

光学学报

基于冰雪场景的大视场遥感器在轨辐射定标方法

潘雨薇^{1,2}, 陈斐楠¹, 骆冬根^{1*}, 孙亮¹, 王羿¹, 纪峰², 陈晶晶², 洪津¹

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, 安徽 合肥 230031;

²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 场景定标是大视场遥感器在轨替代定标的常用方法,具有定标频率高、无需同步测量的优点。冰雪场景通常使用格陵兰冰盖(75°S, 123°E)和南极冰盖(73.375°N, 40°W)作为目标,由于其海拔较高(通常大于 2 km),故受到大气影响较小,能够得到数据质量较好的定标样本。此外,冰雪在可见光范围以内光谱较为平坦,因而比较方便借助于其他定标方法实现波段传递。基于对前人极地场景定标方法的研究,将冰雪场景的地表双向反射分布函数(BRDF)和大气参数代入辐射传输模型之后,对我国高分五号卫星大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)载荷的在轨辐射响应变化进行测试,得出的结论与沙漠场景和海洋场景的定标结果吻合度较高,且定标结果的离散度更小。所提方法可以对载荷在轨运行期间的探测数据提供长期监测、校正,并有助于业务化应用产品的质量提升。

关键词 在轨辐射定标; 冰雪场景; 辐射传输; 地表双向反射分布函数模型

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222106

1 引言

卫星遥感器在轨绝对辐射定标是遥感数据量化应用的前提和基础,对提高遥感数据产品质量具有重要意义。在轨定标主要包括了星上定标与场地替代定标等方式。星上定标以地面实验室基准作为参考源,而场地定标以自然场景作为参考源代替实验室和星上定标器来标定在轨器件的观测数据,具有定标频率高、无需同步测量且成本较低的优点。因此,基于自然场景的在轨替代定标成为监测遥感器在轨辐射探测精度的重要方法。定期对卫星遥感器进行在轨辐射定标,通过检验遥感器性能的变化从而满足遥感定量化应用的精度要求^[1-2]。

目前国际上提出了多种均匀稳定目标的场地定标方法。位于非洲的撒哈拉沙漠定标场和我国西北的敦煌定标场、青海湖定标场,以及南北极的冰川定标场是目前国内外应用最为广泛的辐射稳定定标场^[3-5]。地球上现存的大陆冰盖有格陵兰冰盖(75°S, 123°E)和南极冰盖(73.375°N, 40°W),其表面覆盖着均匀分布的永久积雪,受大气影响小且相对稳定^[4]。此外, Cao 等^[6]利用海洋观测宽视场(SeaWiFS)和中分辨率成像光谱仪(MODIS)对南极 Dome C 站点的长期辐射稳定性研究表明,两个极地冰雪在可见光波

段的反射率保持稳定。因此,格陵兰冰盖和南极冰盖的地表和大气相对稳定性为遥感器的定标和验证提供了许多优势。Warren 等^[7]基于南极洲 22 m 高塔在 600、660、900 nm 波长处的测量结果建立了一个南极雪地的双向反射分布函数(BDRF)数学模型,并使用此模型对 NOAA-9 至 NOAA-11 卫星上的多光谱通道辐射扫描仪(AVHRR)进行定标^[8]。Hudson 等^[9]基于南极洲 32 m 高塔的测量结果拓展了 Warren 模型并证明该模型在 350~1400 nm 波长内有 2%~4% 的偏差。随后 Jaross 等^[10]改进了 Warren 模型,使用臭氧层检测仪(OMI)和多光谱成像观测仪(MISR)观测数据对改进的 BDRF 模型进行评估以及对卫星遥感器进行了定标,证明了模型不确定度范围在±2% 以内时会有更好的定标精度。Viallefont-Robinet 等^[11]在 Sentinel-2 卫星的多光谱成像仪(MSI)在轨监测的框架下,提出了一种在 0.35~0.9 μm 波段进行带间定标验证新方法,并在南极 Dome C 站点进行了验证,结果表明该测量结果与其他方法的测量结果基本一致。

本文在国内外已有的极地场景定标方法基础上,使用格陵兰冰雪场景对高分五号 B 星大气气溶胶偏振探测仪(DPC)的在轨 1B 级数据进行辐射精度验证。

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-01-12; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

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

通信作者: *dgluo@aiofm.ac.cn

2 定标模型与方法

2.1 卫星数据与研究区域

高分五号 B 星于 2021 年 9 月 7 日 11 时 1 分在太原卫星发射中心成功发射,其中 DPC 载荷的性能参数与高分五号 A 星 DPC 相近,共有 15 个探测通道,工作波段范围从 433~920 nm 覆盖可见光至近红外,有 8 个光谱波段,如表 1 所示,其中在 490、670、865 nm 波段具有偏振探测能力,每个偏振波段采用 3 个不同检偏角

度(相对安装角为 0°、60°、120°)获取偏振图像,利用 ±50° 的广角观测和转轮滤光片的连续工作方式获取多角度观测图像,而观测角度从 9 个提升到 16 个^[12-13],可以极大地提升多角度反演能力。

采用 2021 年 9 月 19 日 DPC 在轨实测数据,如图 1(a)所示。以 75.37°N,45.17°W 为中心经纬度(对应 DPC 像元的行列号为:494,5698),选择 10×10 个像元进行研究。区域选择如图 1(b)矩形区域所示,该区域洁净无云,大气稳定。

表 1 DPC 各波段参数

Table 1 Band parameters DPC

Band /nm	Polarization	Central wavelength /nm	Bandwidth /nm	Mission
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

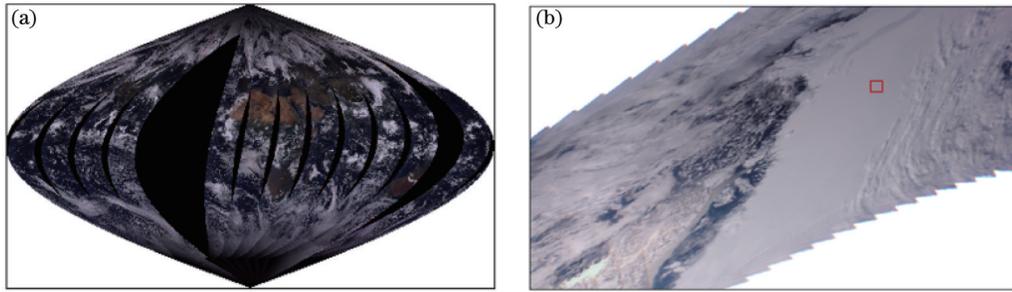


图 1 2021 年 9 月 19 日高分五号 B 星的遥感图像。(a) 全球遥感图像;(b) 格陵兰岛局部遥感图像

Fig. 1 Remote sensing images of Gaofen-5 B star on September 19, 2021. (a) Global remote sensing image; (b) partial remote sensing images of Greenland

