

高分五号多角度偏振探测仪可见光波段 在轨辐射定标研究

陈斐楠^{1,3}, 樊依哲^{1,2,3}, 洪津^{1,3*}, 黄禅^{1,2,3}, 李双^{1,3}, 杨本永^{1,3}, 涂碧海^{1,3}, 韩琳^{1,3}, 孙斌^{1,3}

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 230031;

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 对于无星上定标系统的大视场大气探测载荷,利用广阔的海洋无监测定标场(SNES)进行基于统计方法的在轨替代定标,是国际上公认和推荐的方法。基于大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)的载荷工作原理和一级数据产品的特点,在确定反射率基定标的基础上,通过海表双向反射率分布函数(BRDF)的大气传输仿真计算确定了合适的角度阈值,以降低非大气分子散射的干扰;同时对定标场的环境参量进行了统计分析,解决了统计定标中数据筛选与误差评估的核心问题,最终实现了DPC可见光波段在轨定标系数变化的精确评估。在考虑定标源和仪器实验室定标误差合成后,绝对辐射定标系数的最终定标误差在1.24%~4.76%之间。

关键词 遥感; 瑞利散射; 大气辐射传输; 在轨定标; 误差合成

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2328001

In-Flight Radiation Calibration of a Directional Polarimetric Camera at Visible Bands Onboard GF-5

Chen Feinan^{1,3}, Fan Yizhe^{1,2,3}, Hong Jin^{1,3*}, Huang Chan^{1,2,3}, Li Shuang^{1,3},
Yang Benyong^{1,3}, Tu Bihai^{1,3}, Han Lin^{1,3}, Sun Bin^{1,3}

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

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

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

Abstract The in-flight calibration of large-field atmosphere sensors without the onboard calibration system using broad sea-non equipped sites (SNES) is a recommended method. Herein, based on the working principle of the Directional Polarimetric Camera (DPC) and the characteristics of its level-1 data products and the reflection base method, the simulation of sea surface bidirectional reflectance distribution function (BRDF) transfer to the top of the atmosphere is processed to determine the appropriate threshold angle to reduce nonatmospheric molecular scattering interference. At the same time, the statistical analysis of the calibration sites' environmental parameters is analyzed to solve the data selection and incorrect budget problems. Finally, the accurate evaluation of the in-flight calibration coefficient changes of DPC at visible bands is achieved. The final calibration error of the absolute radiation calibration coefficient is between 1.24% and 4.76% subsequent to considering the calibration source and instrument laboratory calibration error synthesis.

Key words remote sensing; Rayleigh scattering; atmosphere radiation transfer; in-flight calibration; error budget

OCIS codes 280.4788; 280.4991; 010.4450

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-07-30; 录用日期: 2020-08-14

基金项目: 卢嘉锡国际合作团队项目(GJTD-2018-15)、国家自然科学基金(11504383)

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

1 引 言

大气气溶胶的偏振遥感已成为国际研究热点。由中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心研制的搭载于高分五号卫星上的大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)是立足于业务化运行的全球大气气溶胶监测载荷。其主要任务如下:获取地-气系统反射太阳光的多角度、多光谱偏振辐射数据;结合基于偏振信息的大气特性反演模型,提供全球大气气溶胶和云特性数据产品;为高分五号卫星上的其他载荷提供大气校正数据。

在可见光到近红外区域,DPC有8个观测波段,在490,670,865 nm波段具有偏振探测能力。其±50°的广角观测和转轮滤光片的连续工作方式,使其对同一地区的观测角度可以达到9个。本文在后续章节中列举了载荷在各波段的技术参数和科研描述。关于载荷更为详细的技术特点可以参看高分五号DPC的实验室定标、综述材料,以及与DPC同类型的法国POLDER、PARASOL探测器的相关文献资料^[1-5]。

气溶胶、海洋水色以及云的定量辐射探测对仪器辐射精度的要求很高,因此,DPC除了需要在实验室进行辐射定标以外,在其发射入轨以后也需要进行辐射定标系数的调整以及真实性检验,以消除发射后不确定因素造成的干扰^[6]。由于此载荷没有星上定标器,因此利用自然地物进行替代定标是必然选择^[7]。对于DPC这种大视场光学遥感器,利用传统的定标场进行星-地协同观测定标存在着定标样本不足,难以全面衡量DPC数据质量的缺点,因而利用大范围均匀地物对定标计算进行统计是必要补充。国际卫星观测组织(CEOS)的定标与真实性检验工作组(WGCV)将海洋与陆地的无监测定标场作为低空间分辨率大气探测载荷的推荐定标场。对于海洋场景,载荷的可见光光谱区的信号主要来自大气分子散射,因而可以根据大气辐射传输计算得到误差可控的替代定标源。1992年,Vermote等^[8]采用两种方法对法国的SPOT(Systeme Probatoire d'Observation de la Terre,地球观测系统)卫星可见光波段的在轨辐射进行了定标校准。为了避免太阳入射辐射强度造成的额外误差,他们采用计算表观反射率值与测量反射率值的方法来衡量在轨定标系数的变化,即“反射率基法”。在误差估计中,他们利用不同角度的数据证明了该模型的精度与太阳入射角度、观测角度有很强的相关性。经过发展,POLDER(DPC的同原理载荷)的在轨替代定标

在可见光波段也使用了相同的定标原理^[9]。在这以后,基于海洋场景,以瑞利散射为定标模型的载荷辐射定标工作更为广泛和细致。例如,Chen等^[10]对风云卫星的可见光波段进行了瑞利散射定标,而后又对中分辨率成像光谱仪(MODIS)的可见光波段进行了定标测试^[11]。与此同时,国际上也开始形成规范化的海洋定标场地的筛选与评价研究^[12-16]。

随着国内载荷研发和遥感应用的飞速发展,国产遥感器的在轨数据评估与纠正显得日益重要,特别是对业务化运行的载荷建立定期、自动化的在轨定标体系显得尤为迫切。利用外场定标和参考传感器在轨定标总是存在时空匹配的问题,而基于瑞利散射模型进行在轨定标却不受此限制,易于进行系统化和长时间序列的定标。在此背景下,本文提出了一种基于瑞利散射原理的系统化在轨辐射定标方法,基于大数据量统计定标的思想来降低在轨定标中随机误差的影响。本文以南大西洋定标场为例,使用2018年5月27日DPC载荷的一级归一化辐亮度数据,对其可见光波段进行在轨定标测试。首先分析了定标场环境参量,然后对海表双向反射率分布函数(BRDF)进行仿真模拟,用以确定合适的筛选阈值,降低各种误差的影响。本文进行的误差统计的仿真模拟表明,即使当信号较弱(670 nm波段)且输入参数在一定范围内波动时,其引起的总体的反射率误差也很小,总体误差在5%以内。

