

多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测

涂碧海^{1,2,3*}, 洪津^{1,3**}, 姚萍萍^{1,3}, 孟炳寰^{1,3}, 袁银麟^{1,3}, 张苗苗^{1,2,3}, 翁建文^{1,2,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 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, 安徽 合肥 230031

摘要 多角度偏振成像仪用于获取全球大气气溶胶和云性质参数,能探测大气多角度偏振信息。偏振探测是仪器的重要特性,大视场光学仪器起偏效应显著,应予以定标校正。在轨运行前通过实验室、外场对偏振探测性能进行全面检测。在轨运行时,设计基于自然目标偏振特性的在轨检测方法,进行数据校正后,再对大范围海洋耀光和水云偏振虹进行分析,通过偏差分布图像可在复杂多云的数据环境中直观显示仪器状态,实现了全视场偏振探测性能的快速评测,验证了地面应用系统数据处理的有效性。在轨偏振探测性能与实验室、外场检测的性能一致,探测精度满足优于0.02的设计指标。检测数据为气溶胶和云反演应用提供重要依据,各阶段检测方法为广角偏振遥感仪器检测提供参考。

关键词 测量; 偏振成像仪; 偏振探测; 偏振光源; 在轨评测

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0712003

Polarization Detection Performance of Directional Polarimetric Camera

Tu Bihai^{1,2,3*}, Hong Jin^{1,3**}, Yao Pingping^{1,3}, Meng Binhuan^{1,3},

Yuan Yinlin^{1,3}, Zhang Miaomiao^{1,2,3}, Weng Jianwen^{1,2,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Directional polarimetric camera (DPC) is used to monitor several parameters related to the global atmospheric aerosol and clouds as it can detect atmospheric multi-angle polarization. However, it is an ultra-wide-angle optical instrument; therefore, the polarization effect of lens cannot be neglected, and it should be corrected during the calibration stage. A polarization measurement performance test is conducted prior to launching the instrument in the laboratory and outfield. To meet the requirement of an on-orbit measurement, an on-orbit detection method is designed to assess the polarization detection performance of the optical polarization remote sensing instrument with a large field of view. The rapid evaluation of polarization detection performance in full field of view is achieved by analyzing the polarization rainbow data of ocean flares and water clouds in a wide range of complex environments, and the data processing effectiveness of ground application system is verified. The on-orbit polarization detection performance of DPC is consistent with the laboratory and outfield data, which provides an important basis for aerosol and cloud inversion applications. Furthermore, the detection methods in each stage can be used as a reference in wide-angle polarization remote sensing applications.

Key words measurement; polarimetric camera; polarization detection; polarized light source; on-orbit testing

OCIS codes 120.5410; 120.4640; 100.2906

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-09-19; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(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(50-Y20A38-0509-15/16)

* E-mail: tubihai@aiofm.ac.cn; ** E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

1 引 言

多角度偏振成像仪(DPC)用于获取全球气溶胶和云性质参数。通过广角镜头获取偏振辐射空间分布信息,其多角度、多光谱偏振信息可提高不同下垫面情况的气溶胶、云参数的确定能力^[1-3]。

多角度数据反映目标偏振双向分布^[4-5],对于大幅宽多角度数据,难以寻找到均匀偏振光源实现高精度星上偏振定标,这时数据质量需依靠地面检测来保障。实验室通常使用偏振参考光源进行偏振检测^[6],为提高适应性,最新研制了大动态范围偏振度光源。外场环境下,天空光可用作大视场偏振仪器参考光源,基于粒子散射作用的天天空光呈现规律性偏振模式分布^[7-9]。国内多家单位开展的测量研究工作,常用于导航研究^[10-11]。复杂的气象环境决定了天空偏振光不能直接用于高精度定量检测,测试过程需使用太阳-天空偏振辐射计数数据作为比对。

偏振成像仪在轨测试及定标需要地面大气观测场网的数据支撑^[12-15],耀光和水云可作为偏振特征目标开展评测工作。远离大陆的海洋区域,污染少、气候条件好,海洋耀光偏振度峰值可达 $0.7 \sim 0.9$ ^[16-19];水云有不同冰云的云相态特征,在特定散射角附近有显著的偏振特性。由于海浪作用,海面不同于平静水面,耀光偏振特性主要参考将海面分解成满足镜面反射小坡面的概率模型^[20]。遥感数据云覆盖通常大于 50% ,耀光区有大面积云覆盖,如进行无云数据筛选,对多视场整体性能评测,则需要长期、大量离散数据累积,时效性难以满足在轨测试需求,为实现快速、直观评测大视场偏振探测性能,验证地面应用系统数据处理有效性,需要研究设计多角度偏振成像仪在轨评测方法。

本文介绍了多角度偏振成像仪的测量原理,从辐射响应模型分析了影响测量的因素。区别于小视场仪器,主要分析广角镜头起偏效应对偏振、辐射测量的影响,以及大视场杂散光对在轨暗目标的影响。介绍实验室、外场偏振探测性能的检测原理和结果。在轨测试期间,设计了大视场偏振遥感仪器的快速检测方法,完成了杂散光(高反射率云影响暗目标信号)校正等数据处理,偏差分布图像可在复杂多云的数据环境中直观、高效地显示仪器整体状态,检测结果与地面检测保持一致,偏振探测精度满足优于 0.02 的设计指标要求。

2 偏振成像仪测量原理

偏振成像仪由三个部分组成,如图1所示,光学探测单元(GP301)用于实现光学探测,信息处理单元(GP302)和驱动控制单元(GP303)用于实现数据互联、电机驱动控制和热控。

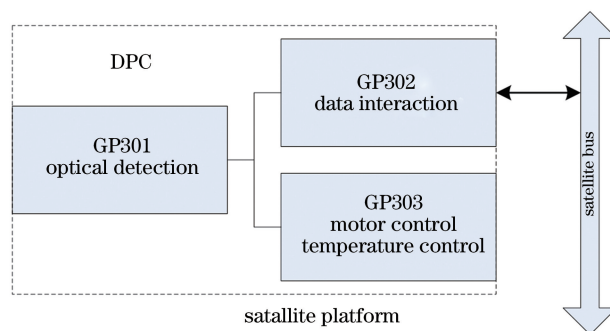


图1 仪器系统组成示意图

Fig. 1 Diagram of instrument system composition

综合考虑成本和系统复杂度,选用广角重叠方法实现多角度探测,通过光楔补偿实现偏振波段同一目标偏振测量,探测过程如图2所示,滤光片、偏振片转轮匀速转动切换,从而实现分时多角度、多光谱偏振测量。通过遥感数据分析,成像区最高达11个观测角度。

