parameter
Field of view	118.74°
Number of multi-angle	9 (along orbit)
Spectral band	443 nm; 565 nm; 763 nm; 765 nm; 910 nm; 490 nm(P); 670 nm(P); 865 nm(P)
Angle of polarizer	0°; 60°; 120°
Detector array size	512×512
Pixel size	22.5 μm ×22.5 μm
Focal length of system	4.833 mm
Relative aperture	1:4

光学系统结构如图1所示^[19],不同安装方向的检偏片用于解析偏振信息(相同颜色标注),设计暗背景测量通道校正探测器暗电流。穿轨和沿轨的视场均设计成 100° ,系统采用像方远心和反远距设计;镜头组件由12块透镜组成;转轮装载偏振片和光楔滤光片(非偏振通道使用滤光片和平板玻璃);光路后端为面阵探测器。

由于广角镜头分视场间辐射以及偏振参考坐标差异,对每一个像元,都需要单独计算其辐射响应,还原入射光偏振态,单像元偏振测量示意如图2所示, I_{incident} 为入射光,微镜头表示了光学镜头组件, I_{emergent} 为进入探测器进行光电转换的出射光。P1、P2、P3为不同检偏方向的偏振片、滤光片组合,分时依次进入光路。从图2中可知影响偏振测量的关键参量为镜头的起偏效应和检偏通道间的相对透过率^[19]。

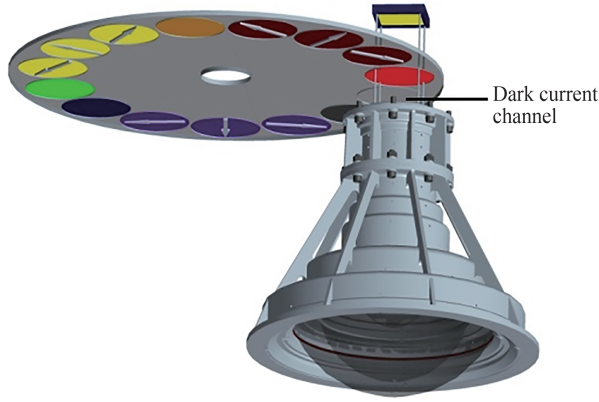


图1 成像系统组成

Fig. 1 Schematic diagram of imaging system

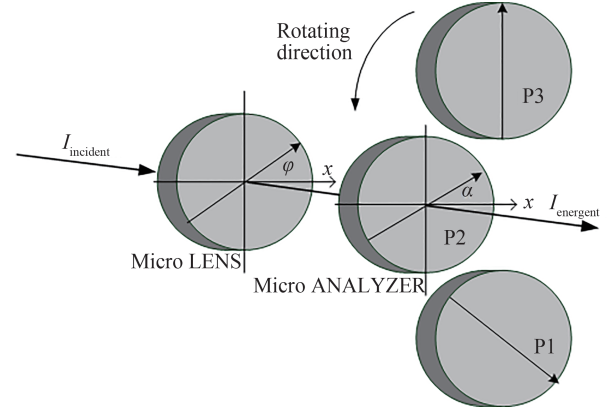


图2 偏振辐射响应示意

Fig. 2 Polarization radiation response diagram

通过斯托克斯矢量和穆勒矩阵可推导辐射模型,以 (i,j) 表示像元行列位置,在预置动态范围内,信号响应应保持线性,探测信号辐射响应模型为^[19]

$$D_{i,j}^{k,a} = A^k \cdot G \cdot T_{i,j}^{k,a} \cdot g_{i,j}^k \cdot p_{i,j}^k (P_{1,i,j}^{k,a} \cdot I_{i,j}^k + P_{2,i,j}^{k,a} \cdot Q_{i,j}^k + P_{3,i,j}^{k,a} \cdot U_{i,j}^k) + C_{i,j} \quad (1)$$

式中,上标 k 表示不同波段, a 表示偏振片的不同安装方向; A^k 表示绝对辐射定标系数; G 表示相对增益系数,包含电子学放大增益及曝光时间系数;透过率响应系数包含检偏滤光组件相对透过率 $T_{i,j}^{k,a}$ 、系统低频透过率 $p_{i,j}^k$ 和探测器响应系数 $g_{i,j}^k$; $P_{1,i,j}^{k,a}$ 、 $P_{2,i,j}^{k,a}$ 、 $P_{3,i,j}^{k,a}$ 表示仪器偏振特性参数,表述为与像元视场角 θ 和方位角 φ 相关的镜头起偏度 ϵ 和检偏片效率 η 的函数: $P_{1,i,j}^{k,a}(\theta, \varphi) = 1 + \eta^k \epsilon^k(\theta) \cos 2(a^{k,a} - \varphi)$, $P_{2,i,j}^{k,a}(\theta, \varphi) = \eta^k \cos 2(a^{k,a} - \varphi) + \epsilon^k(\theta)$, $P_{3,i,j}^{k,a}(\theta, \varphi) = \sqrt{1 - [\epsilon^k(\theta)]^2} \eta^k \sin 2(a^{k,a} - \varphi)$; $(I_{i,j}^k, Q_{i,j}^k, U_{i,j}^k)^T$ 表示入射光束的斯托克斯向量; $C_{i,j}$ 表示暗背景系数。