2 在轨辐射定标方法与流程

2.1 定标物理模型分析

根据光学遥感器的测量原理,遥感器测量的物理量是在整个光谱波段响应范围内按照响应函数(权重系数)进行积分平均的等效辐亮度,可以表示为

$$L_i = \frac{\int_0^{\infty} S_i(\lambda) L(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中: $L(\lambda)$ 表示目标的光谱辐亮度分布; $S_i(\lambda)$ 为传感器在第*i*波段的光谱响应函数; L_i 为对应波长的光谱辐亮度;*i*为传感器波段序号; λ 为波长。为了考虑入射太阳光辐照度的影响,在DPC的一级数据预处理中对等效辐亮度进行了归一化处理。归一化后的等效辐亮度称为归一化辐亮度,其计算公式为

$$I_i = \pi d^2 L_i / E_s^i, \quad (2)$$

式中: I_i 为归一化辐亮度; E_s^i 为*i*波段的等效太阳辐

照度; d 为天文单位下的日地距离常数。归一化辐亮度除以太阳天顶角 θ_s 的余弦即为等效反射率 ρ_i :

$$\rho_i = I_i / \cos(\theta_s). \quad (3)$$

此外,根据大气辐射传输原理,在晴朗的天气条件下,海表辐亮度在经过大气辐射传输之后到达探测器的大气层顶(TOA)辐亮度可以表示为

$$L_{\text{toa}}(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{ra}(\lambda) + T(\lambda)L_g(\lambda) + t(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda), \quad (4)$$

式中: $L_r(\lambda)$ 为瑞利散射的辐亮度; $L_a(\lambda)$ 为气溶胶多次散射辐射的贡献; $L_{ra}(\lambda)$ 为瑞利散射和气溶胶

多次散射辐射交互作用的贡献; $L_g(\lambda)$ 为耀光辐射的贡献; $L_{wc}(\lambda)$ 为海水白沫辐射的贡献; $L_w(\lambda)$ 为离水辐射的贡献; $T(\lambda)$ 和 $t(\lambda)$ 分别是大气直射和漫射的传输率。联立(2)~(4)式即可得到大气层顶的表观反射率。

2.2 DPC 偏振辐射探测原理

根据电磁场的矢量本质特性,地气系统对太阳光反射的偏振辐射比标量辐射携带更多的信息,因而成为大气偏振遥感器的重要优势。DPC 各波段的辐射参数和科研任务如表 1 所示。

表 1 DPC 各波段参数和科研任务

Table1 Band parameters and missions of DPC

Band /nm	Parameter			Mission
	Polarization	Central wavelength /nm	Band width /nm	
443	No	443.3	20	Ocean and aerosol
490	Yes	488.9	20	Ocean
565	No	564.7	20	Ocean
670	Yes	668.8	20	Vegetation and aerosol
763	No	761.4	10	Cloud
765	No	763.1	40	Aerosol and cloud
865	Yes	861.8	40	Vegetation and aerosol
910	No	907.1	20	Water content

由表 1 可见,DPC 在可见光波段涵盖了对大气、植被以及云的物理性质进行定量化探测的重要任务,并且有两个偏振波段。因而,进行精确的在轨辐射定标非常重要,且定标物理模型的建立应从仪器的偏振辐射探测原理开始。根据偏振光学原理,任意偏振态的偏振光均可由 Stokes 矢量描述。Stokes 矢量采用 I 、 Q 、 U 、 V 参数对偏振光的强度和偏振态进行描述,表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ \langle 2E_x E_y \cos \delta \rangle \\ \langle 2E_x E_y \sin \delta \rangle \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: E_x 、 E_y 分别表示正交方向的电场分量; δ 表示两个方向上电场的相位延迟; $\langle \rangle$ 表示时域平均。对于绝大多数自然目标,分量 V 是可以忽略的量,因而在偏振遥感器的设计时通常不考虑解析 V 分量,DPC 在 490,670,865 nm 波段采用 3 个方向的线偏振片(相对方向为 0° 、 60° 、 120°)来解析,即

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(E_0 + E_{60} + E_{120}) \\ Q = \frac{2}{3}(E_0 - E_{60} - E_{120}), \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}}(E_{120} - E_{60}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_0 、 E_{60} 、 E_{120} 分别为三个检偏通道测得的辐射值。从而 DPC 的仪器辐射模型可以表示为

$$DN_{i,j}^{k,a} = G \cdot t \cdot A^k \cdot T^{k,a} \cdot P_{i,j}^k \cdot (H1_{i,j}^{k,a} I_{i,j}^k + H2_{i,j}^{k,a} Q_{i,j}^k + H3_{i,j}^{k,a} U_{i,j}^k) + C_{i,j}^k, \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} H1_{i,j}^{k,a} = 1 + \epsilon_{i,j}^k \cos[2(\alpha^{k,a} - \varphi)] \\ H2_{i,j}^{k,a} = \epsilon_{i,j}^k + \cos[2(\alpha^{k,a} - \varphi)] \\ H3_{i,j}^{k,a} = \sqrt{1 - \epsilon_{i,j}^{k2}} \sin[2(\alpha^{k,a} - \varphi)] \end{cases}, \quad (8)$$

式中:上标 k 表示波段序号; i 和 j 表示传感器像元的行列号; G 为 CCD 的电子学增益; t 为探测器积分时间; A^k 为绝对辐射定标系数; $C_{i,j}^k$ 为暗电流值; $T^{k,a}$ 为偏振片的相对透过率; $P_{i,j}^k$ 表示光学系统的相对透过率; $I_{i,j}^k$ 为 k 波段第 i 、第 j 个像元检测的偏振辐射信号的强度分量; $Q_{i,j}^k$ 和 $U_{i,j}^k$ 则表示相应偏振辐射信号的线偏振分量; $H1_{i,j}^{k,a}$ 、 $H2_{i,j}^{k,a}$ 、 $H3_{i,j}^{k,a}$ 分别为光学系统的偏振效应参数; $\epsilon_{i,j}^k$ 为光学系统的起偏率; $\alpha^{k,a} - \varphi$ 代表偏振片绝对方位角与像元相对方位角之间的夹角; a 表示偏振通道的序号。对于非偏振波段,辐射模型可以简化为

$$DN_{i,j}^{k,a} = G \cdot t \cdot A^k \cdot P_{i,j}^k \cdot (I_{i,j}^k + \epsilon_{i,j}^{k,a} Q_{i,j}^k) + C_{i,j}^k. \quad (9)$$