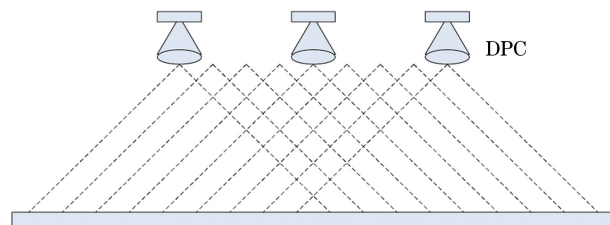


图2 在轨工作示意

Fig. 2 Diagram of on-orbit work

光学探测单元组成结构如图3所示,主要由成像物镜、滤光片/偏振片转轮、面阵探测器构成,其穿轨和沿轨视场角均设计成 100° ,包含8个工作波段,其中 $443, 565, 763, 765, 910 \text{ nm}$ 为非偏波段, $490, 670, 865 \text{ nm}$ 为偏振波段,偏振波段由不同检偏方向($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)的三个通道用于解析偏振信息(图中同色三通道),设计暗背景通道用于校正探测器暗电流。

光学成像系统如图4所示,包含12块透镜的镜头组件、装载在转轮上的偏振片和光楔滤光片(非偏振通道使用滤光片和平板玻璃)、成像光路后端的光电耦合探测器(CCD)。光学系统核心是广角成像物镜组件,采用像方远心和反远距设计^[21],使得运动



图 3 DPC 成像系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DPC imaging system

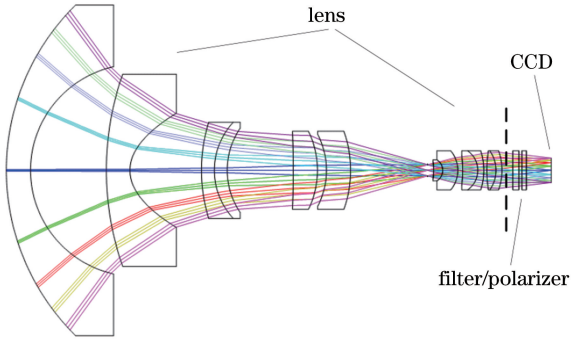


图 4 光学系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical system

补偿光楔偏移具有一致性,偏振片置于远心光路中利于偏振测量。

光信号会聚于 CCD,信息经过电路调整转换成数据信号(DN),遥感数据通过数传链路进入地面应用系统。原始数据通过预处理校正,还原探测辐亮度,从而进入反演流程,得到气溶胶和云的性质产品。

偏振成像仪通过偏振定标获取仪器自身的辐射、偏振特性,建立探测输出量与入射辐射量的转换关系,分为偏振波段模型和非偏振波段模型。 k 偏振波段 a 偏振片安装方向上像元 (l, p) 的辐射响应信号 D 表示为

$$D_{l,p}^{k,a} = A^k \cdot G \cdot T_{l,p}^{k,a} [P_{1,l,p}^{k,a} \cdot I_{l,p}^k + P_{2,l,p}^{k,a} \cdot Q_{l,p}^k + P_{3,l,p}^{k,a} \cdot U_{l,p}^k] + C_{l,p}, \quad (1)$$

式中:乘积项 G 为相对增益系数,包含电子学放大增益及曝光时间系数; T 为透过率响应系数,包含检偏滤光组件相对透过率、光学系统低频透过率和探测器高频响应系数; C 为暗背景系数; A 为辐射定标系数; $[I, Q, U]$ 为入射光束的斯托克斯向量; P_1, P_2, P_3 为仪器偏振特性参数,表述为与像元视场角 θ 和方位角 ϕ 相关的镜头起偏度 ϵ 和偏振片效率 χ 的函数,即 $P_1^{k,a}(\theta, \phi) = 1 + \chi^k \epsilon^k(\theta) \cos 2(\phi - \alpha^{k,a})$, $P_2^{k,a}(\theta, \phi) = \chi^k \cos 2(\phi - \alpha^{k,a}) + \epsilon^k(\theta)$, $P_3^{k,a}(\theta, \phi) = \chi^k \sin 2(\phi - \alpha^{k,a})$,其中 α 为 a 方向的

实际安装角度($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)。

偏振波段通过三个方向的信号解算,解算公式为

$$\begin{bmatrix} I_{l,p}^k \\ Q_{l,p}^k \\ U_{l,p}^k \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_{l,p}^k)^{-1} \begin{bmatrix} D_{l,p}^{k,1} - C_{l,p} \\ D_{l,p}^{k,2} - C_{l,p} \\ D_{l,p}^{k,3} - C_{l,p} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 为穆勒矩阵,由三个偏振通道信号联立解算入射斯托克斯参量 $(I_{l,p}^k, Q_{l,p}^k, U_{l,p}^k)$ 。

通过偏振通道获取入射光的线偏振度信息(DOLP),可表示为 $P_{l,p}^k = \sqrt{(Q_{l,p}^k)^2 + (U_{l,p}^k)^2} / I_{l,p}^k$,偏振成像仪探测目标为线偏振度,文中所述均为线偏振。

非偏振波段为单通道成像,没有偏振波段的穆勒矩阵,同时不需要考虑通道间相对透过率,辐射响应模型表示为

$$D_{l,p}^k = A^k \cdot G \cdot T_{l,p}^k [I_{l,p}^k + \epsilon^k(\theta) \cdot Q_{l,p}^k] + C_{l,p}. \quad (3)$$

非偏振波段的透过率响应系数 T 仅包含光学系统低频透过率和探测器高频响应系数。

非偏振波段不具备偏振探测能力,不能直接解算 I, Q, U 三个偏振量,目标点的线偏振度来自对偏振波段的插值拟合,偏振方位角用 γ 表示。辐射信息表示为

$$I_{l,p}^k = \frac{D_{l,p}^k - C_{l,p}}{A^k \cdot G \cdot T [1 + \epsilon^k(\theta) \cdot P_{l,p}^k \cdot \cos(2 \cdot \gamma)]}, \quad (4)$$

从偏振、非偏振的辐射响应模型可知,影响数据质量的因素很多,如光学镜头起偏度、偏振片效率、光学系统整体透过率均匀性、滤光片均匀性、探测器响应均匀性等。为区别小视场仪器,本文主要分析大视场镜头起偏效应及杂散光,其中影响暗目标的杂散光将在第 5 章数据处理流程中分析。

平行、垂直入射面的透过率不同会引起入射光的偏振态发生变化。偏振成像仪光学镜头由 12 个透镜组成。大视场镜头组的总偏振效应不仅会影响偏振信息的精确测量^[22],而且也会影响非偏振波段测量,已成为偏振成像仪的重要参数。根据(3)式,若不考虑起偏效应,设起偏度为 0.1 时,偏振度高于 0.5 的遥感目标产生的辐射误差将会大于 5%。865 nm 偏振波段和 910 nm 非偏振波段的测量结果如图 5、6 所示,边缘视场的起偏度均达到了 0.1 以上。