偏振计算公式为

$$\begin{pmatrix} I_{i,j}^k \\ Q_{i,j}^k \\ U_{i,j}^k \end{pmatrix} = (M_{i,j}^k)^{-1} \begin{pmatrix} D_{i,j}^{k,1} - C_{i,j} \\ D_{i,j}^{k,2} - C_{i,j} \\ D_{i,j}^{k,3} - C_{i,j} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, M 为系统穆勒矩阵。信号通过暗电流校正后获取有效辐射度值,联立解算入射光斯托克斯参量 $(I_{i,j}^k, Q_{i,j}^k, U_{i,j}^k)$ 。

偏振成像仪探测目标为线偏振度,入射光线偏振度信息(Degree Of Linear Polarization, DOLP)可表示为 $P_{i,j}^k = \sqrt{(Q_{i,j}^k)^2 + (U_{i,j}^k)^2} / I_{i,j}^k$,检偏方向 a 和偏振片效率 η 是仪器相对稳定的参量, θ 和 φ 是几何相关信息,表示物点和像点的空间映射关系,通过几何性能测试检验。相对透过率 $T_{i,j}^{k,a}$ 、镜头起偏度 $\epsilon^k(\theta)$ 需要在轨检验变化情况。以起偏度较大的865 nm波段说明检验方法和计算过程。

斯托克斯矢量法通过强度信息进行入射光偏振态解算,检偏通道间相对透过率的变化会引起虚假偏振信息出现。检偏通道间的辐射定标参数 A^k 、 $g_{i,j}^k$ 、 $p_{i,j}^k$ 一致,辐射参量以P2通道为基准进行标准传递,P1、P3通道使用相对透过率系数。相对透过率可表示为自然无偏光经过不同检偏通道输出响应的相对比值,即检偏滤光组件的相对透过率。以P2通道为标准,相对透过率公式为

$$T^{k,a} = T_{i,j}^{k,a} / T_{i,j}^{k,2} = (D_{i,j}^{k,a} - C_{i,j}) / (D_{i,j}^{k,2} - C_{i,j}) \quad (3)$$

式中, $T^{k,a}$ 为 k 波段不同检偏通道的相对透过率; $D_{i,j}^{k,a}$ 为 k 波段不同通道有效响应值, a 代表检偏通道号。实验室标定 865 nm 波段相对透过率 $T_1=0.9921$, $T_2=1$ (基准), $T_3=0.9970$ 。

光学镜头组件的双向衰减、相位延迟和退偏效应是同时存在的, 偏振成像仪研究长积分时间下的线偏振信息, 相位延迟、退偏可暂不考虑。光学元件不同于理想设计, 根据菲涅耳折射理论, 入射光穿过不同介质, 相互正交方向的折射率不同, 会引起偏振态发生变化。使用 τ_1 、 τ_2 表示平行和垂直入射面的光矢量振幅透过率, 则起偏效应可表示为

$$\epsilon = (\tau_1^2 - \tau_2^2) / (\tau_1^2 + \tau_2^2) \quad (4)$$

偏振成像仪的起偏度随视场角变化, 边缘视场大于中心视场, 表现形式为 $\epsilon^k(\theta)$ 。图 3 为镜头在 865 nm 波段处的起偏度, 边缘视场起偏度为 0.13^[20], 如不考虑起偏影响, 则偏振度为 0.5 的遥感目标在边缘视场的辐射偏差为 6.5% (0.13×0.5), 偏振成像仪偏振测量精度 ΔDOLP 为 0.02, 经过起偏度校正后, 由起偏效应引起的最大辐射响应误差约为 0.26% (0.13×0.02), 起偏度校正可有效降低大视场偏振成像仪测量误差。

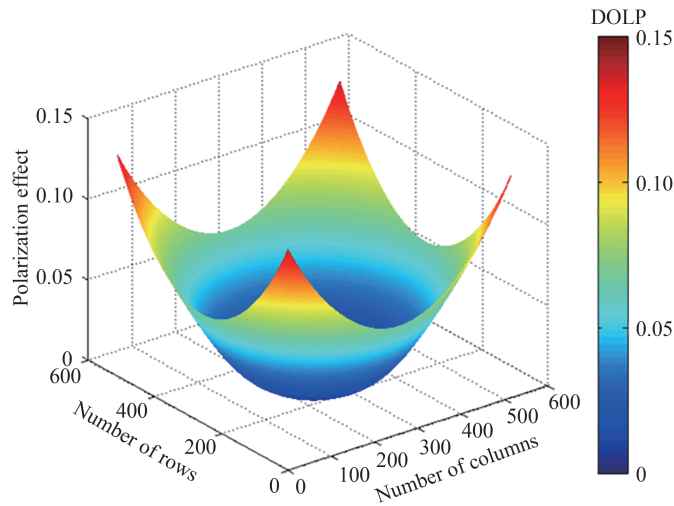


图3 镜头在 865 nm 波段处起偏度
Fig.3 Polarization effect of lens at 865 nm

由于未安装星上定标器, 考虑大视场宽幅成像特点, 采用覆盖率高的云作为参考目标, 对关键偏振参量相对透过率和起偏度进行检验。

2 云偏振特性

为了解水云、冰云的反射率和偏振反射率特性, 使用 RT3 模拟云光学厚度改变时, 反射率和偏振反射率的变化。云光学厚度 t 表示光穿过云层时吸收和散射产生的总削弱 (能量变为 $\exp(-t)$), 为无量纲系数。 t 为 1~5 时为薄云, 5~20 时为中等厚云, 20 以上为厚云, 仿真模拟 t 为 1、2、3、10、20、30、40 时的情况, 可覆盖实际在轨情况。假设水云、冰云的粒子半径均为 10 μm , 偏振成像仪升交点 13:30, 太阳天顶角约为 20° 左右, 设定相对方位角 180°, 在轨检测评估主要使用散射角在 85°~160° 范围内的数据, 仿真计算结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 冰云和水云的反射率随光学厚度变化显著, 偏振反射率对光学厚度不敏感, 不适用于云光学厚度反演。仅通过 865 nm 波段的反射率, 无法区分云相态, 水云和冰云的偏振反射率在 140° 散射角附近有明显的不同, 水云有明显的偏振虹峰值区, 135° 开始的变化趋势两者也有显著不同, 水云为上升, 冰云为下降, 偏振反射率的特征信息有利于云相态识别。冰云由冰晶粒子构成, 非理想球形粒子, 结构及辐射特性复杂, 较难评估, 选用水云进行偏振参量检验。