综合(7)~(9)式可以看出,DPC 的辐射模型涉及多个参量的合成,当对在轨绝对辐射定标系

数 A^k 进行定标调整时,其他相关参量的定标精度取信于实验室定标精度,从而可以将绝对辐射定标系数的变化用归一化辐亮度数据计算得到的测量反射率与定标源反射率之比来衡量。根据此思路,为了精确评估 A^k 的变化,关键是要对在轨道标所选择的自然场景(即“替代定标源”)的辐射分布进行全面分析,即对(4)式右边每个辐亮度贡献因子的大小进行定量分析和计算。为了得到足够多的定标计算样本(目的是降低不确定度),本文根据定标与真实性检验工作组的定标指导文档,选择南大西洋幅宽约为 1000 km 的海洋无监测定标场(SNES)进行了海表环境参数与大气环境参数的统计验证,而后采用 6SV 大气辐射传输模型,根据统计参量分析了海表反射率随观测角度的变化规律,并将模拟结果作为筛选定标样本和误差估算的依据。

2.3 定标场环境参量统计与海表 BRDF 建模分析

南大西洋海洋无监测定标场(South Atlantic Sea Non Equipped Site, 以下简称为“AltS”)位于 $9.9^{\circ}\text{S} \sim 19.9^{\circ}\text{S}$ 和 $11.0^{\circ}\text{W} \sim 32.3^{\circ}\text{W}$ 之间。该定标场基本上

处于副热带高压—赤道低气压带之间的信风带,因而其海表风速、风向情况较为稳定,适合作为大视场传感器的定标场景。AltS 位置如图 1 所示。

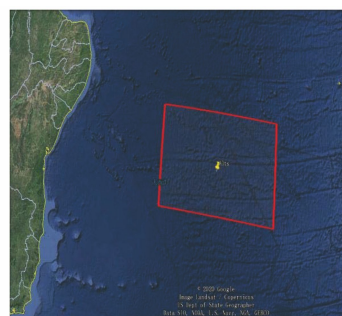


图 1 AltS 定标场在谷歌地球上的大致位置示意图
Fig. 1 Location of AltS site on Google Earth

影响海水 BRDF 的环境参量主要有海水盐度分布和海水叶绿素含量。本文的盐度数据是对 SMAP 和 SMOS 卫星海表盐度产品的月均数据进行统计得到的,而海水叶绿素含量数据则是对 MODIS 海洋水色产品的全球月均数据进行统计得到的。它们在定标场中含量的统计直方图如图 2 所示。

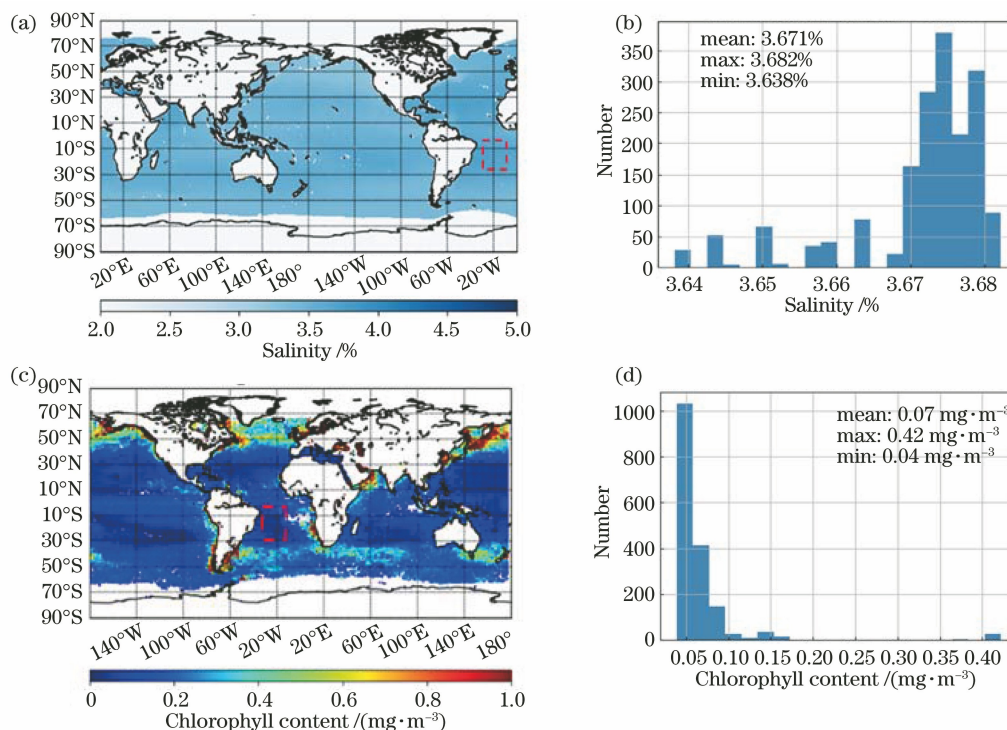


图 2 海水杂质含量统计。(a)海水盐度的全球月均分布;(b) AltS 定标场的盐度统计直方图;
(c)海水叶绿素含量的全球月均分布;(d) AltS 定标场的叶绿素含量统计直方图

Fig. 2 Statistics of sea water impurity content. (a) Global monthly distribution of seawater salinity; (b) statistical histogram of salinity of AltS site; (c) global monthly distribution of seawater chlorophyll content; (d) statistical histogram of chlorophyll content of AltS site

图 2(a)、(c)绘制了 2018 年 5 月份全球海洋盐度和叶绿素含量的分布;图 2(b)、(d)给出了这两个量的直方图统计结果,横轴代表每个样本点的杂质含量,纵轴为统计频次。通过统计分析可以得到当月 AltS 定标场的盐度均值为 3.671%,叶绿素质量浓度均值为 0.07 mg/m³, 离群值发生的概率很小。因而本文在模型仿真和定标计算时均采用这两个均值作为输入参数。

影响海洋定标场 TOA 反射率的另外一个重要因素是大气环境,包括吸收气体的影响和气溶胶辐射强迫效应,以及海表上空风速、风向变化对海表 BRDF 产生的随机影响。这里统一采用欧洲中期天

气预报中心(ECMWF)的六小时气象再分析数据统计了定标场的风矢量、水汽含量和臭氧含量的时空变化。

图 3(a)表示定标场统计的风速、风向玫瑰图,不同的色块表示不同的风速,风向坐标为 8 个(沿顺时针方向依次为:N、N-E、E、S-E、S、W-S、W、N-W),径向长度代表概率的大小,由此得出定标场当日风速在 7 m/s 以下的概率达到了 70%以上,且风向基本在 S-E 到 E 之间(定量计算均值约为 110°)。此外,当日臭氧含量的波动量在 247.29 ~ 255.23 DU 之间波动,水汽的质量浓度则在 1.89 ~ 2.46 mg/m³ 之间波动,均值为 2.16 mg/m³。