对于多角度偏振成像仪,区别于其他偏振遥感仪器的主要特点是广角镜头设计,起偏效应同时影响偏振测量和辐射测量,边缘视场可达 5% 以上。

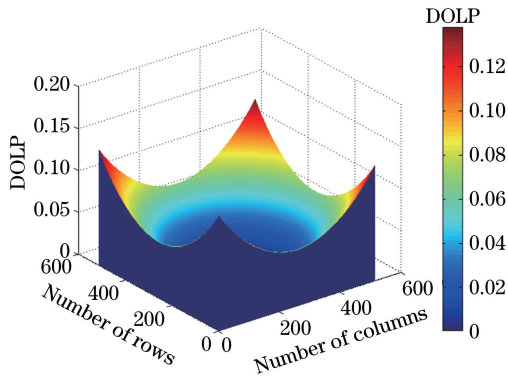


图 5 光学镜头 865 nm 偏振度图
Fig. 5 865 nm polarized effect of lens

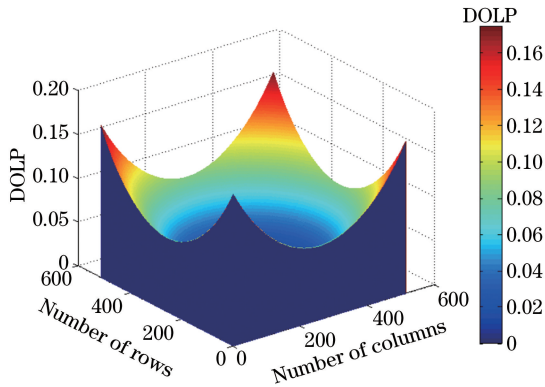


图 6 光学镜头 910 nm 偏振度图
Fig. 6 910 nm polarized effect of lens

偏振探测性能为仪器核心指标,为体现整体性能,在实验室、外场、在轨均需检测不同视场角的偏振探测性能。本文以 865 nm 偏振波段为例,比较了仪器在不同状态下的一致性。

3 偏振探测性能实验室检测

经过各阶段热真空、力学等各种工程实验后,需检测仪器状态,偏振探测性能的检测使用可调偏振度光源产生偏振光,实验室研发的偏振光源^[23]的偏振度通过平板玻璃透过率和转动角度数据计算,检测装置示意如图 7 所示,主要由偏振光源输出和偏振成像视场调整转台组成。

选择输入偏振度 0.1~0.6 的偏振光,其不确定度小于 0.2%,平板玻璃组前入射光可分解为平行、垂直入射面分量 I_{\parallel} 、 I_{\perp} ,经过一块平板玻璃的线偏振度可表示为

$$P_1 = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp}). \quad (5)$$

依据设计要求,4 片平板玻璃材质和倾斜角状态一致,总的出射光线偏振度为

$$P = \frac{[(1 + P_1)^4 - (1 - P_1)^4]}{[(1 + P_1)^4 + (1 - P_1)^4]}. \quad (6)$$

光源光谱范围为 350~2000 nm,偏振度范围为 0~0.72,基本满足自然光测量范围。二维转台俯仰角调节范围为 $\pm 60^\circ$,方位角调节范围为 $\pm 180^\circ$,满足大视场测量角度。洁净间洁净度优于 10 万级,产品与实验设备不共地,接地点电阻小于 1 Ω ,测试期间使用光谱辐射计监测光源。旋转平板玻璃组件角度预制了 9 组线偏振度 $P_1 \sim P_9$,以 670 nm 波段为基准,不同波段略有差异,不同位置的偏振度如表 1 所示。

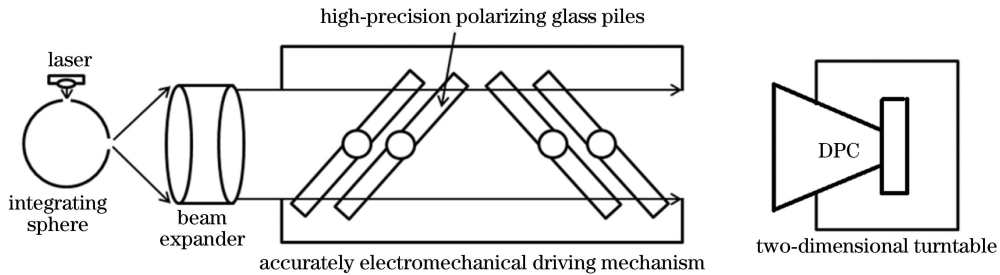


图 7 性能检测实验装置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of performance measurement experiment setup

表 1 参考光源参数

Table 1 Preset parameters of light source

Waveband /nm	DOLP of different positions								
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
490	0	0.1029	0.1528	0.2037	0.2545	0.3053	0.4063	0.5071	0.6073
670	0	0.1000	0.1500	0.2000	0.2500	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000
865	0	0.0999	0.1485	0.1981	0.2476	0.2973	0.3966	0.4962	0.5961

检测偏振成像仪不同视场,分别为 -45° 、 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 视场,以满足实际工作中多角度探测需求。仪器的测量通道中含有暗电流通道,用来实时校正暗电流影响;探测器采用

帧转移体系结构 CCD,消除帧转移效应得到有效信号。实验数据通过偏振解析计算测量值,865 nm偏振波段的计算结果如表 2 所示,偏振测量偏差均小于 0.02。

表 2 865 nm 波段的检测结果
Table 2 Measured value at wavelength of 865 nm

Preset DOLP	Measured value under different field-of-view angles						
	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°	-45°
0	0.0036	0.0027	0.0045	0.0039	0.0034	0.0048	0.0063
0.0999	0.0975	0.0963	0.0978	0.0954	0.0954	0.0954	0.0984
0.1485	0.1460	0.1473	0.1456	0.1452	0.1488	0.1483	0.1477
0.1981	0.1952	0.1973	0.1963	0.1930	0.1981	0.1975	0.1948
0.2476	0.2478	0.2467	0.2460	0.2440	0.2475	0.2468	0.2480
0.2973	0.2947	0.2973	0.2960	0.2931	0.2969	0.2955	0.2951
0.3966	0.3950	0.3960	0.3956	0.3934	0.3961	0.3966	0.3954
0.4962	0.4937	0.4952	0.4946	0.4935	0.4957	0.4958	0.4950
0.5961	0.5950	0.5972	0.5953	0.5947	0.5963	0.5955	0.5938

实验室检测表明经过工程实验后,多角度偏振成像仪的偏振探测性能满足设计指标。多视场检测方法合理,为偏振成像仪应用提供了参考。

4 外场偏振探测性能检测

天空光因大气粒子散射具有偏振特性,半球面的分布满足偏振成像仪大视场偏振光的需求,外场采用天空光进行探测,检测自然光环境下偏振探测性能。对于晴空瑞利散射偏振模型可表示为

$$P = P_{\max} \left(\frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \right), \quad (7)$$

式中: P_{\max} 为测试条件下瑞利散射模型最大偏振度; θ 为散射角; h_s 、 ϕ_s 表示太阳高度角和方位角; h_v 、 ϕ_v 表示天空光相对观测点的高度角和方位角。散射角可表示为

$$\cos \theta = \sin h_s \sin h_v + \cos h_s \cos h_v \cos(\phi_s - \phi_v). \quad (8)$$