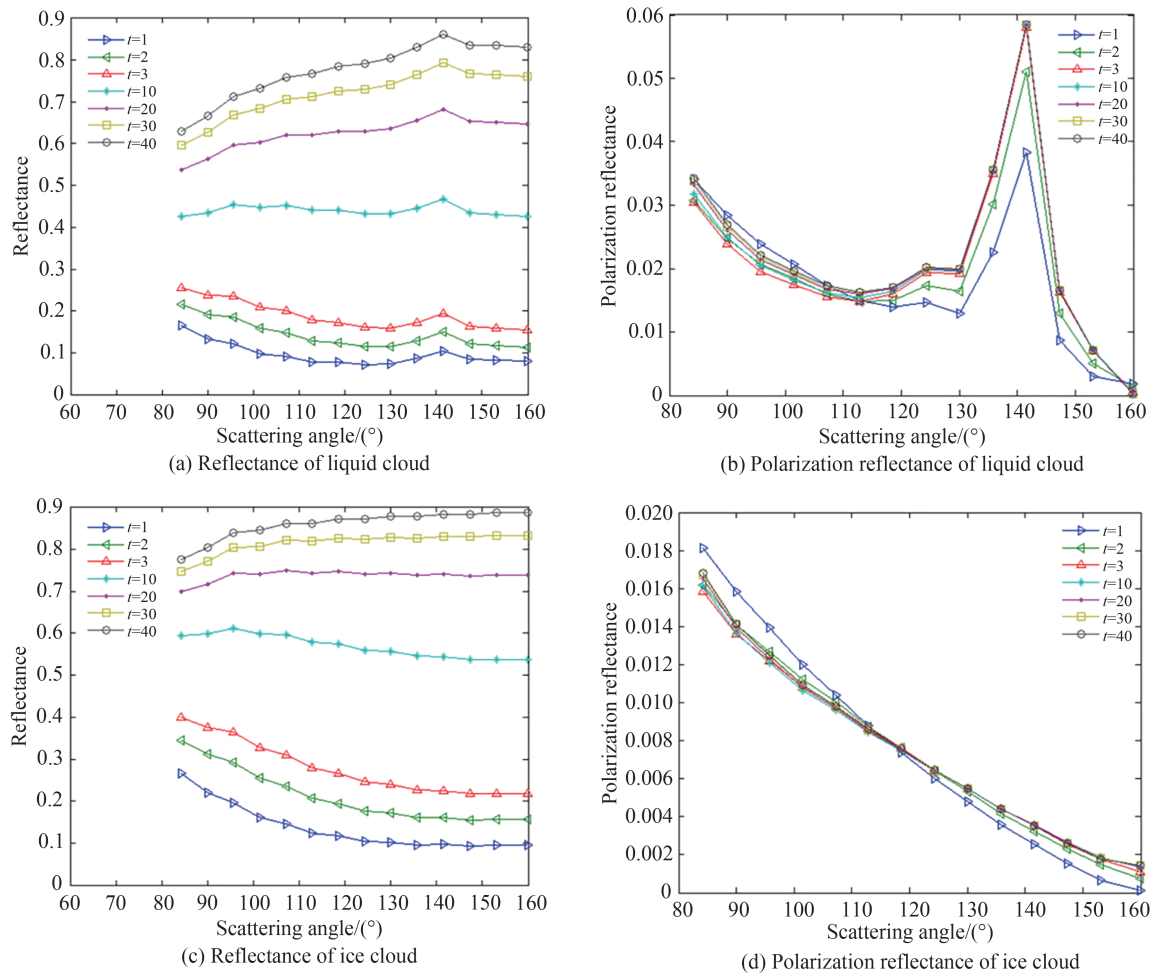


图4 865 nm 云反射率和偏振反射率特性
Fig.4 Reflectance and polarization reflectance of cloud at 865 nm

3 偏振参量检验

基于云偏振特性检验偏振参量方法,基本流程如图5所示,通过地面应用系统获取偏振成像仪L1、L0级数据。L1级数据为经过偏振、辐射、几何校正后的反射率产品数据,L0级数据为仪器原始数据。依据L1级数据中(I, Q, U)反射率、海陆标识、太阳及观测角度信息,通过偏振虹特征查找水云分布信息。