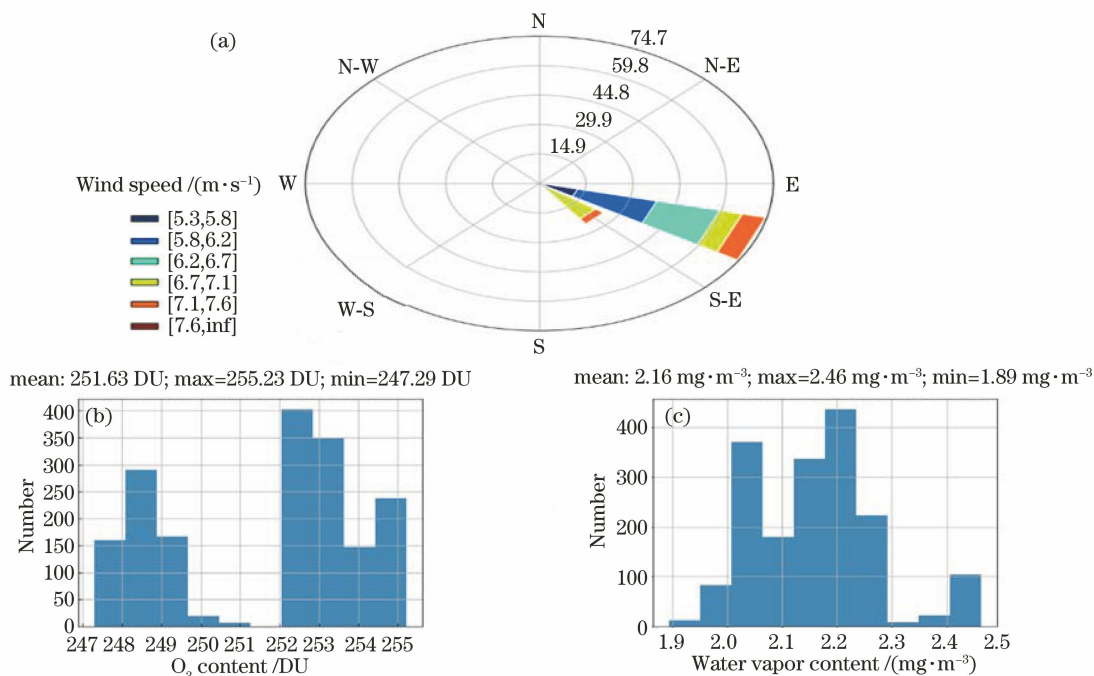


图 3 2018 年 5 月 27 日定标场的大气参数统计。(a)风矢量玫瑰图;(b)臭氧含量统计直方图;(c)水汽含量统计直方图
Fig. 3 Statistical results of atmosphere parameters of AltS site on May 27, 2018. (a) Wind vector rose statistical diagram; (b) ozone content statistical histogram; (c) water vapor content statistical histogram

由于 DPC 具有多角度观测功能,可以在同一个地点选择合适的角度阈值,因此本文将定标场的统计均值作为大气辐射传输的正演模型输入,模拟了海洋定标场各要素在 TOA 反射率中随观测角度的变化,从而确定了合适的角度输入阈值。大气辐射传输算法采用 6SV 2.1 版本,模拟结果如图 4 所示。

图 4(a)、(b)的横轴分别代表相对方位角和观测天顶角,纵轴代表各分量反射率,仿真输入条件为太阳天顶角 40°,观测天顶角 40°。环境参量采用前

面分析的统计均值。结果显示,瑞利散射占主要信号的相对方位角区间约为 90°~120°以及 240°~290°,在此区间内,相对于瑞利散射,其他因素的影响基本为独立于角度变化且处于较低的数量级(即可以认为是白噪声)。在图 4(b)中,将相对方位角设置为 250°,将观测天顶角设置为自变量,其他参数与图 4(a)的输入值保持一致,结果显示,在 35°~45°区间内,气溶胶和耀光反射率在较低的水平上。该模拟结果将被作为定标流程中数据筛选步骤的角度阈值。

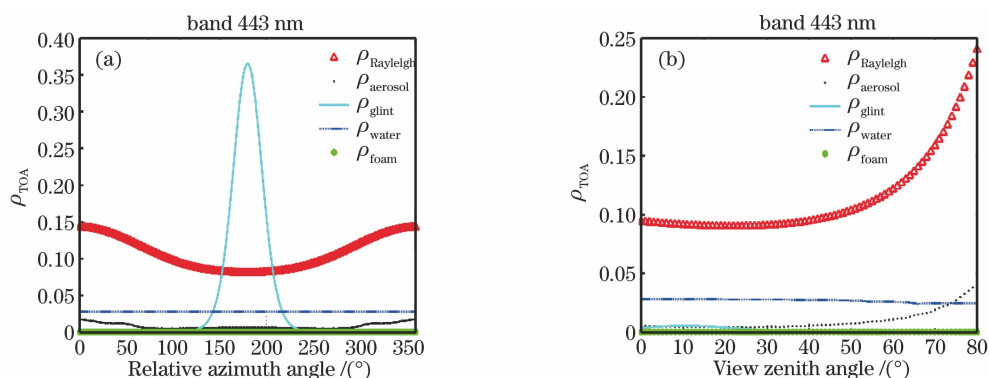


图 4 模拟结果。(a)固定太阳天顶角与观测天顶角的情况下,定标场 TOA 各分量反射率随相对方位角的变化;
(b)固定太阳天顶角与相对方位角的情况下,定标场 TOA 各各分量反射率随观测天顶角的变化

Fig. 4 Simulation results. (a) Variations of components' reflectances vary with relative azimuth angle in the case of fixed solar zenith angle and view zenith angle; (b) variations of components' reflectances vary with view zenith angle in the case of fixed solar zenith angle and relative azimuth angle

2.4 定标流程

DPC 载荷的 level-1B 级数据格式为 h5 格式,对 DPC 每轨回传的 0 级图像数据(DAT 格式)和工程辅助参数(AUX 格式)进行预处理(预处理大致包含帧转移校正、暗通道本底扣除、偏振辐射定标计算、坐标系转换和投影变换等操作),最终输出大地坐标系下正弦投影网格的归一化辐亮度数据。在预处理算法中已进行了考虑日地距离校正的太阳辐照度计算^[17]。为了保存地理定位信息,DPC 每轨的一

级数据保留了未探测区的大量无效数据,使得每轨数据量在 2.8 GB 左右,单日总数据量为 35 ~ 40 GB。为了实现自动化定标,根据图 5,本文首先对每日数据进行合成,得到了全球单日一级数据集,从而使得每日的数据总量降低至 15 GB 左右;而后根据定标场经纬度划分出感兴趣区域(ROI),提取该区域的多维数据矩阵(包括归一化辐亮度数据以及观测几何数据),如图 6(a)所示;接着利用云检测算法,得出定标场的云掩模,如图 6(b)所示。