理论模型无法对天空光作精确描述,需要使用 CE318 太阳天空偏振辐射计测量数据作为量化对比,CE318 为地基标准设备,广泛应用于地面场^[15],绝对辐射不确定度在 3%~5%。成像仪放置于楼房后以防止太阳直射,并对其进行充氮气防护,最后选用未被遮挡的数据进行定量测试。测量示意图 8 所示,CE318 偏振测量模式为太阳主平面内间隔 5° 扫描测量,两台仪器测量重叠区在太阳天顶

角 $-55^\circ \sim 10^\circ$ 的范围内,原始数据和偏振度图如图 9、10 所示。

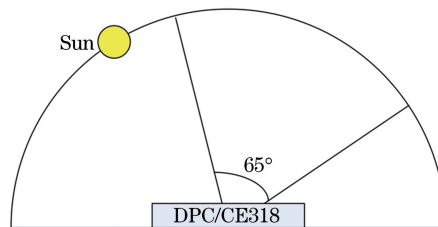


图 8 实验测量范围

Fig. 8 Measurement range of experiment



图 9 DPC 原始图像

Fig. 9 Original image of DPC

从偏振度图可以看出,天空光偏振度呈现有规律分布,和瑞利散射分布一致,在散射角 90° 附近偏振度最大,窗户玻璃反射光也出现较大的偏振度,偏振成像仪计算结果和 CE318 对比如表 3 所示。

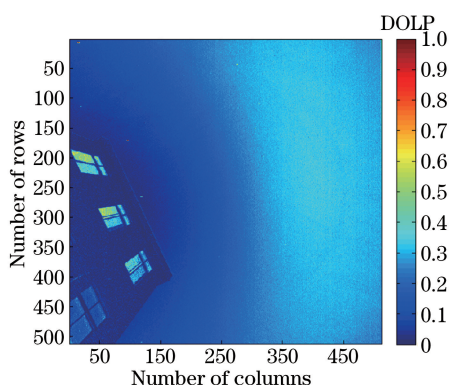


图 10 DPC 偏振度图像

Fig. 10 DOLP image of DPC

检测结果表明外场和实验室检测结果一致,偏振探测仪相对 CE318 的测量数据总体差异在 0.02 以内,满足偏振测量的精度要求,因两台设备光谱不一致,存在一定辐射误差^[24],在计算时应予以校正,外场实验验证了自然目标下偏振测量的准确性。

5 在轨偏振探测性能检测

运行期间,设计了基于大视场偏振遥感仪器的在轨检测方法,通过模型分析确定偏振探测性能为仪器状态的集中体现,在未安装星上定标设备的条件下,选用大面积海洋耀光和水云作为分析目标,通

表 3 865 nm 外场实验数据

Table 3 Measured value at wavelength of 865 nm

DOLP	Measured value under different zenith angles						
	-55°	-50°	-45°	-40°	-35°	-30°	-25°
By DPC	0.1996	0.2375	0.2856	0.3104	0.3266	0.3526	0.3401
By CE318	0.2088	0.2489	0.2904	0.3211	0.3401	0.3571	0.3548
$ \Delta P $	0.0092	0.0114	0.0048	0.0107	0.0135	0.0045	0.0147

DOLP	Measured value under different zenith angles						
	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	5°	10°
By DPC	0.3417	0.3215	0.3056	0.2746	0.2481	0.211	0.1791
By CE318	0.3514	0.3382	0.3104	0.2822	0.2483	0.2114	0.1796
$ \Delta P $	0.0097	0.0167	0.0048	0.0076	0.0002	0.0004	0.0005

过偏差分布图像在复杂多云的数据环境中直观显示仪器状态,实现覆盖不同视场的快速检测,数据获取充分。

原始数据由地面应用系统进行数据校正,地面应用系统数据处理流程如图 11 所示,首先进行暗背景扣除,帧转移校正后,依次进行杂散光校正、辐射校正、几何校正,输出 L1 级数据产品。辐射校正依据第 3 章偏振、非偏振波段辐亮度计算公式,重点是校正起偏效应。

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偏振成像仪的杂散光属于弱信号,仍然对暗目标有较强的干扰,需要做校正处理。算法优化后的杂散光校正时间占地面应用系统数据处理时间的 40%左右。

偏振成像仪杂散光分为三个方面:1)内部产生的杂散光;2)成像视场外的外部杂散光;3)成像视场内的外部杂散光。偏振成像仪光机自发辐射极弱,暂不考虑内部杂散光。对视场外杂散光进行抑制设计,优化遮光罩设计,在第二、三片透镜间设置消杂

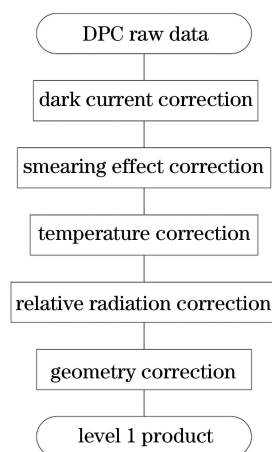


图 11 数据处理流程图

Fig. 11 Flow chart of data processing

光光阑,视场外杂散光已降至理想范围。杂散光主要源自视场内地气辐射信号,通过在透镜边缘使用消光漆、结构件黑化、相关反射面镀减反膜等方法,不能完全消除杂散光干扰,还需对数据进行处理和校正,最终使其降低到可接受范围内。

视场内杂散光按成因和校正方式不同分为局部和全局杂散光。局部杂散光主要由光学组件后端的偏振片、滤光片和 CCD 焦面之间多次反射形成；全局杂散光主要由透镜组件产生，由透镜表面、边缘反射及结构件散射形成。局部杂散光表现为像元扩展影响，使用抗光晕 CCD 防止了饱和满阱时对周围像元产生“电荷泄露”的扩展，光学仿真结合刃边法，拟合了局部杂散光分布模型，像元扩展函数如图 12、13 所示，其主要能量集中在半径为 20 个像元的范围内。

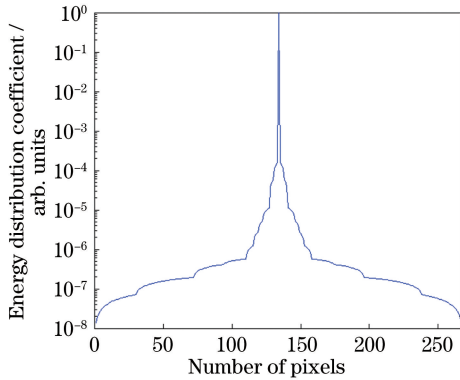


图 12 扩展函数曲线图

Fig. 12 Diffusion function curve

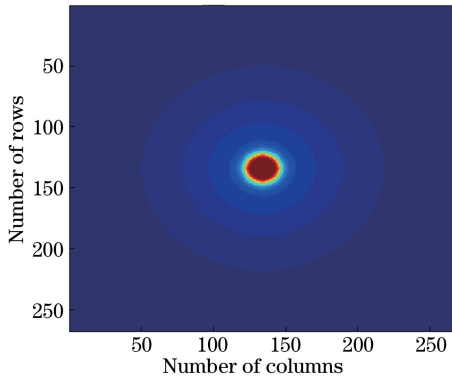


图 13 二维扩展函数示意图

Fig. 13 2D diffusion function diagram

扩展函数拟合公式可表示为

$$f(n) = f_1 \cdot \sqrt{(d_1^2 - n^2)} + f_2 \cdot \sqrt{(d_2^2 - n^2)} + \dots + f_k \cdot \sqrt{(d_k^2 - n^2)}, \quad (9)$$