2.2 辐射定标模型

DPC 进行观测时,光信号被 CCD 矩阵探测器接收,经电路转换为数字信号值(DN),再经过数据校正得到辐亮度,结合对 POLDER 在轨辐射定标^[14-15]以及对多角度偏振成像仪^[16-18]的研究,DPC 的辐射定标模型可表示为

$$L_{l,p}^k = \frac{X_{s,k}^{l,p} - C_{m,s}^{l,p}}{A_k \cdot t_s \cdot R_k^{l,p} \cdot [1 + \epsilon_k(l,p) \cdot D_k \cos(2 \times \gamma_k)]}, \quad (1)$$

式中: t_s 为探测器所用的积分时间; (l,p) 为像元坐标; A_k 为 k 波段的绝对辐射定标系数; $R_k^{l,p}$ 为相对辐射校正系数; $\epsilon_k(l,p)$ 为镜头起偏度; D_k 为目标的偏振度; γ_k 为目标的偏振方位角; $C_{m,s}^{l,p}$ 为 (l,p) 的暗电流信号; $X_{s,k}^{l,p}$ 为 k 通道像元 (l,p) 的响应。在实验室定标中 A_k 表示 DPC 中心视场响应与绝对光谱辐亮度之间的定量关系,也称为绝对响应度。 A_k 通过传递到美国国家标准技术研究所(NIST)基准的积分球进行测定,并定义各

通道等效辐亮度 L_j 为

$$L_j = \frac{\int_0^\infty f_j(\lambda) L(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty f_j(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中: $f_j(\lambda)$ 为遥感器在第 j 波段的光谱响应函数,如图 2 所示; $L(\lambda)$ 为目标的光谱辐亮度分布; λ 为波长。

在 DPC 一级数据预处理中,对等效辐亮度进行归一化处理,用归一化辐亮度除以太阳天顶角的余弦值得出等效反射率 ρ_j 为

$$\rho_j = \frac{\pi d^2 L_j}{E_j^s \cos \theta_s}, \quad (3)$$

式中: E_j^s 为第 j 波段的等效太阳辐照度; d 为天文单位(AU)下的日地距离常数; θ_s 为太阳天顶角。

2.3 大气辐射传输模型

本研究选取 6SV 大气辐射传输模型进行地气耦

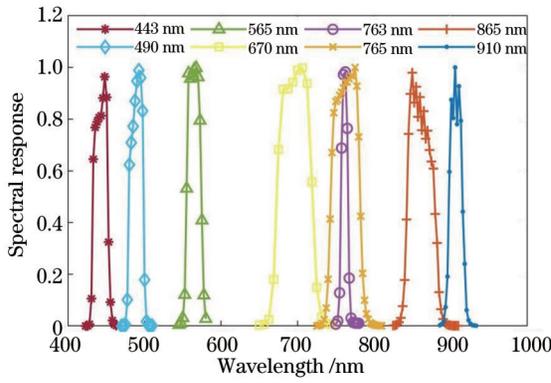


图2 高分五号DPC的光谱响应函数图

Fig. 2 Spectral response function diagram of Gaofen-5 DPC

合并计算遥感器传感器入瞳处反射率,根据 Tanre 等^[19]的研究,耦合地表BRDF的辐射传输模型可表示为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \phi) = & \rho_{\text{R+A}} + \exp(-\tau/\mu_s) \cdot \\ & \rho_i(\mu_s, \mu_v, \phi) \exp(-\tau/\mu_v) + \\ & t_d(\mu_s) \bar{\rho}'_i(\mu_s, \mu_v, \phi) \exp(-\tau/\mu_v) + \\ & t_d(\mu_v) \bar{\rho}'_i(\mu_s, \mu_v, \phi) \exp(-\tau/\mu_s) + \\ & t_d(\mu_v) t_d(\mu_s) \bar{\rho}_i + \frac{T_{\text{R+A}}(\mu_s) T_{\text{R+A}}(\mu_v) S(\bar{\rho}_i)^2}{1 - S \bar{\rho}_i}, \quad (4) \end{aligned}$$

式中: ρ_{TOA} 为大气顶层(TOA)的反射率; θ_s, θ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角; $\phi = \phi_s - \phi_v, \phi_s, \phi_v$ 分别为太阳方位角和观测方位角; μ_s, μ_v 分别为太阳天顶角的余弦值和观测天顶角的余弦值; $\rho_{\text{R+A}}$ 为大气分子和气溶胶的固有反射率; ρ_i 为目标的反射率; $\bar{\rho}'_i$ 为太阳入射光经过漫射后再经目标表面直接反射的反射率; $\bar{\rho}_i$ 为太阳入射光直接反射到目标表面再经大气散射的反射率; $\bar{\rho}_i$ 为目标的半球反射率,即 $\bar{\rho}_i \cong \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu \rho_i(\mu_s, \mu_v, \phi' - \phi) d\mu_v d\phi d\mu_s$; $t_d(\mu_s)$ 为总下行漫射透射率; $t_d(\mu_v)$ 为总上行漫射透射率; S 为大气球面反照率,即当底部的输入辐照度为各向同性时,大气反向散射的归一化辐照度; $T_{\text{R+A}}(\mu_s)$ 为大气分子和气溶胶在太阳和目标表面之间路径上的总透射函数; $T_{\text{R+A}}(\mu_v)$ 为大气分子和气溶胶在目标表面和传感器之间路径上的总透射函数; τ 为气溶胶光学厚度(AOT)。式(4)右边的物理意义是将地表目标对大气顶部信号的贡献分为4项:1) TOA的太阳入射光传递到目标后直接反射到传感器的贡献;2) 经大气散射的太阳入射光传递到目标后直接反射到传感器的贡献;3) TOA的太阳入射光传递到目标后,再经过大气散射到达传感器的贡献;4) 太阳入射光与大气之间至少有两个相互作用,以及与目标具有一种相互作用,其中大气和BRDF之间至少有两种相互作用的贡献可近似用目标的半球反照率表示。

在6S中,使用逐次散射(SOS)算法给出的向下辐射场精确计算前3个贡献,将4项贡献结合起来即可得到TOA的反射率^[20-23]。

2.4 冰雪场景的BRDF模型

卫星利用反射太阳光对雪表面上空的大气和雪表面本身进行遥感,需要了解反射辐射亮度随角度分布的特性,该特性可用BRDF表示。在极地冰川地区,极地雪地的双向反射率不同于平坦的雪地,在不同的太阳天顶角下有着很大的差异,在太阳天顶角较大和前散射方向时,雪的双向反射率变化明显。

Warren等^[7]对雪的BRDF进行了全面研究,并得出了雪的各向异性反射率函数。用 ρ 表示BRDF,即反射到特定方向的辐射亮度 $[W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)]$ 与入射通量的比值,各向异性反射函数 R 和 ρ 之间的关系为

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi}{A} \rho(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (5)$$

式中: θ_s 为太阳天顶角; θ_v, φ 分别为观测天顶角和相对观测方位角; A 为反照率。

各向异性反射率函数 R 为

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi L(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta_s, \theta_v, \varphi) \cos \theta_v \sin \theta_v d\theta_v d\varphi}, \quad (6)$$