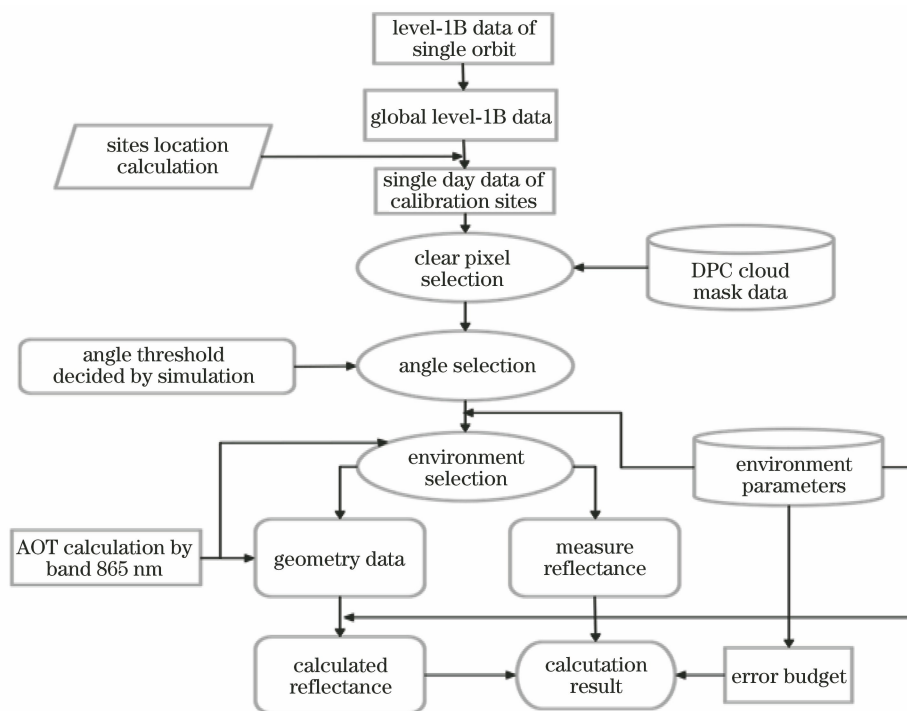


图 5 在轨辐射定标流程图

Fig. 5 Flow chart of in-flight radiation calibration

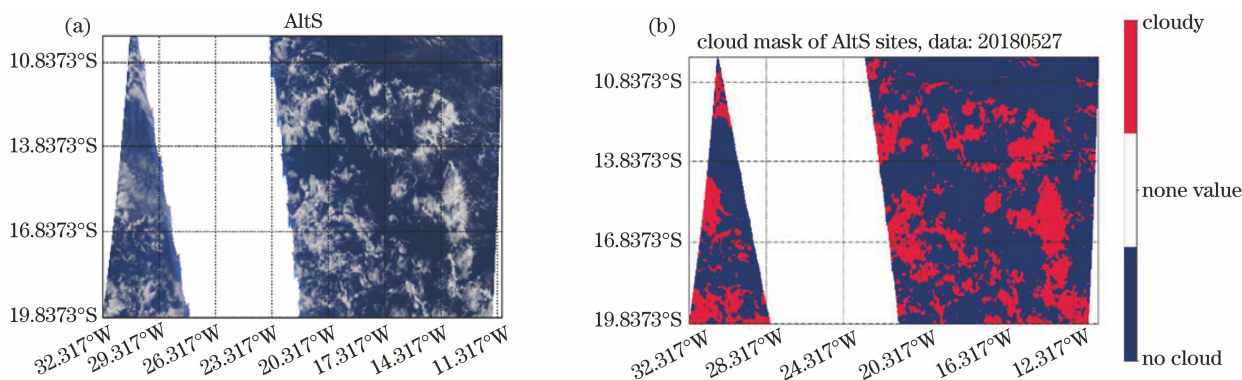


图 6 2018 年 5 月 27 日 DPC 对 AltS 定标场的成像数据。(a)真彩色波段合成图;(b)云掩模图
Fig. 6 Imaging data of AltS site of DPC on May 27, 2018. (a) Real color band fusion image; (b) cloud mask image

在进行云像元和角度筛选之后,剔除环境参量中的离群值对应的网格(风速>7 m/s,叶绿素质量浓度>0.15 mg/m³)。最后利用 DPC 长波波段(865 nm)估算气溶胶光学厚度(AOT),并将估算

结果与 MODIS 的 AQUA 星光学厚度产品的结果进行对比,剔除绝对值之差大于 0.01 的值以及两者气溶胶光学厚度>0.1 的值,结果如图 7 所示(白色区域为 none 值)。

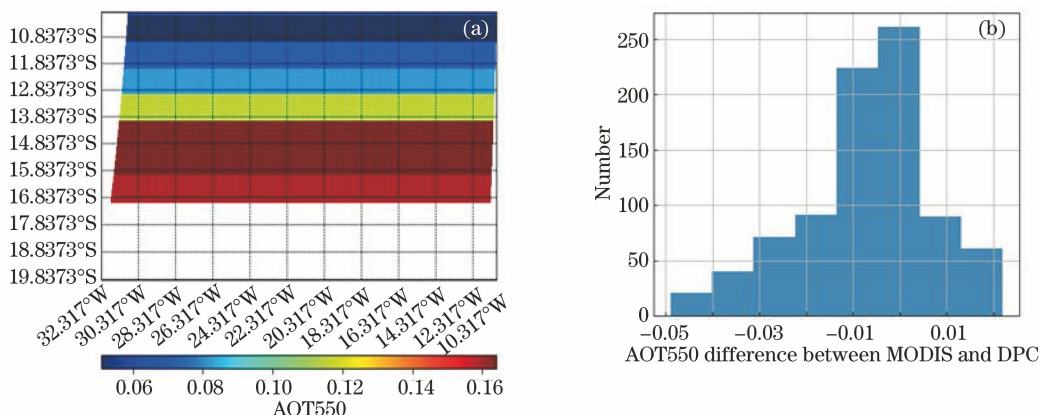


图 7 2018 年 5 月 27 日 AltS 定标场的气溶胶光学厚度分布。(a) AltS 定标场 MODIS 气溶胶 AOT550 分布;
(b) MODIS 与 DPC 反演光学厚度差值分布直方图
Fig. 7 Distribution of AOT550 at AltS site on May 27, 2018. (a) Distribution of AOT550 of MODIS at AltS site;
(b) histogram of AOT550 difference between MODIS and DPC

在进行数据筛选以后,将定标场各环节参量的统计均值、各样本点气溶胶光学厚度以及 DPC 在可见光波段的光谱响应函数作为输入(如图 8 所示, x 轴表示波长, y 轴表示归一化光谱响应率),利用 6SV 算法进行各个波段的定标计算,并确定辐射定标系数的变化(见下文),最后将各参量的统计偏差代入辐射传输模型进行误差的计算与统计。