式中： n 为坐标； k 为函数能量台阶状变化的数量； d 为能量变化台阶半径； f 为能量系数。台阶特征和反射面相关，通过优化拟合，叠加能量扩展系数，能够获得台阶状扩展函数。不同视场杂散光能量系数略有差别，中心视场受杂散光的影响最大，杂散光系数随视场增加约从 3.5% 变化到 1%，全视场分成 11×11 个相等矩形区域进行分视场处理，依据退化

模型 $g(x) = f(x) * h(x) + n(x)$ ，通过扩展函数 $h(x)$ 和实测信号 $g(x)$ 反卷积计算有效 $f(x)$ 。

局部杂散光校正后进行全局杂散光校正，全局杂散光为单个像元对全视场影响的叠加。采用分区域的全局杂散光系数矩阵法进行校正时，像面分视场区域能量分布矩阵可表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,11} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,11} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{11,1} & a_{11,2} & \dots & a_{11,11} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中：矩阵系数元素 $a_{m,n}$ 表示此矩形区域内所有像元信号的均值，代表能量分布平均效应。每个区域对像面产生的影响使用全局杂散光系数矩阵表示， $a_{m,n}$ 对应的全局系数矩阵 $\mathbf{B}_{m,n}$ 表示为

$$\mathbf{B}_{m,n} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,512} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,512} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{512,1} & b_{512,2} & \dots & b_{512,512} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

CCD 有效像面为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ，矩阵元素为单个像元能量因全局杂散光增加的比例系数。

全局系数矩阵数据如图 14 所示，表现为区域能量对全像面的影响，由透镜边缘散射亮环、沿着透镜中心非成像光路成像以及光机组件多次散射的微弱低频信号组成，不同区域的影响不同，图 14(a) 为中心视场区域，图 14(b) 约为 20° 视场区域。

全局杂散光校正后的有效信号计算公式为

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_1 - \sum_{m=1}^{11} \sum_{n=1}^{11} a_{m,n} \cdot \mathbf{B}_{m,n}, \quad (12)$$

式中： \mathbf{D} 为消除全局杂散光校正后的有效数据； \mathbf{D}_1 为局部杂散光校正后数据。

杂散光校正效果如图 15 所示，图 15(a) 为数据彩色合成图，显示里海区域观测数据，图 15(b) 为杂散光校正后有效信号，图 15(c) 为杂散光信号相对有效信号的比值。因高反射率云影响，校正前海水、湖泊等暗目标有不同程度的干扰叠加，北部浅水区观测数据增量 30%，东部水域观测数据增量 40%，紧邻云的中部深水区观测数据增量达 80%，故杂散光校正对使用水体的相关检测有重要影响。海洋耀光数据需进行起偏效应校正和杂散光校正，通过降低高反射率云的影响，获取有效信号。

对地面应用系统进行辐射校正以及几何校正后，完成遥感数据处理，提供逐像元多角度观测偏振信息以及经纬度和观测角度（太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角）。与地面实验室、外场

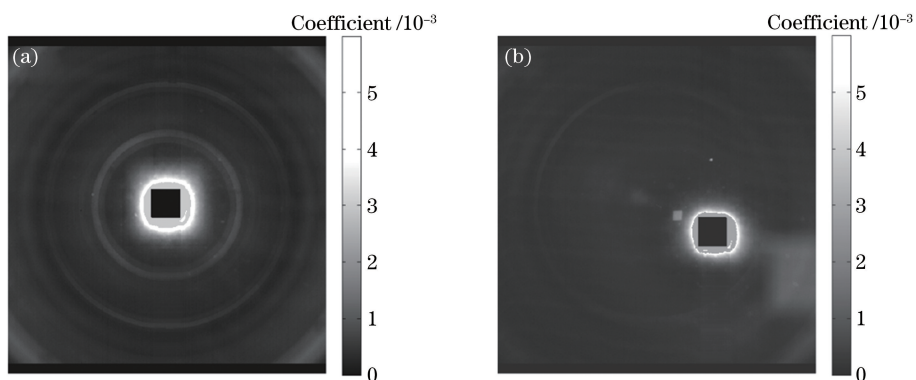


图 14 全局系数矩阵数据。(a)区域(6,6);(b)区域(7,8)

Fig. 14 Global coefficient matrix data. (a) Region (6,6); (b) region (7,8)

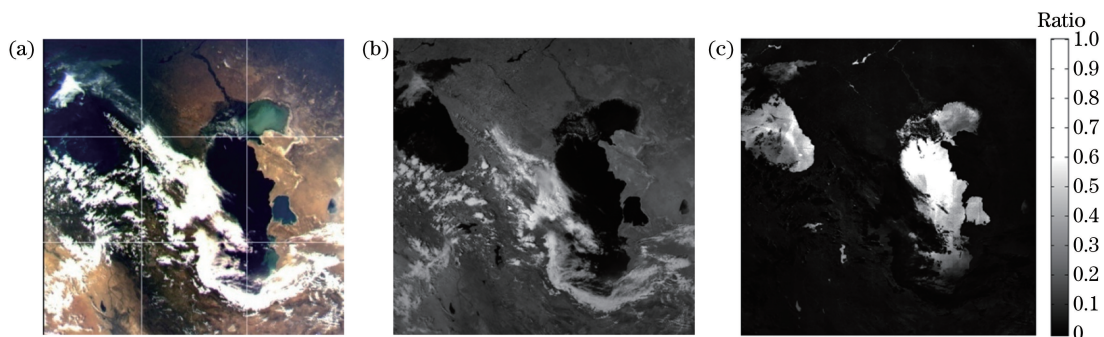


图 15 杂散光校正。(a) RGB 合成图;(b) 865 nm 杂散光校正数据;(c)杂散光信号相对有效信号的比值

Fig. 15 Stray light correction. (a) RGB image; (b) corrected data at wavelength of 865 nm;

(c) ratio of stray light signal to effective data

的静态检测不同,在轨处于动态飞行过程,具有角度敏感性,数据处理的误差源较地面检测的多,计算有效性需通过性能检测验证。

因质量、功耗等限制,偏振成像仪未设计星上定标设备,偏振检测仅依靠自然景物进行,星下点分辨率约为 3.28 km,幅宽为 1850 km,属于中低分辨率对地观测仪器,陆地上很难有合适的大幅宽场地来进行偏振检测评估。海洋占地球面积 70%,在远离海岸线的深海,海水反射特性相对均匀一致。根据菲涅耳定律,水体在太阳天顶角满足布儒斯特入射角条件时,反射光的线偏振度接近 1,是理想的偏振光源^[18-19]。云偏振特性主要依赖于粒子的形状和尺寸,球形粒子构成的水云在散射角 140°附近偏振特性呈现峰值,可以通过是否出现主虹效应来区分冰云、水云,865 nm 波段的云虹现象较 490 nm 和 670 nm 波段更为明显。偏振成像仪预览图如图 16 所示,云覆盖大于 50%,在中低纬海面可见耀光区域,设计复杂多云数据条件下的检测方法,无需无云数据筛选,数据获取充分,满足大视场偏振成像仪的快速检测条件,可有效提高时效性。