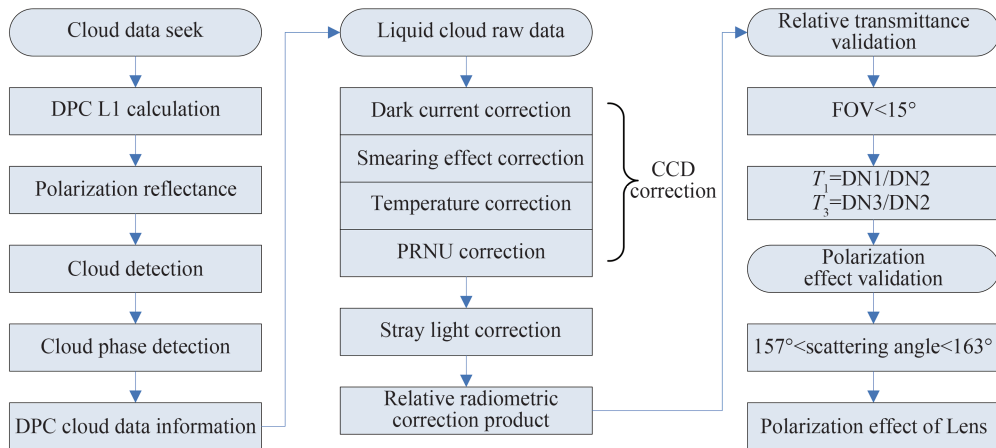


图5 偏振参量检验流程
Fig.5 Polarization parameter validation process

偏振参量检验使用L0级数据,依据水云信息进行数据提取,选择原始CCD数据进行校正,但不进行偏振校正及几何插值投影。首先需要进行探测器组件校正,包括暗电流、帧转移、温度和非均匀性校正。大视场光学遥感仪器普遍存在杂散光现象,经过工程设计抑制后的杂散光属于弱信号,仍对暗目标有较强的干扰,需要校正处理。光学系统相对照度为自然光经过光学系统不同视场后强度变化的相对关系,经过相对照度校正后,依据卫星姿态、轨道参数计算的逐像点地理信息和观测角度信息,完成偏振参量检测的数据预处理。使用数据校正后数据,依次进行相对透过率和镜头起偏度检验。

3.1 云信息获取

地面应用系统提供数据预览图,可以查询检索数据,选择在轨测试期间2018年5月29日位于冰岛西南的区域,如图6所示,区域范围内包含水云、冰云及混和云。

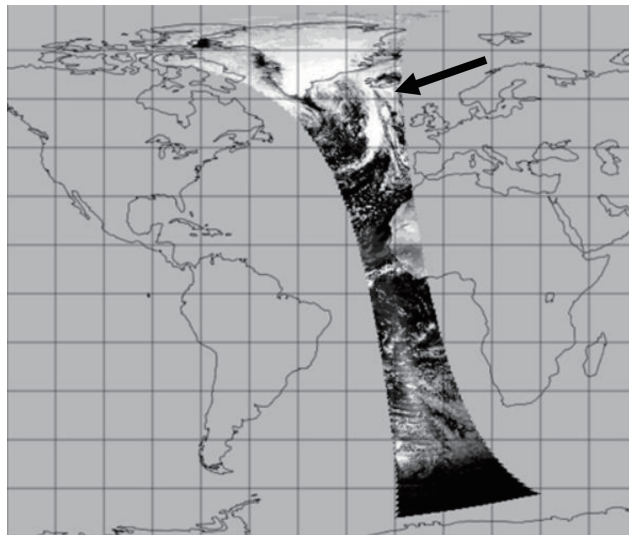
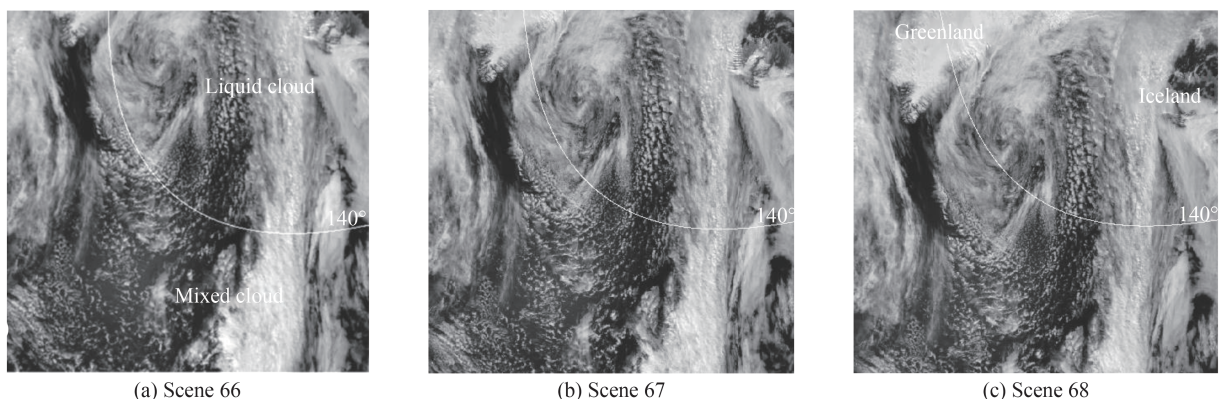


图6 数据预览图
Fig.6 Data preview

云相态特征显示上部区域为水云,在9个观测角度中,满足偏振参量检测散射角条件的连续3景云数据如图7(a)~(c)所示,3个观测角度示意如图7(f)所示,起偏效应检验选择此区域数据。

图7(d)为66景数据的偏振反射率图,图7(e)为66景数据的散射角分布图,对应140°散射角区域可见云偏振虹,中部地区为冰云和水云的混合区域,冰云区域显示低偏特性。散射角110°附近有海洋耀光,由于水体反射特性体现强偏振信息,对云检验起干扰作用,检验过程应避免使用此区域数据。