式中: L 为测量的辐射亮度。 R 函数可用 φ 的三项傅里叶级数进行表示:

$$\begin{aligned} R(\theta_s, \theta_v, \varphi) = & k_1 + k_2 \cos(\pi - \varphi) + k_3 \cos[2(\pi - \varphi)], \quad (7) \\ k_1 = & a_0 + a_1(1 - \cos \theta_v), \\ k_2 = & a_2(1 - \cos \theta_v), \\ k_3 = & a_3(1 - \cos \theta_v), \quad (8) \end{aligned}$$

式中:系数 k_1, k_2, k_3 为太阳天顶角余弦 $\cos \theta_s$ 和观测天顶角余弦 $\cos \theta_v$ 的函数,其中 $a_i = b_{0i} + b_{1i} \cos \theta_s + b_{2i} \cos^2 \theta_s (i = 0, 1, 2, 3)$,系数 $b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} (i = 0, 1, 2, 3)$ 由与测量值最小二乘的最佳拟合值确定。根据Warren等在南极站3年的测量结果,系数 b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} 计算结果如表2所示。

表2 a_i 函数中系数 b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} 的计算结果

Table 2 Result of the calculation of the coefficients b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} in the function a_i

i	b_{0i}	b_{1i}	b_{2i}
0	0.9216	-0.3785	1.0016
1	0.1994	0.7084	-1.8176
2	0.1234	2.0702	-4.9036
3	0.0751	0.8440	-2.2769

本研究使用Warren模型描述极地冰雪场景,使用大气辐射传输6SV模型计算TOA反射率。

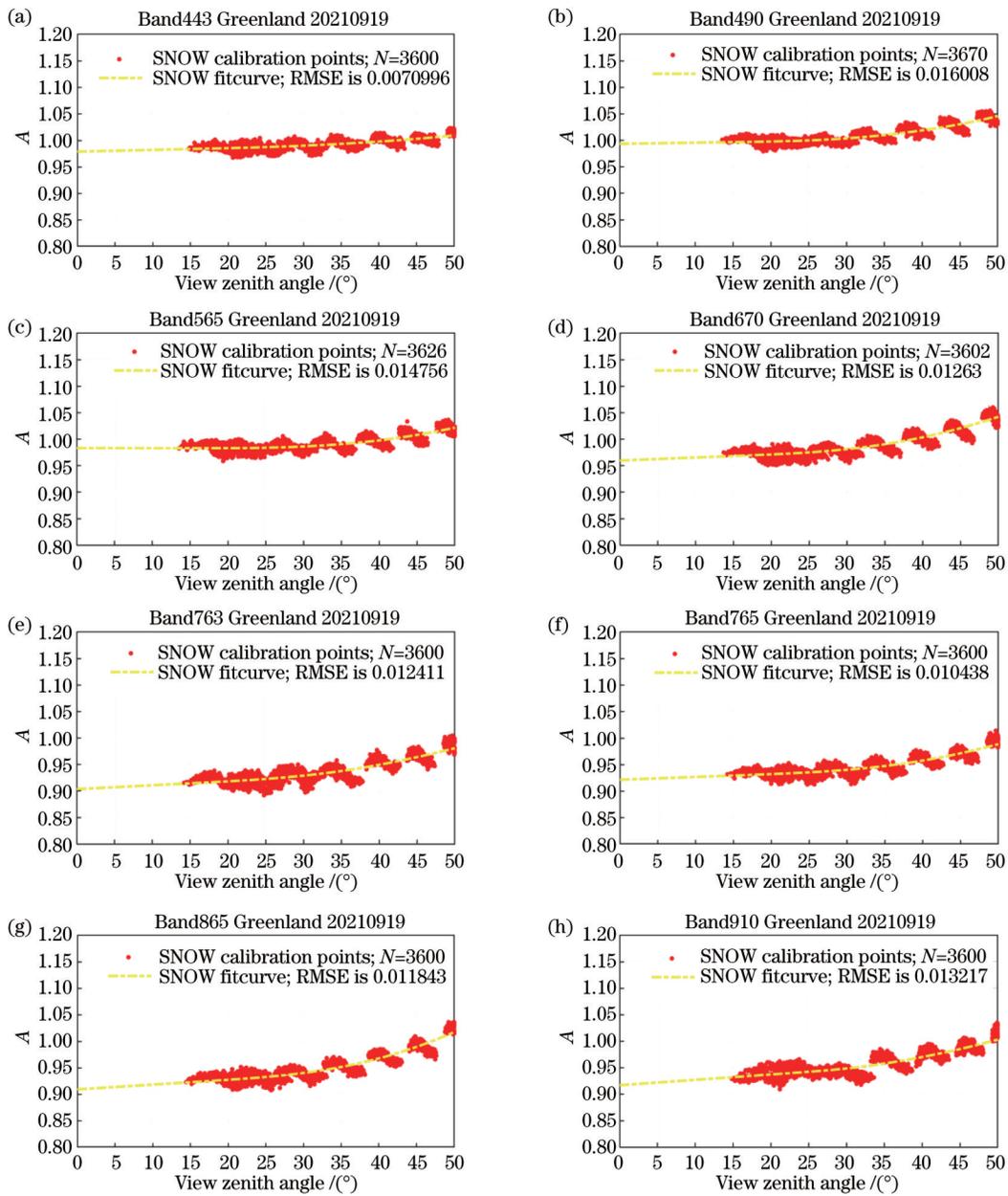


图 4 各波段 DPC 测量 TOA 反射率与定标 TOA 反射率对比图。(a) 443 nm 波段;(b) 490 nm 波段;(c) 565 nm 波段;(d) 670 nm 波段;(e) 763 nm 波段;(f) 765 nm 波段;(g) 865 nm 波段;(h) 910 nm 波段

Fig. 4 Comparison charts of TOA reflectance measured from DPC and calibrated TOA reflectance in each band. (a) Band 443 nm; (b) band 490 nm; (c) band 565 nm; (d) band 670 nm; (e) band 763 nm; (f) band 765 nm; (g) band 865 nm; (h) band 910 nm

表 3 各波段 DPC 测量 TOA 反射率与定标 TOA 反射率的误差统计分析

Table 3 Error statistical analysis of TOA reflectance measured from DPC and calibrated TOA reflectance

Band /nm	Intercept	Mean	Standard deviation /%	RMSE /%
443	0.9789	0.9941	1.02	0.71
490	0.9933	1.0130	1.68	1.60
565	0.9832	0.9942	1.49	1.48
670	0.9597	0.9943	2.47	1.26
763	0.9035	0.9406	2.34	1.24
765	0.9215	0.9506	2.00	1.04
865	0.9094	0.9563	2.85	1.18
910	0.9170	0.9605	2.31	1.32

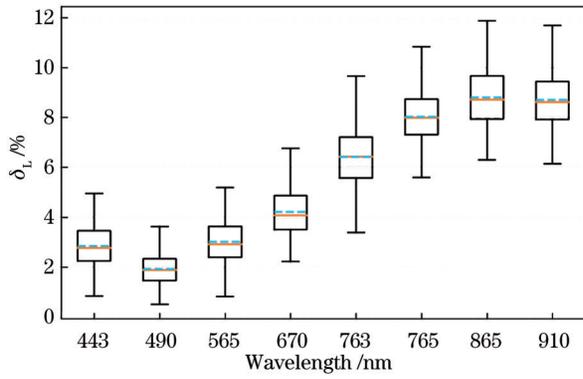


图 5 各波段从 DPC 测量的 TOA 辐亮度与定标 TOA 辐亮度的相对误差图

Fig. 5 Relative error diagram of TOA radiance measured from DPC and calibrated TOA radiance in each band