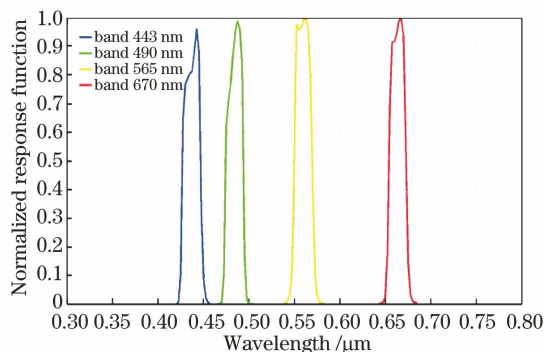


图 8 DPC 在可见光波段的光谱响应函数
Fig. 8 Spectral response functions of DPC at visible bands
式中: ρ_{measure} 表示 DPC 的测量反射率; $\rho_{\text{calibration}}$ 表示定标计算的反射率。 ΔA 是利用定标样本点的测量值与定标计算预测值之比的均值来确定的,当其大

3 在轨辐射定标结果与误差分析

3.1 定标结果

根据仪器辐射模型的定义,平均偏差系数的计算公式为

$$\Delta A = 1 - \text{mean}\left(\frac{\rho_{\text{measure}}}{\rho_{\text{calibration}}}\right), \quad (10)$$

于 0 时,代表测量值总体上小于定标值,小于 0 则相反。在经过 2.1 节所述的筛选后,在 Alts 定标场上

得到了 2966 个定标样本点。4 个可见光波段的定标结果如图 9 所示。

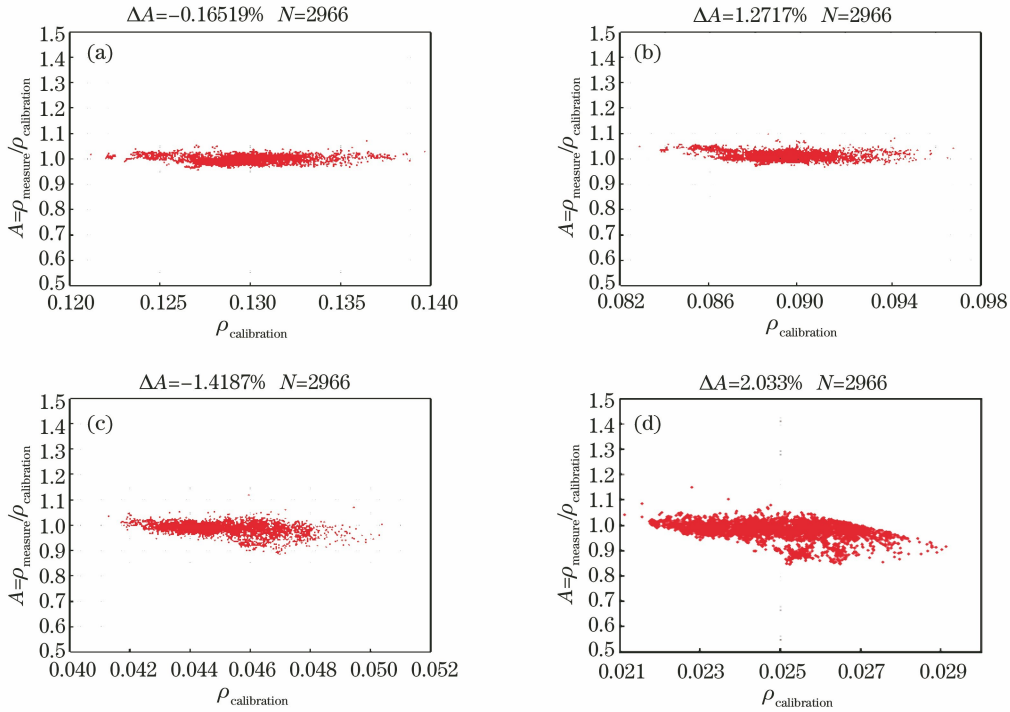


图 9 各波段的在轨辐射定标统计结果。(a) 443 nm 波段;(b) 490 nm 波段;(c) 565 nm 波段;(d) 670 nm 波段

Fig. 9 Statistical results of in-flight radiation calibration. (a) Band 443 nm; (b) band 490 nm; (c) band 565 nm; (d) band 670 nm

图 9 横轴为定标计算得到的反射率,纵轴是(10)式定义的绝对辐射定标系数偏差。综合图 9(a)~(d)可见,443 nm 波段的绝对辐射定标系数偏差最小。这是由于在此波段的 TOA 辐亮度中,瑞利散射造成的辐射分量最强,相对而言,海面和气溶胶的波动造成的总体天顶反射率的波动很小。670 nm 波段的绝对辐射定标系数偏差最大,这是由于总体信号的削弱(总体反射率只相当于 443 nm 波段的 1/6)导致气体和海面波动的反射率变化纠缠在一起。本文算法没有全面分析气溶胶的影响(例如气溶胶模式等),但总体偏离均值依然在 2%左右,充分说明了仪器的可靠性与探测数据的真实性。

3.2 误差统计和定标不确定度分析

根据瑞利散射定标的场景和数据筛选原则,在定标中可以将场景的平均环境参量作为输入,这将有助于建立基于场景的查找表,从而进行更大规模的定标计算与统计。误差分析的总体思路是将各定标参量的偏差值作为输入进行大气辐射传输计算得到 TOA 反射率,并将其与对应均值计算时的 TOA 反射率之差作为绝对误差,用绝对误差除以定标结果的反射率区间均值 $\bar{\rho}$ 来估算相对

偏差。在分析单个因素的影响时,其他因素仍然以均值作为输入,且在分析中本文将 4 个角度统一为散射角(作为自变量),用以分析误差随观测角度的变化。图 10~13 的横轴为散射角 θ ,单位为度,纵轴为反射率的绝对偏差。

3.2.1 海表 BRDF 模型的误差

海表的 BRDF 模型主要由风速、风向以及海表的杂质含量构成。根据统计数据,本文以 1 m/s 的风速偏差、30°的风向相对偏差分别进行大气传输计算,计算公式为(11)式和(12)式,结果如图 10 所示。风速偏差对各波段造成的绝对反射率误差大致在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 之间。

$$\Delta\rho = \text{abs}(\rho_{\text{toa}}^{\text{ws}=6} - \rho_{\text{toa}}^{\text{ws}=5}), \quad (11)$$

$$\Delta\rho = \text{abs}(\rho_{\text{toa}}^{\text{wa}=0} - \rho_{\text{toa}}^{\text{ws}=30}), \quad (12)$$

式中: $\Delta\rho$ 代表计算反射率误差; ρ_{toa} 代表天顶计算反射率;上标分别代表不同的输入条件,ws 和 wa 代表风向。

此外,海水中杂质含量的偏差也会造成定标计算值的误差。根据第 2 节的统计结果,盐度的变化在很小的范围内,它所造成的反射率变化也在很小的范围内,所以这里没有计算由盐度偏差导致的定标计算误