统计水云偏振反射率与散射角相关特性,连续3景偏振反射率统计如图7(g)所示,散射角125°~170°之间的统计曲线表现出良好的一致性。和图4(b)水云偏振反射率仿真结果一致,在散射角135°~147°之间,水云有明显的偏振峰值区,峰值点在143°左右,偏振反射率约为0.06。在160°附近大多数数据呈现低偏,接近至零偏,满足统计评估条件,由于目标特性复杂,存在干扰量,统计曲线低偏数据比实际数据略偏大。



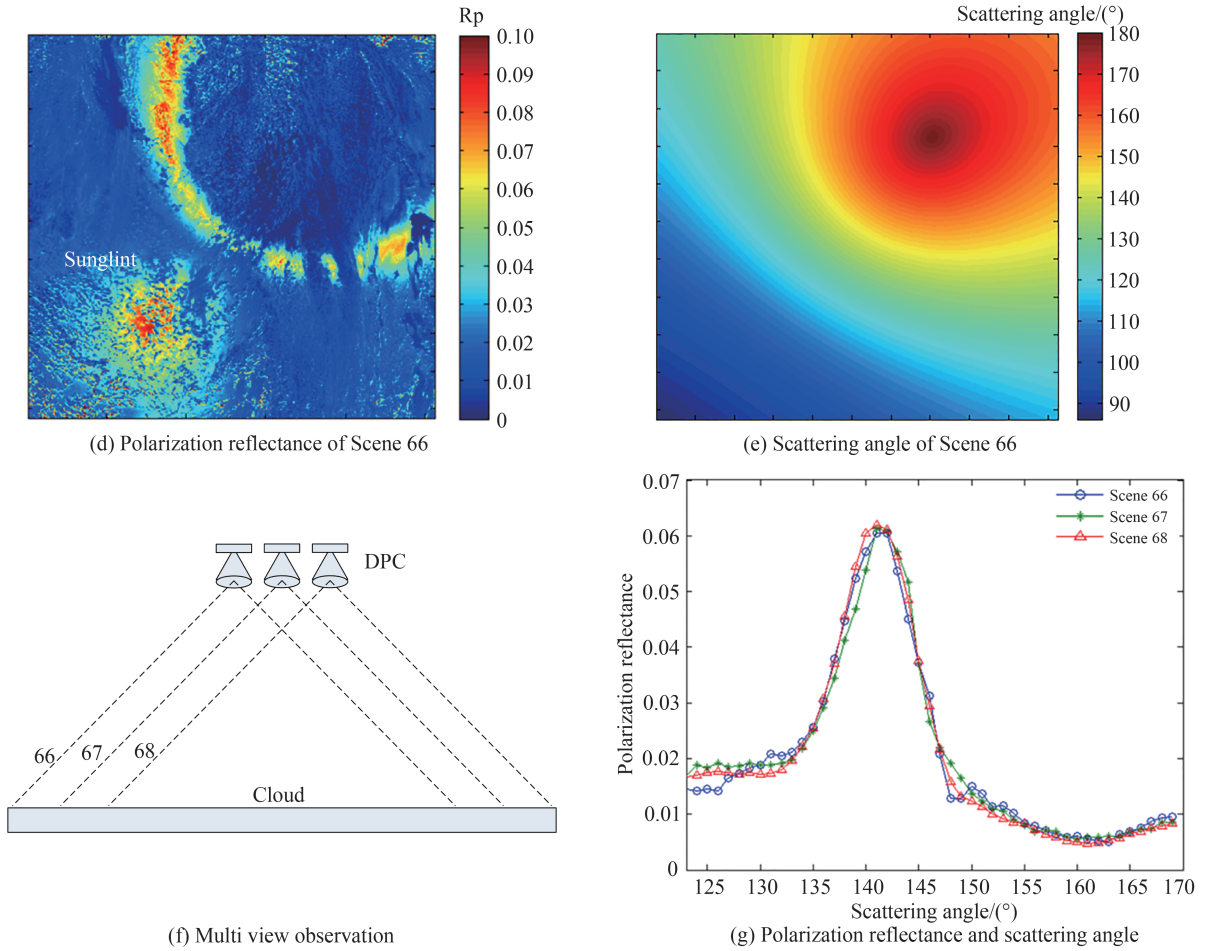


图7 水云数据
Fig. 7 Data of liquid cloud

连续3景的统计曲线峰值位置基本重合,说明此区域的水云性质较为均匀稳定,构成水云的粒子谱基本一致。在散射角 140° 附近,可以设置偏振反射率0.025作为阈值,区分水云和冰云,体现了偏振成像仪的云相态辨识能力。偏振成像仪观测角度为9个,在后续仪器中观测角度数增加至17~34个,目标的散射角分辨率更为细化,大大增强了云相态辨识和云反演能力。

66~68景数据可用作起偏度检验。由于66~68景数据视场中部区域在 140° ,无法满足相对透过率评估需求,采用60~62景数据,视场中部区域水云散射角在 160° 左右,用作相对透过率检验。

3.2 相对透过率检验

相对透过率是不同检偏方向通道间辐射响应比率参量,校正分时、分通道测量偏差。几何偏差通过光楔补偿校正,由几何特性决定,这里检验引起通道间辐射偏差的相对透过率变化。为减少复杂性,选择散射角 $157^\circ\sim 163^\circ$ 之间的水云数据,设定 $Q_{i,j}^k \approx 0, U_{i,j}^k \approx 0$,式(1)可以简化为

$$D_{i,j}^{k,a} = A^k G_i T_{i,j}^{k,a} g_{i,j}^{k,a} p_{i,j}^{k,a} \left[1 + \eta^{k,a} \epsilon^k(\theta) \cos 2(a^{k,a} - \varphi) \right] \cdot I_{i,j}^k + C_{i,j} \quad (5)$$