表 4 各波段从 DPC 测量的 TOA 辐亮度定标 TOA 辐亮度的相对误差统计分析

Table 4 Statistical analysis of relative error of TOA radiance calibration TOA radiance measured from DPC in each band

Band /nm	443	490	565	670	763	765	865	910
Average relative error /%	2.85	1.92	3.02	4.22	6.41	8.03	8.8	8.71
STD of relative error /%	0.79	0.59	0.82	0.95	1.21	0.95	1.13	1.06

3.2 误差分析评价

3.2.1 大气的影响

1) AOT 的影响分析

格陵兰岛在可见光波段的定标结果较为稳定,因此本研究在 DPC 的可见光波段对大气和地表所造成的定标结果的影响进行分析,AOT 的数据使用中分辨率光谱成像仪 MODIS Terra 的月平均数据产品,定标时选用 AOT 为 0.07,经过数据筛选,AOT550 的误差小于 0.01,选择 AOT 为 0.08 作为偏差值输入 6SV 辐射传输模型中得出 TOA 反射率,再与定标时计算的 TOA 反射率进行对比,通过二者的相对误差来确定 AOT 所造成的影响,相对误差 δ_{AOT} 可表示为

$$\delta_{AOT} = \frac{|\rho_{AOT=0.08}^{TOA} - \rho_{AOT=0.07}^{TOA}|}{\rho_{AOT=0.07}^{TOA}} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: $\rho_{AOT=0.08}^{TOA}$ 、 $\rho_{AOT=0.07}^{TOA}$ 为当 AOT 分别为 0.08、0.07 时 TOA 反射率。可见光波段的结果如图 6 所示。

由图 6 可知,当观测天顶角低于 35° 时,在可见光波段的 AOT 偏差所造成的 TOA 反射率的相对误差有所增加,但幅度较小,在 443nm 波段上相对误差最稳定为 0.52%,在 490、565、670 nm 波段上相对误差最大分别为 0.58%、0.63%、0.61%;观测天顶角大于 35° 时,在 443、490、565 nm 波段的 TOA 反射率的相对误差大幅降低,而在 670 nm 波段上 TOA 反射率的相对误差增加。

2) 水汽以及臭氧含量的影响分析

大气主要由水汽、臭氧等组成,水汽、臭氧等吸收气体的变化可能会给定标结果带来一定的误差,从欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 2021 年 9 月 19 日

小,平均值为 1.92%;865 nm 波段的相对误差最大,平均值为 8.8%。可见光波段的相对误差分布较集中,近红外光波段的相对误差分布较离散,且可见光波段的相对误差均值要比近红外光波段的相对误差均值更小,其值都在 5% 以内,说明可见光波段的数据较稳定;2) 490 nm 波段相对误差的标准差最小(0.59%),865 nm 波段相对误差的标准差最大(1.13%)。可见光波段的相对误差标准差都在 1% 以内,表明了可见光波段的不确定度较低。Wu 等^[5]通过对 Terra 和 Aqua MODIS 的可见光和近红外光波段的测量反射率与定标反射率的比值进行分析,发现近红外光波段的各向异性比可见光波段强,这可能导致近红外光波段 BRDF 的误差比可见光波段大,这与本研究中发现的变化一致。

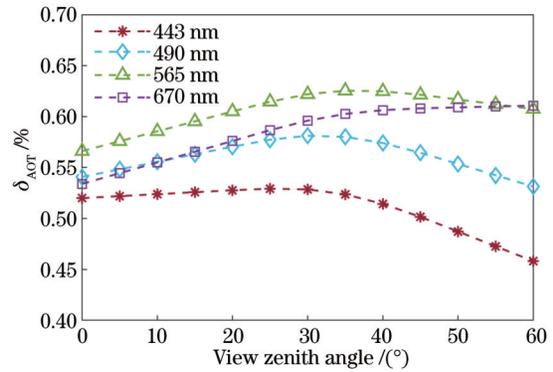


图 6 在可见光波段 AOT 对 TOA 反射率的影响

Fig. 6 Effects of AOT changes on TOA reflectivity in visible light band

气象数据中选取研究区域的臭氧含量(水汽含量)的偏差值,臭氧含量变化造成 TOA 反射率之间的相对误差 δ_{O_3} 、水汽含量造成 TOA 反射率之间的相对误差 δ_{H_2O} 分别为

$$\delta_{O_3} = \frac{|\rho_{f_{O_3}=0.27}^{TOA} - \rho_{f_{O_3}=0.293}^{TOA}|}{\rho_{f_{O_3}=0.293}^{TOA}} \times 100\%, \quad (11)$$

$$\delta_{H_2O} = \frac{|\rho_{f_{H_2O}=0.09}^{TOA} - \rho_{f_{H_2O}=0.067}^{TOA}|}{\rho_{f_{H_2O}=0.067}^{TOA}} \times 100\%, \quad (12)$$

式中: $\rho_{f_{O_3}=0.27}^{TOA}$ 、 $\rho_{f_{O_3}=0.293}^{TOA}$ 为在标准大气压 101 kPa 下臭氧的厚度分别为 0.27、0.293 cm 时 TOA 反射率; $\rho_{f_{H_2O}=0.09}^{TOA}$ 、 $\rho_{f_{H_2O}=0.067}^{TOA}$ 为当水汽含量分别为 0.09、0.067 kg/m⁻³ 时 TOA 反射率。臭氧含量变化对 δ_{O_3} 的影响如图 7 所示,水汽含量变化对 δ_{H_2O} 的影响如图 8 所示。

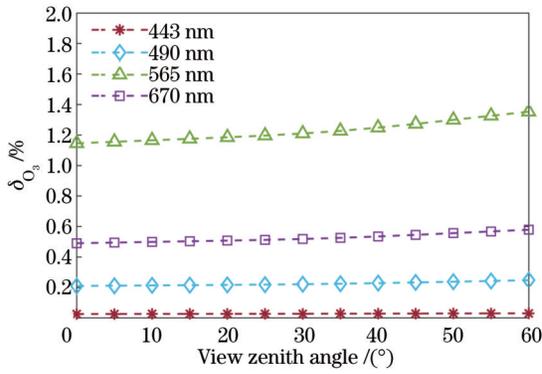


图 7 在可见光波段臭氧含量变化对 TOA 反射率的影响
Fig. 7 Effects of ozone content changes on TOA reflectivity in visible light band