差。将叶绿素含量的最大偏差值 0.15 mg/m^3 与均值 0.07 mg/m^3 分别代入辐射传输模型进行计算(大于 0.15 mg/m^3 的值为离群值,在样本筛选中已经去除),结果显示,叶绿素含量偏差造成的绝对反射率误

差在 443 nm 波段为 0.0025 (最大),在 490 nm 波段为 0.0002 ,在 565 nm 波段为 0.0005 ,在 670 nm 波段约为 0.0001 。根据曲线形状可以看出,该因素造成的误差是独立于角度变化的。

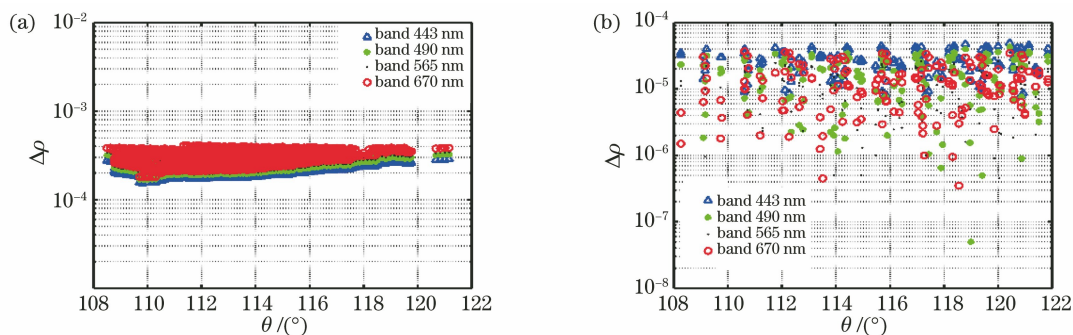


图 10 风速与风向的统计偏差造成的 TOA 反射率误差。(a) 1 m/s 的风速相对偏差造成的 TOA 反射率误差; (b) 30° 的风向相对偏差造成的 TOA 反射率误差

Fig. 10 TOA reflectance difference induced by the deviation of wind speed and wind azimuth. (a) TOA reflectance difference induced by the deviation of wind speed difference of 1 m/s ; (b) TOA reflectance difference induced by the deviation of wind azimuth difference of 30°

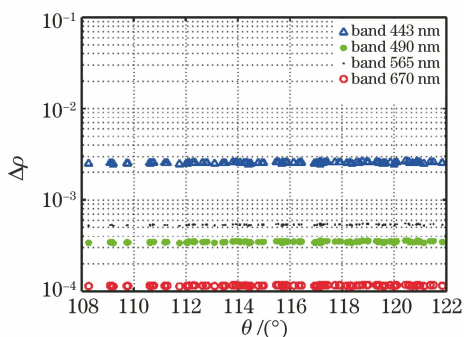


图 11 叶绿素含量的统计偏差造成的 TOA 反射率误差
Fig. 11 TOA reflectance difference induced by the deviation of chlorophyll content

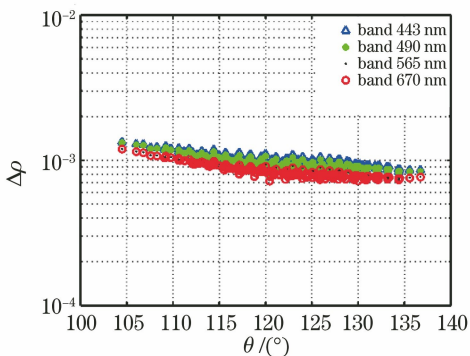


图 12 由气溶胶光学厚度数据偏差造成的 TOA 反射率误差
Fig. 12 TOA reflectance difference induced by the deviation of AOT550 data

3.2.2 气溶胶光学厚度误差

气溶胶的参照数据选择 Aqua 卫星上中分辨率

成像光谱仪(MODIS)的 AOT550 数据产品,参照数据来源于 NASA 的地球科学数据分析处理与可视化系统 GIOVANNI。由于本文采用了数据筛选控制,因此 550 nm 波段的气溶胶光学厚度的误差在 0.01 以内。根据海洋科考船的实验^[15],定标场所在地区的气溶胶类型基本上是 Maritime 类型的,所以在这里不考虑气溶胶类型变化引起的误差。按照(13)式(上标 aot 代表 550 nm 波段气溶胶光学厚度)计算可知,在所选角度范围合成的散射角内,气溶胶光学厚度的不确定度造成的误差在各波段大致相等,约为 0.001 。该值将对信号较弱 的 565 nm 和 670 nm 波段产生较大的相对误差,如图 12 所示。

$$\Delta\rho = \text{abs}(\rho_{\text{toa}}^{\text{aot}=0.08} - \rho_{\text{toa}}^{\text{aot}=0.07}) \quad (13)$$

3.2.3 大气气体含量误差

大气气体的影响主要由水汽、臭氧等吸收气体含量的变化引起,在可见光波段大气气体的影响相当微弱,因而本文只考虑水汽含量变化造成的影响,因而模拟参数输入为

$$\Delta\rho = \text{abs}(\rho_{\text{toa}}^{\text{H}_2\text{O}=2.46} - \rho_{\text{toa}}^{\text{H}_2\text{O}=1.89}) \quad (14)$$

式中上标 H_2O 代表大气中水汽的质量分数。结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出,水汽含量变化造成的可见光波段的绝对反射率误差非常小,为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。根据以上分析,可以得到 DPC 可见光波段的定标误差统计,如表 2 所示(正负号省略)

表 2 中的 $\Delta\rho$ 是环境参量影响的定标源反射率

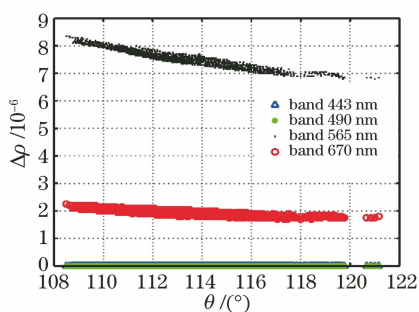


图 13 水汽含量数据偏差造成的 TOA 反射率误差
Fig. 13 TOA reflectance difference induced by the deviation of water vapor concentration

误差,下标表示不同的环境参量,最终可以通过误差合成确定各波段大气层顶反射率的相对误差

表 2 DPC 在可见光波段的在轨定标源误差分析

Table 2 Error analysis of the source of in-flight calibration of DPC at visible wavelength bands

Band /nm	$\Delta\rho_{ws}/10^{-4}$	$\Delta\rho_{wa}/10^{-5}$	$\Delta\rho_{chl}/10^{-4}$	$\Delta\rho_{aot}/10^{-3}$	$\Delta\rho_{H_2O}/10^{-6}$	$\Delta\rho_{total}/10^{-3}$
443	2.5	4.0	25	1	0	2.70
490	3.0	3.0	2.0	1	0	1.06
565	3.0	1.5	5.0	1	100	1.16
670	4.0	1.5	1.0	1	10	1.19