设相对透过率 $T^{k,a} = T_{i,j}^{k,a} / T_{i,j}^{k,2}$,则不同检偏方向有效信号间比率表示为

$$\frac{D_{i,j}^{k,a} - C_{i,j}}{D_{i,j}^{k,2} - C_{i,j}} = T^{k,a} \frac{1 + \eta^{k,a} \epsilon^k(\theta) \cos 2(a^{k,a} - \varphi)}{1 + \eta^{k,2} \epsilon^k(\theta) \cos 2(a^{k,2} - \varphi)} \quad (6)$$

为减小起偏度影响,选择 $\epsilon^k \approx 0$ 的中心视场区域,选取视场角小于15视的有效数据,则相对透过率表示为

$$T^{k,a} = \frac{\sum (D_{i,j}^{k,a} - C_{i,j}) \left[1 + \eta^{k,2} \epsilon^k(\theta) \cos 2(a^{k,2} - \varphi) \right]}{\sum (D_{i,j}^{k,2} - C_{i,j}) \left[1 + \eta^{k,a} \epsilon^k(\theta) \cos 2(a^{k,a} - \varphi) \right]} \approx \frac{\sum (D_{i,j}^{k,a} - C_{i,j})}{\sum (D_{i,j}^{k,2} - C_{i,j})} \quad (7)$$

选用60~62景中心区域水云数据,以样本数据点大于500个作为检验有效性标准,检验结果如表2所示。

表2 相对透过率计算
Table 2 Relative transmittance calculation

	T_1	T_2	T_3	Valid points
Scene 60	0.993 3	1	0.996 3	1 170
Scene 61	0.994 1	1	0.997 9	678
Scene 62	0.993 7	1	0.995 4	1 096
Average	0.993 7	1	0.996 5	981

以检偏通道P2为基准(图2),则P1通道相对透过率变化 ΔT_1 为 $(0.993\ 7-0.992\ 1)/0.992\ 1=0.16\%$,P3通道相对透过率变化 ΔT_3 为 $(0.996\ 5-0.997\ 0)/0.997\ 0=-0.05\%$,变化率均小于0.2%。光学系统中检偏滤光组件在轨运行状态稳定,相对透过率基本和地面检测一致。

3.3 起偏度参量检验

基于水云偏振特性,通过统计学分析镜头起偏参数变化,设定 $Q_{i,j}^k \approx 0, U_{i,j}^k \approx 0$,根据式(5)、(6)可直接计算起偏度 ϵ^k ,式中除起偏度 ϵ^k 外,均为已知量。系统低频透过率 $p_{i,j}^k$ 、探测器响应系数 $g_{i,j}^k$ 、检偏方向 a 、检偏片效率 η 设为不变量,相对透过率 $T_{i,j}^k$ 由在轨检验确定,视场角 θ 和方位角 φ 由几何检校获取。检验数据分布在不同视场区域,为减小几何误差影响,首先进行了几何检校,消除了空间环境变化、大气折射等影响,实现像点和物点的映射,经过在轨几何检校后视场角 θ 和方位角 φ 如图8(a)、(b)所示,方位角变化均匀,视场角呈现中心对称特点,利于以 θ 为自变量的 $\epsilon^k(\theta)$ 在轨检验。选择散射角 $157^\circ\sim 163^\circ$ 之间的水云数据检测,高纬度较低纬度地区有效区域靠近视场边缘。直接计算起偏度的方法使用定标系数多,计算复杂,同时需要筛除分式计算的奇异值,但不受简化方法对检偏片相对方位角 0° 、 60° 、 120° 约束要求的限制^[13-14],直接计算方法的中间数据如图8(c)所示,若安装角度偏差较大时,可使用实际安装角度直接计算,减少计算误差。依据仿真和测量结果(如图4(b)、图7(g)),检测过程使用 160° 散射角附近数据,不同于简化方法选择的 100° 散射角附近数据,并且偏振成像仪位于太阳同步极地轨道, 100° 散射角附近的数据易受海洋耀斑偏振信号干扰(如图7(d))。