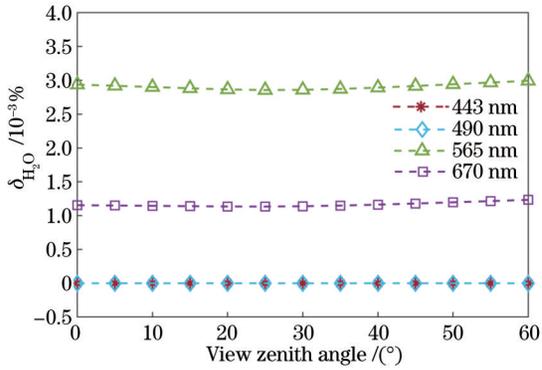


图 8 在可见光波段水汽含量变化对 TOA 反射率的影响
Fig. 8 Effects of water vapor content changes on TOA reflectivity in visible light band

由图 7 可知,在可见光波段,当观测天顶角大于 40°时,臭氧含量偏差所造成的 TOA 反射率相对误差有所增大,在 443 nm 波段,臭氧含量偏差所造成的 TOA 反射率相对误差最小,为 0.03%,在 490、565、

670 nm 波段上臭氧含量偏差所造成的 TOA 反射率最大相对误差分别为 0.25%、1.35%、0.58%。

由图 8 可知,在 443、490 nm 波段,水汽含量偏差所造成的 TOA 反射率相对误差几乎为 0;在 565 nm 波段,水汽含量偏差所造成的 TOA 反射率相对误差最大,为 $3 \times 10^{-3}\%$ 。可见水汽含量对 DPC 可见光波段的影响非常小。

3.2.2 地表的影响

在建立 Dome C BRDF 模型时,Warren^[7]研究了在 600 nm 波段处由式(7)、式(8)参数所确定的 BRDF 模型的百分比误差,结果表明在几乎所有角度上参数化都与测量值相匹配,优于 5%,而且当观测方位角在 30°~135°时可保持在 2% 以内。本研究的观测方位角在 33°~107°之间,因此选择地表 BRDF 的不确定度为 2%。结合前面对大气因素的分析,对各个因素的相对误差进行均值处理,再计算相对误差的标准偏差,通过式(13)可得各个因素的不确定度 $u(\delta_k)$ 为

$$u(\delta_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_k - \bar{\delta}_k)^2}{n(n-1)}}, \quad (13)$$

式中: n 为数据组数; δ_k 为不同因素下的相对误差,下标 k 为不同大气影响因素(AOT、臭氧含量以及水汽含量), $u(\delta_{BRDF})$ 、 $u(\delta_{AOT})$ 、 $u(\delta_{O_3})$ 、 $u(\delta_{H_2O})$ 分别为冰雪 BRDF 模型的不确定度、AOT 不确定度、臭氧含量的不确定度、水汽含量的不确定度。对以上可见光波段各个因素的不确定度进行合成,假设各因素均不相关,则相对误差合成标准不确定度 $u(\delta_{total})$ 为

$$u(\delta_{total}) = \sqrt{u(\delta_{BRDF})^2 + u(\delta_{AOT})^2 + u(\delta_{O_3})^2 + u(\delta_{H_2O})^2}, \quad (14)$$

表 5 为可见光波段中计算影响 TOA 反射率的各项因素的不确定度,每个波段的合成不确定度都为 2%。

表 5 各可见光波段的各项因素不确定度以及合成不确定度

Table 5 Factor uncertainties and synthetic uncertainties for each visible band

Band /nm	$u(\delta_{BRDF})/\%$	$u(\delta_{AOT})/\%$	$u(\delta_{O_3})/\%$	$u(\delta_{H_2O})/\%$	$u(\delta_{total})/\%$
443	2.0	0.01	0	0	2.0
490	2.0	0	0	0	2.0
565	2.0	0.01	0.02	0	2.0
670	2.0	0.01	0.01	0	2.0

雪粒大小通常随着雪的融化而减小,而雪粒大小的变化会导致反照率和 BRDF 各向异性不同^[7]。假设雪粒为球体,Stephenson 等^[24]研究表明新雪的平均颗粒半径在 20~100 μm 之间,将雪分为细模雪、中模雪、粗模雪 3 种模型,其平均半径分别为 50、200、1000 μm ,每个模型的反照率由 Warren 等^[7]的研究得出。在观测天顶角 30° 以内,对 3 种不同模型的雪粒分别进行 DPC 各波段的测量 TOA 反射率与定标 TOA 反射率的误差分析,其相对误差 δ_{snow} 可表示为

$$\delta_{snow} = \frac{|\rho_{measure} - \rho_{calibration}|}{\rho_{measure}} \times 100\%, \quad (15)$$

式中: $\rho_{measure}$ 、 $\rho_{calibration}$ 分别为 DPC 测量 TOA 反射率和定标后的 TOA 反射率。该相对误差结果如图 9、表 6 所示,图 9 中箱体代表数据的 f_{iQR} ,箱体外的竖线代表 1.5 倍的 f_{iQR} 区间,横线代表数据的上下限,实线为中位值,虚线为平均值。