海洋上空接收到光辐射主要由水体反射、大气

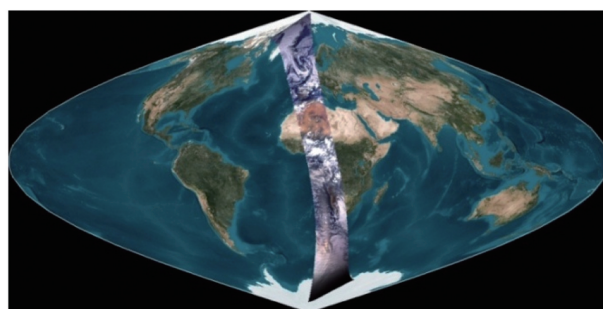


图 16 DPC 数据预览图

Fig. 16 DPC data preview

分子散射、气溶胶散射构成。海水反射模型包含海水的离水辐射、白沫辐射和耀斑辐射,计算公式为

$$L_{tot} = t(L_{ray} + L_{aer} + L_{water} + L_{whitecap} + L_{glint}), \quad (13)$$

式中: L_{ray} 为大气分子散射辐射; L_{aer} 为气溶胶散射辐射; L_{water} 为离水辐射, $L_{whitecap}$ 为白沫辐射; L_{glint} 为耀光辐射; t 为海面和卫星之间的透过率。

海面因海浪不同于平静水面,不能直接用菲涅耳公式直接计算,Cox-Munk 理论使用风速和风向建立了海浪的三维斜面模型,将海面分解为不同倾斜状态的小斜面,满足特定条件的斜面才会形成镜

面反射,耀斑区反射用 Gram-Charlier 级数表示发生镜面反射的概率分布,坡度分量的各向异性分布

受风速的影响,表示为

$$P(Z_x, Z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}\right) \cdot \left[1 - \frac{1}{2}C_{21}(\xi^2 - 1) - \frac{1}{6}C_{03}(\eta^2 - \eta) + \frac{1}{24}C_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{4}C_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \frac{1}{24}C_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3)\right], \quad (14)$$

式中参量与风速 w 相关,表达式如下: $(\sigma_x)^2 = 0.003 + 0.00192w \pm 0.002$, $(\sigma_y)^2 = 0.00316w \pm 0.004$, $C_{21} = 0.01 - 0.0086w \pm 0.03$, $C_{03} = 0.04 - 0.033w \pm 0.12$, $C_{40} = 0.40 \pm 0.23$, $C_{22} = 0.12 \pm 0.06$, $C_{04} = 0.23 \pm 0.41$, $\xi = Z_x/\sigma_x$, $\eta = Z_y/\sigma_y$, $Z_x = \frac{-\sin(\theta_v)\sin(\varphi_s - \varphi_v)}{\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)}$, $Z_y = \frac{\sin(\theta_s) + \sin(\theta_v)\cos(\varphi_s - \varphi_v)}{\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)}$ 。其中, 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。

若风向和太阳入射面不同时,还需要将 Z_x 、 Z_y 使用相对方位角进行坐标系旋转。耀光反射率表示为

$$\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{\pi P(Z_x, Z_y) R(n_{sea}, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)}{4\cos(\theta_s)\cos(\theta_v)\cos^4(\beta)}, \quad (15)$$

式中: β 为斜坡面法线方向的天顶角; n_{sea} 为海水复折射率; $R(n_{sea}, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ 为非涅耳反射系数。通过计算平行和垂直两个方向的耀光反射率数据来计算偏振度。

选择海洋耀光为偏振参考源时应减小其他辐射源的干扰,提高信噪比。海表风速小于 10 m/s 条件下白沫反射率小于 0.001,在远海地区污染少,气溶胶厚度小。使用 865 nm 波段进行说明,设定风力为 6 m/s,晴空时认为气溶胶厚度小于 0.1,观测相对方位角为 180° ,则在 $5^\circ \sim 70^\circ$ 太阳天顶角范围内耀光偏振度变化曲线如图 17 所示。

太阳天顶角与偏振度敏感性如图 18 所示,在太阳天顶角 35° 附近偏振度的最大变化量达 0.03,偏振成像仪观测的耀光中心太阳天顶角在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 敏感区间,偏振探测性能指标符合性可间接验证数据处理工作。

选取在轨测试阶段协调世界时(UTC)2018 年 5 月 28 日 20 时左右的数据,仪器 273 轨 29 景数据同时包含海洋耀光和水云虹偏振,数据强度图、偏振度图、耀光角、散射角如图 19(a)~(d)所示,球形粒子构成的水云在散射角 140° 附近偏振特性呈现峰

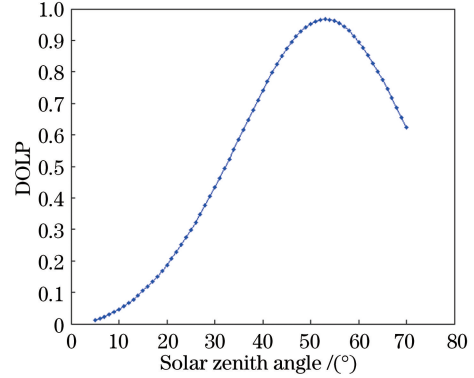


图 17 耀光偏振度变化曲线

Fig. 17 Polarization change curve of sunglint

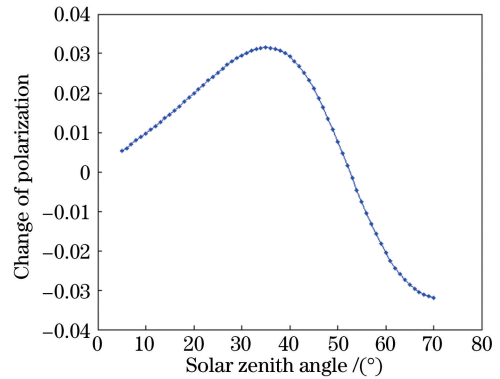


图 18 角度敏感性曲线

Fig. 18 Angle sensitivity curve

值,偏振度图像[图 19(b)]下部的虹偏振现象对应的散射角为 140° ,可判断半幅图像大部分为水云,强度图像[图 19(a)]中则无明显虹现象,体现了偏振探测对云相态识别的优势,水云虹现象可对大范围视场进行偏振评估。由于云的成分复杂,有大量混合云存在,偏振探测性能精度验证主要依靠海洋耀光进行。