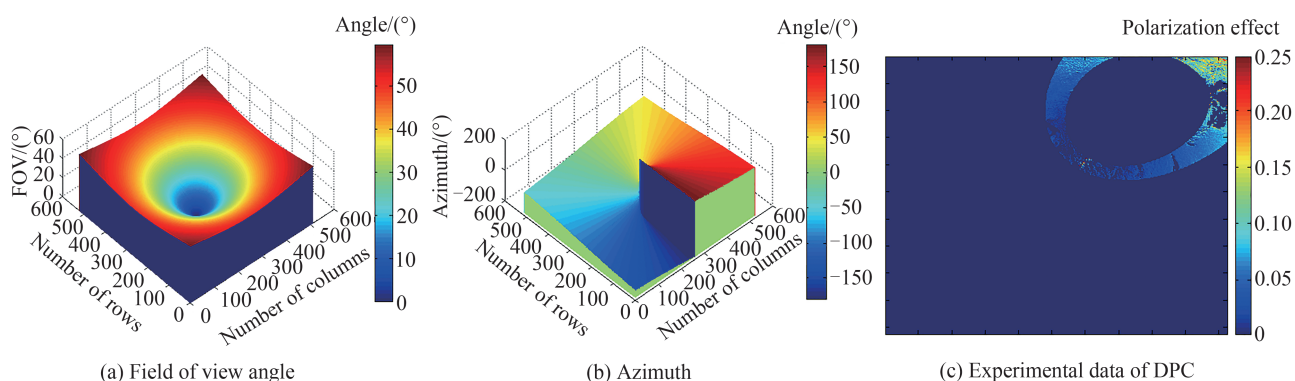


图8 偏振成像仪参数及数据
Fig.8 Data and parameters of DPC

选用云相态测定的66~68景水云数据,对随视场角变化的起偏度进行统计计算,统计数据基本覆盖了偏振成像仪不同视场区域,可反映整体状态。通过海陆标识数据排除冰岛、格林兰岛的冰雪干扰区域。统计计算结果如图9所示,图9(a)~(c)为实测起偏效应和原始起偏参量(红线表示)的统计图,测量值和原始值变化趋势均保持一致。测量值围绕原始参考值均匀分布,整体起偏度从中心视场缓慢变化到边缘视场0.13左右。3景数据的统计曲线具有较好的一致性。

偏差量 $\Delta P_\theta^{\text{effect}} = P_\theta^{\text{orbit}} - P_\theta^{\text{laboratory}}$ 表示测量值和原始参量的差值。对偏差量统计分析,3景偏差量平均标准差为0.009 5,由于目标复杂性和检验时效性要求,未对所有像元点严格筛选,低起偏度区域样本受噪声影响较大。通过散点统计分布图9(d)分析,数据集中在斜率为1的线性区附近,统计数据线性度良好。检验数据显示:在轨测试期间,偏振成像仪起偏度变化小于0.01,测量值和参考值之间线性度良好,满足后续应用需求。

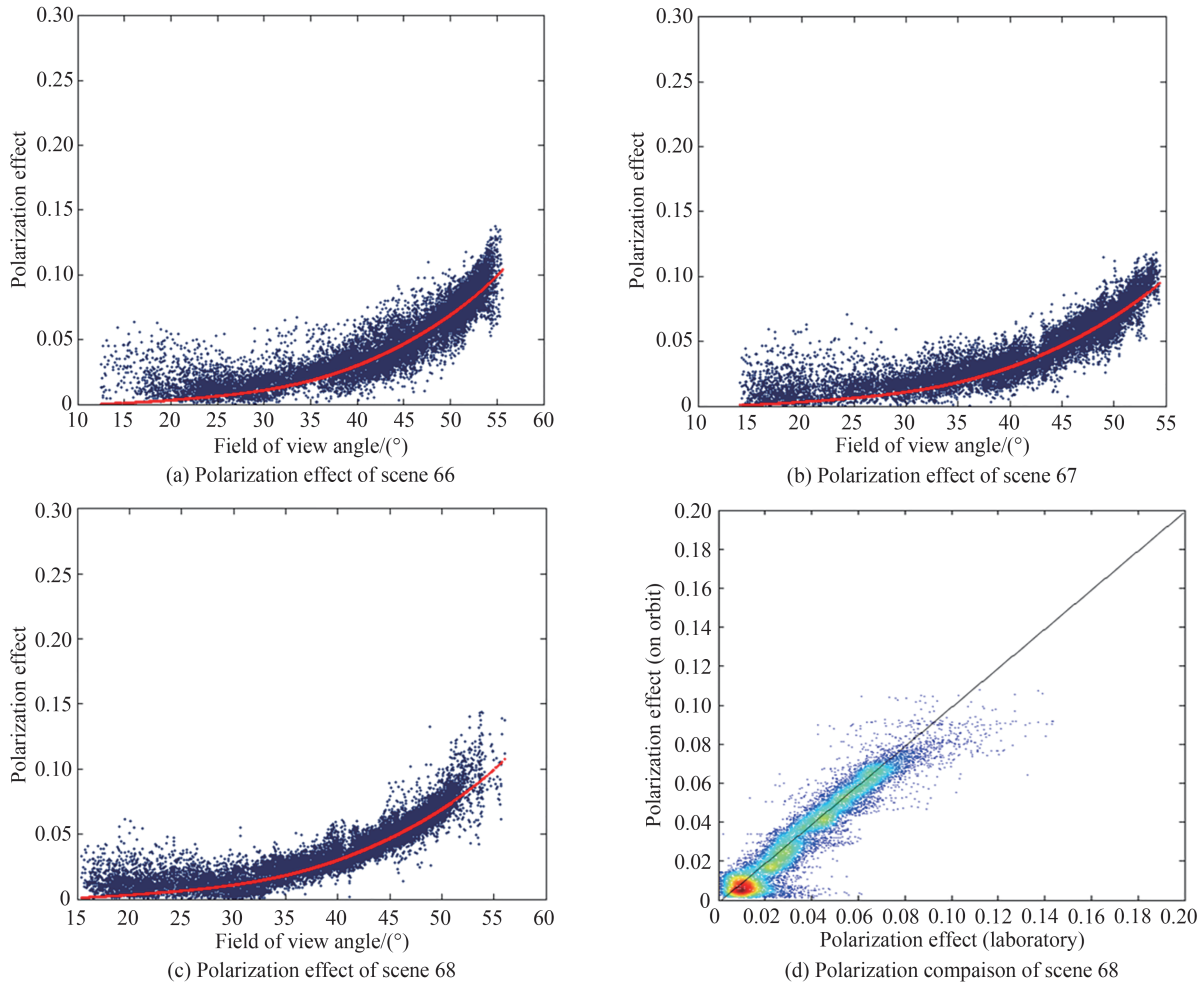


图9 起偏度检测

Fig.9 Polarization effect validation

参数检验结果和在轨性能测试^[6-7]、数据产品的反演^[8-9]均检验了仪器工作状态。若连续3景的统计特性显示较大偏离,或起偏效应线性度斜率偏差较大,则需要进行在轨偏振定标,使用大于100景的统计数据进行起偏度多项式拟合,定标的方法和检验方法基本相同。