由图 9、表 6 可知:1) 对粗模雪而言,在 490 nm 波段的相对误差均值较小(1.69%),763 nm 波段相对误

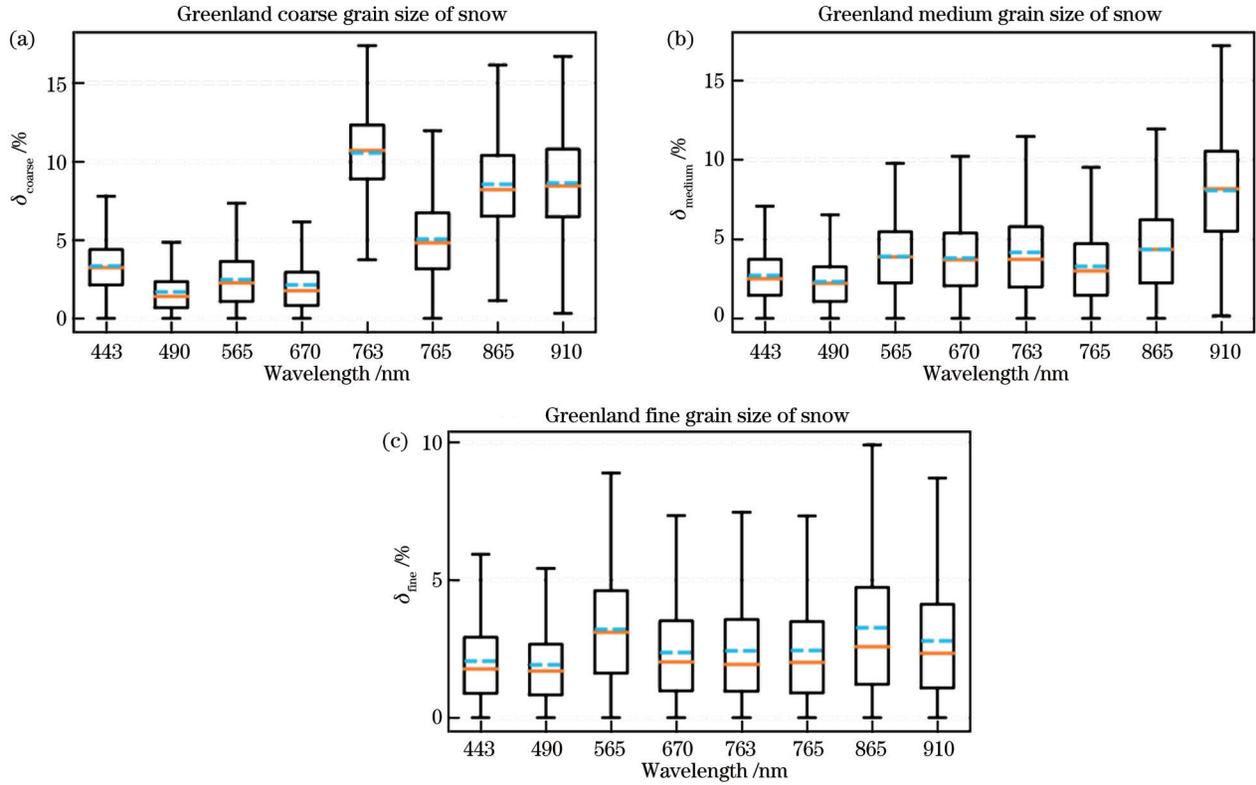


图 9 在 3 种不同冰雪模型下各波段从 DPC 测量的 TOA 辐亮度与定标 TOA 辐亮度的相对误差图。(a)粗模;(b)中模;(c)细模
Fig. 9 Relative error plot of TOA radiance measured from DPC and calibrated TOA radiance in each band under three different ice and snow models. (a) Coarse snow; (b) medium snow; (c) fine snow

表 6 3 种模型下的各波段从 DPC 测量的 TOA 反射率与定标 TOA 反射率误差统计分析

Table 6 Statistical analysis of the TOA reflectance measured by DPC and the calibration TOA reflectance error in each band under the three models

Band /nm	Coarse snow		Medium snow		Fine snow	
	Average relative error /%	STD of relative error /%	Average relative error /%	STD of relative error /%	Average relative error /%	STD of relative error /%
443	3.34	1.78	2.72	1.7	2.06	1.53
490	1.69	1.32	2.33	1.51	1.91	1.38
565	2.48	1.68	3.9	2.11	3.2	1.94
670	2.13	1.71	3.79	2.21	2.37	1.71
763	10.55	2.77	4.16	2.78	2.43	1.93
765	5.04	2.71	3.28	2.21	2.45	1.97
865	8.55	2.95	4.34	2.64	3.27	2.58
910	8.61	3.13	8.05	3.56	2.79	2.08

差均值较大(10.55%),可见光波段相对误差标准差比近红外光波段相对误差标准差小,因此粗模雪在可见光波段的数据更稳定;2) 对中模雪而言,490 nm 波段的相对误差均值较小(2.33%),910 nm 波段相对误差均值较大(8.05%),443 nm 和 490 nm 波段相对误差标准差都在 2% 以内,且 443 nm 和 490 nm 波段的数据都比其他波段的数据波动性小、较为稳定;3) 对细模雪而言,490 nm 波段的相对误差均值较小(1.91%),865 nm 波段相对误差均值较大(3.27%),除了 865 nm 和 910 nm 波段的相对误差标准差都在 2% 以内,但

670、763、765、865、910 nm 波段的数据分布不对称,大部分数据分布在中位数带上四分位数之上。从整体上看,细模雪在各波段的相对误差均值都在 4% 以内,443~765 nm 波段相对误差标准差都在 2% 以内,说明细模雪在各波段数据较稳定且不确定度也较低。

3.3 场景验证

3.3.1 沙漠场景验证

由于沙漠定标场气候干燥少雨,地势开阔,稳定性和均匀性较高,可以满足大部分卫星遥感器的在轨辐射定标^[25-26]。选取北撒哈拉沙漠定标场,其中心经纬

度为 24.90°N, 12.80°E, 选取 10×10 的区域, 地表数据选择 MODIS 数据, 大气和天气数据选择欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 在 2019 年 9 月 19 日的公开数据, 经过数据筛选后, 采用 MODIS 地表 BRDF 模型定标方法^[27-28]进行定标, 则沙漠定标系数 A_{desert} 为 DPC 测量值与沙漠定标值的比值, 将观测天顶角设置在 30° 以内, 将沙漠定标系数与冰雪定标系数进行比较, 结果如图 10、表 7 所示, 每个波段的左边箱体图为格陵兰岛冰雪场景的定标结果, 右边箱体图为沙漠场景的定标结果, 箱体中虚线为平均值, 实线为中位值。

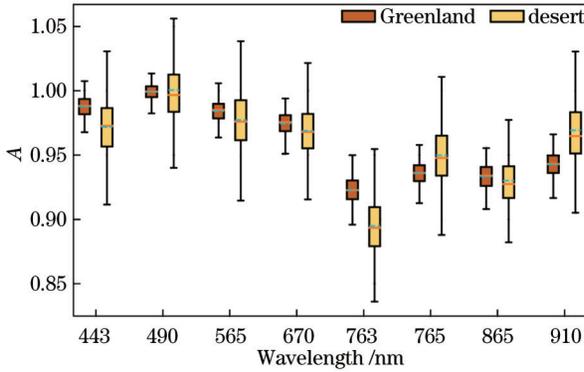


图 10 格陵兰岛冰雪场景的定标结果与沙漠场景定标结果对比图

Fig. 10 Comparison of the calibration results of the Greenland ice scene with those of the desert scene

表 7 格陵兰岛冰雪场景的定标结果与沙漠场景定标结果统计分析

Table 7 Statistical analysis of the calibration results of the Greenland ice and snow scene and the calibration results of the desert scene

Band / nm	Mean		Standard deviation / %	Standard deviation / %	
	Greenland	Desert		Greenland	Desert
443	0.9875	0.9715	1.6	0.77	2.49
490	0.9989	1.0003	-0.14	0.57	2.91
565	0.9839	0.9701	1.38	0.78	2.72
670	0.9743	0.9688	0.55	0.89	2.34
763	0.9227	0.8947	2.80	1.06	2.42
765	0.9357	0.9498	1.25	0.83	2.32
865	0.9332	0.9299	0.33	0.98	2.16
910	0.9425	0.9690	-2.66	0.93	2.61

经过沙漠场景的验证结果, 由图 10、表 7 可知, 二者吻合度较高, 平均值偏离在 3% 以内, 且格陵兰极地场景标准差在 2% 以内。说明格陵兰极地场景定标结果比沙漠场景定标结果更稳定且离散度更小。

3.3.2 海洋场景验证

在洁净天气条件下选择远离大陆的纯净海水, 纯净海水区域的辐亮度信号主要是由大气对太阳入射辐

亮度散射引起的, 大气散射信号主要由大气分子瑞利散射的贡献组成, 瑞利散射信号在遥感器可见光波段中的蓝绿波段提供足够的辐射能量, 因此使用于传感器蓝绿波段的辐射定标精度验证^[29-33]。选择南大西洋定标场区域, 以 24.32°W, 15.84°S 为中心选择 10×10 区域, 采用大气瑞利散射定标方法, 剔除云像元干扰, 得到 2019 年 9 月 19 日的 443 nm 和 490 nm 的定标系数 A_{ocean} , 再与极地定标系数进行对比, 结果如图 11、表 8 所示, 每个波段的左边箱体图为格陵兰岛冰雪场景的定标结果, 右边箱体图为海洋瑞利场景的定标结果, 箱体中虚线为平均值, 实线为中位值。