单景数据为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,幅宽约为 1850 km,在图 19(a)、(b)、(c)左上部呈现耀光反射,耀斑中心像元(137 pixel, 195 pixel)对应赤道附近($S5.98^\circ$, $W102.10^\circ$),位于远海地区,评估仿真输入参数可参考 MODIS 数据或地面数据,在耀光中心附近的有效区域中气溶胶光学厚度均值小于 0.1,

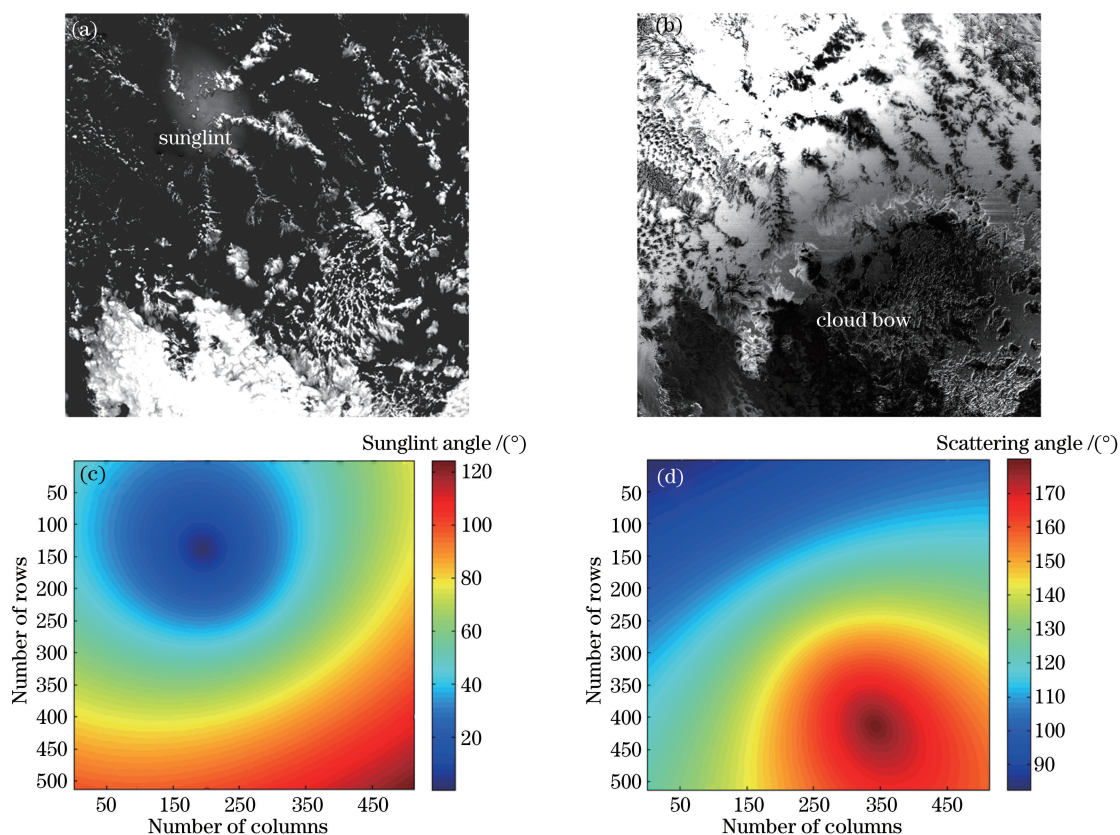


图 19 865 nm 数据。(a)强度图;(b)偏振度图;(c)耀光角图;(d)散射角图

Fig. 19 Data at wavelength of 865 nm. (a) Radiation intensity; (b) degree of polarization; (c) sunglint angle; (d) scattering angle

天气晴朗,认为气溶胶对偏振影响最小,风速均值为 6 m/s,耀光区的太阳-观测相对方位角大于 90° 以上,在此条件下风向的影响较小,可暂不考虑。耀光中心评测区域面积约 350 km^2 ,符合评估条件,辐射传输计算中考虑相对稳定的大气分子散射影响,偏振特性主要来自海水耀光。为减小光谱误差计算使用 865 nm 波段的光谱数据如图 20 所示,光谱响应度通过实验室测量获得^[25]。

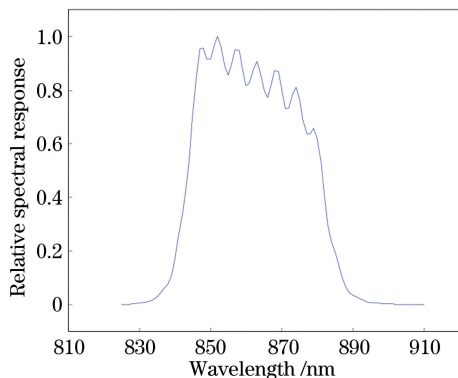


图 20 865 nm 光谱响应曲线

Fig. 20 Spectral response curve of 865 nm channel

在耀光中心区域,偏振信息主要来自耀光反射和大气分子散射。为简化计算,所有像素计算条件一致,预设大气模式为海洋模式,海洋地表模型,中心区域覆盖主要成像视场角范围,所用太阳、观测角度数据为地面应用系统计算输入,为提高检测效率,仿真数据来自预先建立的耀光数据表,耀光仿真图像数据和多角度偏振成像仪实测数据如图 21 所示。

对比图 21(a)、(b)仿真图像数据和测试数据可知,偏振度变化趋势和有效范围相同,数据测量有较好一致性,实测数据复杂多云,从图像可判断整体视场的状态,如图 21(c)消除主要云干扰后,从偏差分布图像可知偏振度误差在 0.02 以内,边缘少量数据受干扰。仿真图像和测试数据比较散点图如图 21(d)所示,偏振探测与仿真线性一致。