4 结论

多角度偏振成像仪检偏通道间相对透过率和镜头起偏度是偏振测量的关键参量,根据云偏振特性仿真结果,研究了基于云偏振特性的偏振参量在轨检验方法。采用水云偏振虹特征,可不依赖温度和红外强度等信息,进行云相态识别,获取水云数据。利用大散射角的低偏振区域进行相对透过率检验,用统计方法基于偏振辐射模型检验了镜头起偏度变化。实验数据表明:检偏通道间相对透过率变化小于0.2%,光学镜头起偏度变化小于0.01,仪器状态稳定。同时验证了偏振成像仪通过云偏振特性对云相态的辨识能力。该方法为后续观测角度数达17~34个的大视场偏振成像仪在轨检测、定标提供依据,为使用多角度偏振数据的云反演应用提供参考。

参考文献

- [1] LI Zhengqiang, HOU Weizhen, HONG Jin, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2018, (21): 21-37.
- [2] HUANG Chan, XIANG Guangfeng, CHANG Yuyang, et al. Pre-flight calibration of a multi-angle polarimetric satellite sensor directional polarimetric camera[J]. Optics Express, 2020, 28 (9): 13187-13215.
- [3] WENG Jianwen, YUAN Yinlin, ZHENG Xiaobin, et al. Study on a response non-uniformity measurement method of polarization channels in the directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0828001.

- 翁建文, 袁银麟, 郑小兵, 等. 多角度偏振成像仪偏振通道响应非一致性测量方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0828001
- [4] WANG Jiejun, WANG Peng, WANG Fangyuan, et al. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function on material surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0126001.
汪杰君, 王鹏, 王方原, 等. 材料表面偏振双向反射分布函数模型修正[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0126001.
- [5] MA Yuzhao, GAO Chen, CHENG Feifan, et al. Aerosols scattering polarization characteristics based on different surface reflection type[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0201001.
马愈昭, 高晨, 程飞帆, 等. 考虑地表反射类型的气溶胶散射偏振特性[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0201001.
- [6] CHEN Feinan, HUANG Chan, HONG Jin, et al. In Flight radiation evaluation and validation of directional polarimetric camera[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 126-136+172.
陈斐楠, 黄禅, 洪津, 等. 大气气溶胶多角度偏振探测仪在轨辐射精度与真实性验证研究[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 126-136+172.
- [7] LI Zhaozhou, QIE Lili, XIE Yisong, et al. In-flight polarimetric calibration of directional polarization camera on GF-5 satellite[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(1): 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(1): 22-27.
- [8] CHEN Hui, LI Qing, WANG Zhongting, et al. Retrieval of fine particulate matter concentration using GF-5 satellite remote sensing[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 181-186.
陈辉, 厉青, 王中挺, 等. 利用高分五号卫星遥感反演近地面细颗粒物浓度方法[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 181-186.
- [9] XIE Yisong, LI Zhengqiang, HOU Weizhen, et al. Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of directional polarimetric camera onboard GF-5 satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 219-226.
谢一淞, 李正强, 侯伟真, 等. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 219-226.
- [10] WANG Hongbo, HU Xiuqing, ZHANG Lu, et al. Polarization correction for grating dispersive imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0812004.
王宏博, 胡秀清, 张璐, 等. 光栅色散型成像光谱仪的偏振校正方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812004.
- [11] SCHUTGENS N A J. A novel approach to the polarization correction of spaceborne spectrometers [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D7): AAC 12.
- [12] ZHANG Yipeng, HU Xiuqing, YIN Dekui, et al. Onboard polarization calibration technique of multi-angle polarization imager based on sun glint from ocean[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1528002.
张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 等. 基于海洋耀斑的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1528002.
- [13] GU Xingfa, CHEN Xingfeng, CHENG Tianhai, 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] GOLOUB P, TOUBBE B, HERMAN M, et al. In-flight polarization calibration of POLDER[C]. SPIE. 1997, 2957: 299-310.
- [15] PLATNICK S, KING M D, ACKERMAN S A, et al. The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 459-473.
- [16] KING M D, PLATNICK S, YANG P, et al. Remote sensing of liquid water and ice cloud optical thickness and effective radius in the arctic: application of airborne multispectral MAS data[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2004, 21(6): 857.
- [17] HU Y X, VAUGHAN M, LIU Z Y, et al. The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5327-5332.
- [18] SUN Xianming, WANG Haihua, SHEN Jin. Study on two Monte Carlo simulation programs of polarization Lidar depolarization by water cloud[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101002.
孙贤明, 王海华, 申晋. 两种模拟水云对偏振激光雷达退偏振的蒙特卡罗方法研究[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101002.
- [19] TU Bihai, YAO Pingping, WEI Wei, et al. Relative radiometric correction of polarization imager with large field of view[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 0112001.
涂碧海, 姚萍萍, 韦玮, 等. 大视场偏振成像仪的相对辐射校正研究[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 0112001.
- [20] KANG Qing, YUAN Yinlin, WENG Jianwen, et al. System-level polarized calibration methods in laboratory of directional polarization camera[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(1): 36-48.
康晴, 袁银麟, 翁建文, 等. 多角度偏振成像仪系统级偏振定标方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(1): 36-48.