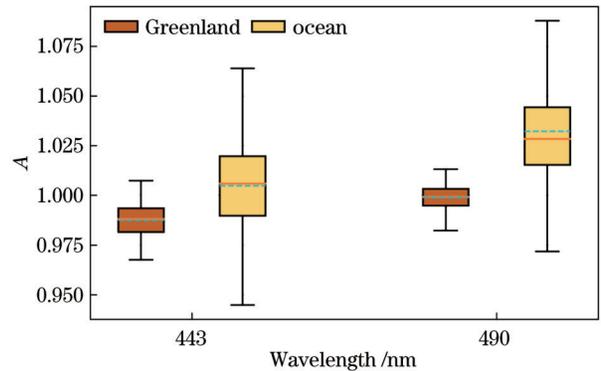


图 11 格陵兰岛冰雪场景的定标结果与海洋场景定标结果对比图

Fig. 11 Comparison of the calibration results of the Greenland ice scene with those of the ocean scene

表 8 格陵兰岛冰雪场景的定标结果与海洋场景定标结果统计分析

Table 8 Statistical analysis of the calibration results of the Greenland ice and snow scene and the calibration results of the ocean scene

Band / nm	Mean		Standard deviation / %	Standard deviation / %	
	Greenland	Ocean		Greenland	Ocean
443	0.9875	1.0048	-1.73	0.77	1.52
490	0.9989	1.0322	-3.33	0.57	2.18

由图 11、表 8 可知, 格陵兰岛冰雪场景的定标系数和海洋场景的定标系数平均值偏离在 5% 以内, 格陵兰极地场景标准差在 1% 以内, 而海洋场景标准差在 3% 以内。通过分析上文格陵兰岛冰雪场景的定标结果与沙漠场景和海洋场景的定标结果的对比, 证明了格陵兰岛冰雪场景的定标结果稳定性以及该定标方法的有效性和可靠性。

4 结 论

根据在轨替代定标的思路, 提出一种基于南北极冰川场景的在轨辐射定标方法, 选用格陵兰岛进行研究分析, 对大视场遥感器 DPC 进行辐射定标。将 DPC 的测量结果与定标结果进行对比。结果表明: 在 DPC

可见光波段的测量值与定标值一致性较好,测量值与定标值的比值的标准差在 3% 以内, RMSE 均低于 2%, 表明 DPC 在冰雪场景上在轨定标的性能良好。

对该定标方法进行大气和地表影响的误差分析, 结果表明: 在可见光波段, 最大的不确定度因素则为地表 BRDF 的影响, 不确定度为 2%, 最后对可见光波段各个因素进行合成, 合成不确定度都为 2%。除此之外, 本研究还对冰雪尺寸大小进行研究, 结果表明: 细模雪在各波段的相对误差均值都在 4% 以内, 443nm 至 765nm 波段相对误差标准差都在 2% 以内, 因此细模雪在各波段数据较稳定。将本文定标方法所得的冰雪场景定标结果与沙漠场景定标结果、海洋场景定标结果相比较, 平均偏离均在 5% 以内, 表明该定标方法有效可靠。本研究旨在提高基于冰雪场景的遥感量化数据产品的精度, 为之后的参数反演提供更高质量的数据, 并可用于长时间持续监测。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Qi G L, Rong Z G, et al. The model and method of radiometric calibration for satellite infrared remote sensor[M]. Beijing: Science Press, 2015: 21-22.
- [2] 陈斐楠, 樊依哲, 洪津, 等. 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[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2328001.
Chen F N, Fan Y Z, Hong J, et al. In-flight radiation calibration of a directional polarimetric camera at visible bands onboard GF-5[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2328001.
- [3] 王玲, 胡秀清, 郑照军, 等. 联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0212003.
Wang L, Hu X Q, Zheng Z J, et al. Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212003.
- [4] Xiong X X, Wu A S, Wenny B N. Using Dome C for moderate resolution imaging spectroradiometer calibration stability and consistency[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 033520.
- [5] Wu A S, Xiong X X, Cao C Y. Using BRDF derived from MODIS observations over Dome C to characterize calibration stability and consistency of POS sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7456: 745605.
- [6] Cao C Y, Ma L L, Uprey S, et al. Spectral characterization of the Dunhuang calibration/validation site using hyperspectral measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7862: 78620J.
- [7] Warren S G, Brandt R E, Hinton P O. Effect of surface roughness on bidirectional reflectance of Antarctic snow[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1998, 103(E11): 25789-25807.
- [8] Doherty S J, Warren S G. The Antarctic and Greenland snow surfaces as calibration targets for the visible channel of the Advanced Very High Resolution Radiometer[C]//IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. (Cat. No. 98CH36174), July 6-10, 1998, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 2267-2269.
- [9] Hudson S R, Warren S G, Brandt R E, et al. Spectral bidirectional reflectance of Antarctic snow: measurements and parameterization[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D18): D18106.
- [10] Jaross G, Warner J. Use of Antarctica for validating reflected solar radiation measured by satellite sensors[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D16): D16S34.
- [11] Viallefont-Robinet F. An attempt to perform inter-band calibration validation for Sentinel-2 using snowy sites such as Dome C in Antarctica[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11151: 111511S.
- [12] 向光峰, 黄禅, 孟炳寰, 等. 多角度偏振成像仪在轨图像配准及性能评估[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0812001.
Xiang G F, Huang C, Meng B H, et al. In-flight image registration and performance evaluation for directional polarimetric camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 0812001.
- [13] 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.
Yang W F, Hong J, Qiao Y L. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822005.
- [14] 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.
- [15] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2553: 218-231.
- [16] 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 航空偏振相机的光学偏振特性实验研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(11): 1629-1632.
Chen L G, Meng F G, Yuan Y L, et al. Experimental study for the polarization characteristics of airborne polarization camera[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(11): 1629-1632.
- [17] 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 偏振相机的光学定标方案研究[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(3): 227-231.
Chen L G, Meng F G, Yuan Y L, et al. Project of calibration method for polarization camera[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(3): 227-231.
- [18] Gordon H R, Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 1994, 33(3): 443-452.
- [19] Tanre D, Herman M, Deschamps P Y. Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance[J]. Applied Optics, 1981, 20(20): 3676-3684.
- [20] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 675-686.
- [21] Tanre D, Herman M, Deschamps P Y. Influence of the atmosphere on space measurements of directional properties[J]. Applied Optics, 1983, 22(5): 733-741.
- [22] Kotchenova S Y, Vermote E F, Matarrese R, et al. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data Part I: Path radiance[J]. Applied Optics, 2006, 45(26): 6762-6774.
- [23] Kotchenova S Y, Vermote E F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data Part II Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces[J]. Applied Optics, 2007, 46(20): 4455-4464.
- [24] Stephenson P J. Some considerations of snow metamorphism in the Antarctic ice sheet in the light of ice crystal studies[J]. Physics of Snow and Ice: Proceedings, 1967, 1(2): 725-740.
- [25] 苏静明, 司福祺, 赵敏杰, 等. 大气痕量气体差分吸收光谱仪在轨辐射定标评估[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0601001.
Su J M, Si F Q, Zhao M J, et al. On orbit radiometric calibration evaluation of environmental trace gases monitoring instrument[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0601001.
- [26] 杨敏, 刘照言, 赵永光, 等. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1828001.
Yang M, Liu Z Y, Zhao Y G, et al. On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou site[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1828001.