表 3 DPC 在可见光波段的在轨定标误差合成

Table 3 Error budget of in-flight calibration of DPC at visible wavelength bands

Band /nm	$\bar{\rho}$	$\frac{\Delta\rho_{total}}{\bar{\rho}} / \%$	$\frac{\Delta T}{T} / \%$	$\frac{\Delta P}{P} / \%$	$\sigma(\Delta A) / \%$
443	0.130	2.08	0.20	0.30	2.10
490	0.090	1.18	0.20	0.30	1.24
565	0.046	2.52	0.20	0.30	2.53
670	0.025	4.75	0.20	0.30	4.76

4 结 论

遥感探测器定标的理想状态是“全过程定标”^[19],即从实验室研发开始,到在轨运行寿命结束的整个环节予以定期检测与定标系数更新。本文利用海洋无监测定标场对 DPC 可见光波段进行辐射定标的验证研究,旨在提供一种系统性的统计定标流程和方法,实现载荷在轨运行时的长期自动化检测和绝对辐射定标系数的校正。本文的研究工作表明,对于 SNES 定标场而言,通过环境参量统计及观测角度的数据筛选,在可见光波段可以得到足够数量的理想定标源,即使环境输入参数不完备或有误差,也可以将海表的随机性和气溶胶的误差控制在较低的水平上。然而,严格的角度的筛选使得角度的长度有限,故而无法进行整个载荷成像面的相对辐射系数的定标;同时,在近红外波段需要加入关于气溶胶和大气条件的更为精确和完备的反演模块来

$\Delta\rho_{total}/\bar{\rho}$,如表 3 第三列所示,其中 $\bar{\rho}$ 为平均反射率,如表 3 第二列所示,此即为替代定标源的误差。而传递到最终需要调整的绝对辐射定标系数的误差则需通过辐射模型结合其他相关参量的误差进行传递,由于本文只以绝对辐射定标系数为研究对象,且不考虑替代定标源的偏振特性,因而在非偏振波段(443 nm 和 565 nm),仪器误差仅需要考虑光学系数相对透过率误差 $\Delta P/P$,而在偏振波段(490 nm 和 670 nm),则需要考虑光学系统相对透过率定标误差和偏振片相对透过率定标误差 $\Delta T/T$ 的合成误差,这些参量均取信于实验室定标误差^[18]。最终合成的各波段绝对辐射定标系数的定标误差如表 3 中的 $\sigma(\Delta A)$ 所示。

降低误差,或者可以结合其他定标方法进行综合评价^[20-22]。就程序本身设计来说,6SV 算法程序的过多调用是大规模应用的瓶颈,尽管可以通过多线程(进程)架构来提升效率,但可以预见,建立基于定标场和定标模型的查找表是大数据量、自动化在轨替代定标技术的发展趋势。从载荷设计角度而言,定标是仪器设计、生产完成后弥补仪器缺陷的手段,而在轨定标又是在实验室定标校正之后保障载荷数据可靠性的最后屏障,因而本文的工作对载荷的科研应用乃至新型载荷的后续研发具有重要作用。

参 考 文 献

[1] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 218: 21-37.
[2] Li C, Ma J J, Yang P, et al. Detection of cloud cover

- using dynamic thresholds and radiative transfer models from the polarization satellite image [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 222/223: 196-214.
- [3] Li L, Dubovik O, Derimian Y, et al. Retrieval of aerosol components directly from satellite and ground-based measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(21): 13409-13443.
- [4] Goloub P, Toubbe B, Herman M, et al. In-flight polarization calibration of POLDER[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2957: 299-310.
- [5] Chang Y Y, Sun B, Huang C, et al. Cloud detection and parameter inversion using multi-directional polarimetric observations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101002.
常钰阳, 孙斌, 黄禅, 等. 多角度偏振云检测及云参数反演[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101002.
- [6] Deschamps P Y, Breon F M, 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.
- [7] Gu X F, Tian G L, Yu T. Space optical remote sensor radiometric calibration theory and methods [M]. Beijing: Science Press, 2013.
顾行发, 田国良, 余涛. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] Vermote E, Santer R, Deschamps P Y, et al. In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(18): 3409-3429.
- [9] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, et al. Results of POLDER in-flight calibration [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1999, 37(3): 1550-1566.
- [10] Chen X F, Xing J, Liu L, et al. In-flight calibration of GF-1/WFV visible channels using Rayleigh scattering[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 513.
- [11] Zhu S F, Chen X F, Liu L, et al. Evaluation of radiometric performance of MODIS visible bands using the Rayleigh scattering method[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13(1): 018503.
- [12] Frouin R, Sei A, Hauss B, et al. Operational in-flight calibration of NPP VIIRS in the visible using Rayleigh scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9218: 921806.
- [13] Fougnie B, Henry P, Morel A, et al. Identification and characterization of stable homogeneous oceanic zones: climatology and impact on in-flight calibration of space sensor over Rayleigh scattering [J/OL]. *Ocean Optics XVI* [2020-06-24]. [http://omtab.obs-
vlfr.fr/fichiers_PDF/Fougnie_et_al_OOXVI_02.pdf](http://omtab.obs-vlfr.fr/fichiers_PDF/Fougnie_et_al_OOXVI_02.pdf).
- [14] Zhao W, Lin M S, Chen G M, et al. Study of exact Rayleigh scattering arithmetic for COCTS sensor on “HY-1” satellite [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(3): 139-143.
赵崑, 林明森, 陈光明, 等. “HY-1”卫星 COCTS 水色遥感器精确瑞利散射算法研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(3): 139-143.
- [15] Witthuhn J, Hünerbein A, Deneke H. Evaluation of satellite-based aerosol datasets and the CAMS reanalysis over the ocean utilizing shipborne reference observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(3): 1387-1412.
- [16] Wang M H. The Rayleigh lookup tables for the SeaWiFS data processing: accounting for the effects of ocean surface roughness[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2693-2702.
- [17] Tu B H, Hong J, Yao P P, et al. Polarization detection performance of directional polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0712003.
涂碧海, 洪津, 姚萍萍, 等. 多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0712003.
- [18] Huang C, Huang C, Huang C, et al. Pre-flight calibration of a multi-angle polarimetric satellite sensor directional polarimetric camera [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13187-13215.
- [19] Qiao Y L, Zheng X B, Wang X H, et al. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 616-623.
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 616-623.
- [20] Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical satellite camera based on wide dynamic targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1028004.
徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1028004.
- [21] Feng X, Han C P, Zou Y P, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0630002.
冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0630002.
- [22] Zhang M, Wei W, Zhang Y N, et al. On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0528002.
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. Hyperion 高光谱遥感器的在轨自动化定标[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0528002.