检测结果表明:多角度偏振成像仪在轨偏振探测性能未有明显变化,偏差分布图像直观显示仪器的整体状态,偏振度线性和精度良好,起偏效应校正、杂散光校正等数据处理有效。

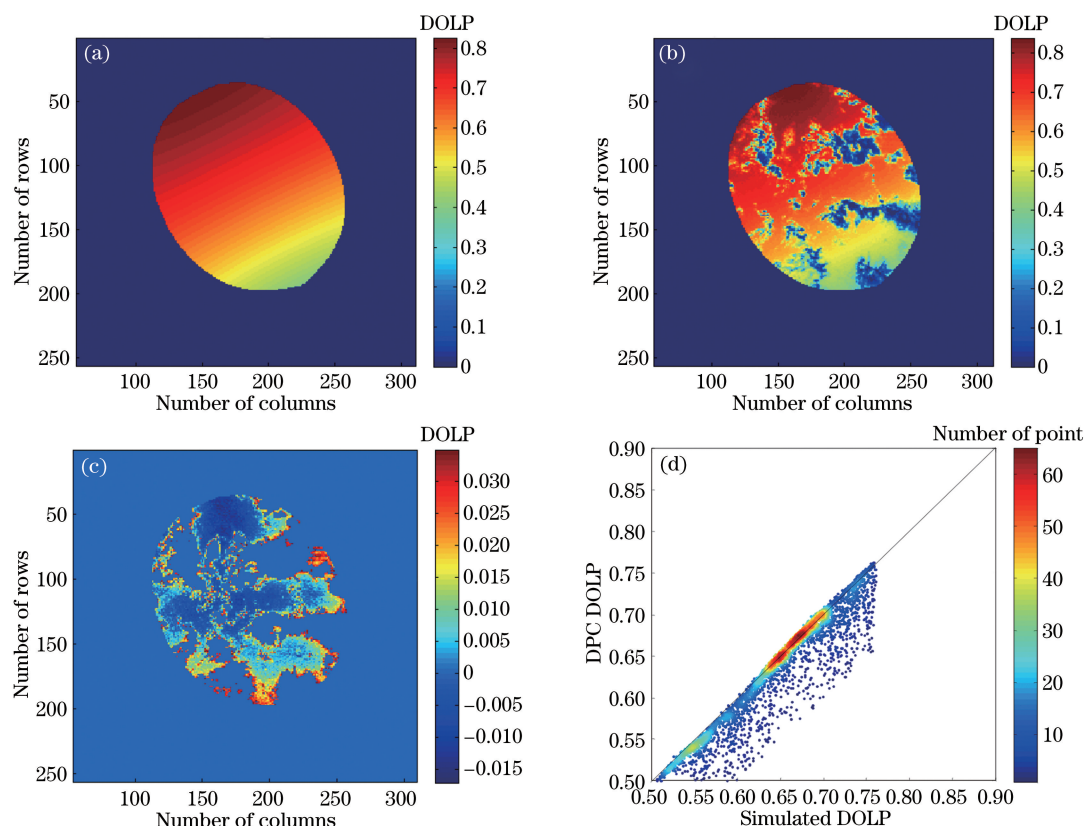


图 21 耀光区偏振分析。(a)仿真偏振度数据;(b)实测偏振度数据;(c)偏差分布图;(d)偏振度散点图
 Fig. 21 Polarization analysis of sunglint. (a) Simulation data; (b) DPC data; (c) deviation distribution;
 (d) polarization comparison scatter plot

6 结 论

多角度偏振成像仪用于全球气溶胶和云探测,通过广角方式获取偏振辐射空间信息,由于大视场光学系统的偏振特性会干扰数据质量,故实验室需要测量相关辐射偏振定标参数。偏振探测性能体现偏振成像仪的核心特性,通过实验室、外场进行了多视场检测。为快速评测在轨状态,设计了大视场偏振遥感仪器的在轨评测方法,经过起偏效应和杂散光等数据校正后,使用大面积海洋耀光和水云进行分析,在复杂多云的数据环境中直观显示仪器状态,数据获取充分,提高了时效性,检测结果表明偏振成像仪在轨运行正常,地面应用系统科学数据处理有效。实验室、外场、在轨评估的检测数据保持一致,检测数据为气溶胶和云的反演提供参考依据。

参 考 文 献

[1] Diner D J, Chipman R, Beaudry N A, et al. An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote

sensing from space[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5659: 88-96.

[2] Böttger U, Preusker R, Nieke J. Radiative transfer model STORM for full Stokes vector calculations for a plane parallel atmosphere-surface-system [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5979: 59791V.

[3] Sun Y Z, Jiang G W, Li Y D, et al. Hyper-spectral observation satellite and application prospects [J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(3): 1-13.

孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. 高光谱观测卫星及应用前景[J]. 上海航天, 2017, 34(3): 1-13.

[4] Dai J, Gao J, Fan Z G. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0505002.

戴俊, 高隽, 范之国. 线偏振光与圆偏振光后向散射偏振保持能力 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0505002.

[5] Zhang Y J, Wang X, He S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized bi-directional reflectance distribution function [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0329002.

章延隽, 王霞, 贺思. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性 [J]. 光学学报, 2018, 38(3):

- 0329002.
- [6] Chen L G, Meng F G, Yuan Y L, et al. High-precision variable polarization light source [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 1835-1839.
- [7] Cui Y, Zhao J Y, Guan L, et al. Simulation and measurement of skylight polarization distribution in Yellow Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001004.
崔岩, 赵金勇, 关乐, 等. 黄海海域天空光偏振分布仿真与测试 [J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1001004.
- [8] Xu J, Ge B Z. Simulation and analysis of polarization property in light scattering by single particle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0429001.
徐捷, 葛宝臻. 单颗粒光散射偏振特性模拟分析 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0429001.
- [9] Cui Y, Xie N, Zhang X G, et al. Sky light polarization and meridian in east China sea [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 102901.
崔岩, 谢楠, 张西光, 等. 东海海域的天空光偏振及子午线研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 102901.
- [10] Chu J K, Guan L, Li S Q, et al. Atmospheric polarization field pattern distribution and polarization navigation technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(6): 969-979.
褚金奎, 关乐, 李世奇, 等. 大气偏振模式图分布及仿生偏振导航技术 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(6): 969-979.
- [11] Wang Z Q, Fan Z G, Jin H H, et al. Neutral points recognition based on the atmospheric polarization pattern's global characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0701001.
王子谦, 范之国, 金海红, 等. 基于大气偏振模式全局特征的中性点识别方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0701001.
- [12] Gu M L. Methods for the in-flight absolute radiation calibration of space-borne remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2000, 21(1): 16-21, 25.
顾名澧. 星载遥感器在飞行时的绝对辐射定标方法 [J]. *航天返回与遥感*, 2000, 21(1): 16-21, 25.
- [13] Torres B, Dubovik O, Toledano C, et al. Sensitivity of aerosol retrieval to geometrical configuration of ground-based Sun/sky radiometer observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(2): 847-875.
- [14] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D16): 20673-20696.
- [15] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D8): 9791-9806.
- [16] Gregoris D J, Yu S K, Cooper A W, et al. Dual-band infrared polarization measurements of sunglint from the sea surface [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1687: 381-391.
- [17] 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.
- [18] Liu Z G, Zhou G H. Polarization of Sunglint [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 362-365.
刘志刚, 周冠华. 太阳耀光的偏振分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(5): 362-365.
- [19] Zhang W G. Application of polarization detection technology under the background of Sun flare on sea surface [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11(2): 231-236.
张卫国. 海面太阳耀光背景下的偏振探测技术 [J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 231-236.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Zhang H Y, Li Y, Yan C X, et al. Calibration of polarized effect for time-divided polarization spectral measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 325-333.
张海洋, 李颐, 颜昌翔, 等. 分时偏振光谱测量系统的起偏效应校正 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 325-333.
- [23] 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.
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.
- [24] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, et al.

Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812004.

张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0812004.

[25] Zhu B Q, Yuan Y L, Kang Q, et al. Research on

calibration method of in-band relative spectral responsivity of polarization remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712005.

朱冰青, 袁银麟, 康晴, 等. 偏振遥感器带内相对光谱响应度定标方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 144-151.