- [27] 豆新格, 潘军, 高海亮, 等. 敦煌辐射校正场双向反射分布函数模型构建及应用分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1628005.
Dou X G, Pan J, Gao H L, et al. Construction and application analysis of bidirectional reflectance distribution function model of Dunhuang radiation correction site[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1628005.
- [28] 孙晗, 潘军, 高海亮, 等. 敦煌场地像元尺度地表反射率采样方法及准确度研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 1028009.
Sun H, Pan J, Gao H L, et al. Sampling method and accuracy of pixel-scale surface reflectance at Dunhuang site[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(10): 1028009.
- [29] Zhu S F, Li Z Q, Qie L L, et al. In-flight relative radiometric calibration of a wide field of view directional polarimetric camera based on the Rayleigh scattering over ocean[J]. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1211.
- [30] Chen F N, Luo D G, Li S, et al. The operational inflight radiometric uniform calibration of a directional polarimetric camera[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 3823.
- [31] Qie L L, Li Z Q, Zhu S F, et al. In-flight radiometric and polarimetric calibration of the directional polarimetric camera onboard the GaoFen-5 satellite over the ocean[J]. Applied Optics, 2021, 60(24): 7186-7199.
- [32] 齐琳琳, 王晓丹, 吉微. 中远红外光谱区间的海区上空大气透过率特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0101002.
Qi L L, Wang X D, Ji W. Analysis on atmospheric transmittance characteristics of middle-far infrared spectrum in ocean area[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0101002.
- [33] Wei Y, Han P L, Liu F, et al. Polarization descattering imaging: a solution for nonuniform polarization characteristics of a target surface[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(11): 111101.

Research on On-Orbit Radiometric Calibration Method for Remote Sensors with Large Fields of View Based on Snow and Ice Scenes

Pan Yuwei^{1,2}, Chen Feinan¹, Luo Donggen^{1*}, Sun Liang¹, Wang Yi¹, Ji Feng²,
Chen Jingjing², Hong Jin¹

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

²School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract

Objective Radiation calibration is a necessary prerequisite for the quantification of remote sensing data from laboratory calibration before launch to on-orbit calibration after launch throughout the entire life cycle of remote sensors. Site calibration is a common method for on-orbit alternative calibration of remote sensors with large fields of view. When a remote sensor is operating normally, it is calibrated with a large area of uniform ground objects as the calibration source, which has the advantages of a high calibration frequency and no need for synchronous measurement. The Greenland ice sheet (-75°S , 123°E) and the Antarctic ice sheet (73.375°N , -40°W) are commonly used as targets for snow and ice scenes, whose surfaces are covered with evenly distributed snow. Due to their high altitudes (usually greater than 2 km), they are less affected by the atmosphere and help obtain calibration samples with better data quality. Furthermore, ice and snow have a relatively flat spectrum in the visible range, which makes band transfer easier with other calibration methods. Thus, using the Greenland ice sheet and the Antarctic ice sheet as the calibration source of snow and ice scenes has many advantages for the calibration and verification of remote sensors.

Methods The research method in this paper is based on the previous study of polar scene calibration methods. First, we choose Greenland as the calibration target of snow and ice scenes and select the calibration sample in the directional polarimetric camera (DPC) level 1 data. The area interfered with by cloud pixels is then eliminated after spectral channel traversal and angle traversal through the calibration sample's rows and columns. After substituting the surface bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and atmospheric parameters (aerosol, water vapor, ozone, and other profiles) of the snow and ice scene into the radiative transfer model to obtain the zenith reflectivity and radiance, we test the on-orbit radiation response changes of the payload of the DPC on Gaofen-5 satellite. In addition, the obtained conclusions are in good agreement with the calibration results of the desert and ocean scenes, and the dispersion of the calibration results is smaller.

Results and Discussions We compare the measured results of the DPC with the calibration results and obtain the following findings.

- 1) When the view zenith angle is less than 50° , the measured reflectance values of each band of the DPC have good

consistency with the calibrated reflectance values. The standard deviations of their ratios are within 3%, and the root-mean-square errors were both lower than 2% (Fig. 4 and Table 3).

2) When the view zenith angle is less than 30° , the measured top-of-atmosphere (TOA) radiance values in each band of the DPC are compared with the calibrated TOA radiance values. The results show that the DPC data in the visible light band are relatively stable and have low uncertainty (Fig. 5 and Table 4).

3) The influence of the atmosphere (aerosol, water vapor, and ozone) and the surface BRDF on TOA reflectivity is analyzed. The uncertainty of the BRDF model of the snow and ice scene is 2%. Finally, we synthesize the uncertainty of each factor, and the synthetic uncertainty of each band is 2% (Table 5).

4) The research on the size of ice and snow shows that the average relative error of fine snow in each band is within 4%, and the relative error standard deviation of bands from 443 nm to 765 nm is within 2%, so the data of fine snow in each band is relatively stable (Fig. 9 and Table 6).

5) The results obtained in this paper are compared with the calibration results of the desert scene and the ocean scene. The comparison results show that the calibration coefficient of the Greenland snow and ice scene deviates from the average value of the calibration coefficients of the ocean scene and the desert scene within 5%, and the standard deviation of the Greenland polar scene is within 2% (Table 7 and Table 8).

Conclusions Inspired by the idea of on-orbit alternative calibration, we propose an on-orbit radiometric calibration method based on the glacier scenes in the North and South Poles. We choose Greenland for research and analysis and conduct radiometric calibration of the remote sensor DPC with a large field of view. The measurement results of the DPC are compared with the calibration results. The comparison results show that the measured value and the calibrated value in each band of DPC are in good agreement. The standard deviation of the ratio of the measured value to the calibrated value is within 3%, and the root-mean-square error is lower than 2%, which proves that DPC has a good performance in snow and ice scenes. Moreover, through the error analysis of the atmosphere and the surface, it is shown that the BRDF on the surface has the greatest influence, and the final synthetic uncertainty in the visible light band is 2%. Finally, the comparison of the calibration results of this paper with the calibration results of the desert scene and the ocean scene also proves the stability of the calibration results of the Greenland snow and ice scene and the validity and reliability of the calibration method. The method described in this paper can provide long-term monitoring and calibration of the detection data while the payload is on orbit and contribute to the quality improvement of products for operational application.

Key words on-orbit radiation calibration; snow and ice scenes; radiative transfer; surface bidirectional reflectance distribution function model