

联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测

王玲^{1,2}, 胡秀清^{1,2*}, 郑照军^{1,2}, 陈林^{1,2}

¹中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

²中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要 位于南北极的 Dome C 和 Greenland 冰雪目标是国际上应用比较广泛的定标跟踪目标。但由于极昼极夜现象的存在, 单一极地冰雪目标难以对遥感仪器连续定标跟踪。针对这一不足, 提出联合使用两个极地冰雪目标对风云-3A 卫星(FY-3A)/中分辨率光谱成像仪(MERSI)太阳反射率波段辐射性能进行连续跟踪监测的方法。首先, 利用 FY-3A/MERSI 寿命晚期相对稳定的观测数据, 建立两个冰雪目标表观反射率的双向分布函数模型; 然后利用该模型, 对冰雪目标的表观反射率序列进行归一化, 消除由冰雪目标非朗伯性引起的变化信息, 获得反映遥感器辐射性能变化的参量, 实现不同冰雪目标数据序列的融合; 最后, 采用二次多项式拟合模型, 对融合后的数据进行变化趋势分析, 并与其他相关研究成果进行比对验证。结果发现, 跟踪监测模型的不确定性基本优于 3%, 特别是在波长小于 550 nm 的短波段, 不确定性优于 2%。衰减率结果显示, 蓝光波段衰减显著, 特别是波段 8(413 nm), 年均衰减率接近 7%; 红光和近红外波段(水汽通道除外)最为稳定, 年均衰减率在 ±0.5% 以内。验证结果显示, 所提方法与其他方法具有很好的一致性, 大部分波段的多年总衰减率偏差低于 3%。

关键词 测量; 定标跟踪; 稳定目标; 中分辨率光谱成像仪

中图分类号 TP731

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0212003

Radiometric Calibration Tracking Detection for FY-3A/MERSI by Joint Use of Snow Targets in South and North Poles

Wang Ling^{1,2}, Hu Xiuqing^{1,2}, Zheng Zhaojun^{1,2}, Chen Lin^{1,2}

¹National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Snow targets of Dome C and Greenland in the south and north poles are the calibration tracking targets, which are internationally applied. However, due to the existence of polar night phenomenon, it is difficult to continuously calibrate and track remote sensing instruments in a single polar ice and snow target. In response to this problem, a method of continuous tracking and monitoring of the radiation performance of the FY-3A/medium resolution spectral imager (MERSI) solar reflectance band using a combination of two polar ice targets is proposed. Firstly, using the relatively stable observation data of FY-3A/MERSI in late life stage, two bidirectional distribution function models of apparent reflectivity of ice and snow target are established. Then, the model is used to normalize the apparent reflectivity sequence of ice and snow target, eliminate the change information caused by the target non-Lambertian, obtain the parameters that reflect the change of the radiation performance of the remote sensor, and achieve the fusion of different ice and snow target data series. Finally, using the quadratic polynomial fitting model, the trend of the data after the fusion is analyzed, and it is compared with other related research results. The results show that the uncertainty of the tracking model is better than 3%, especially for the short wavelength of less than 550 nm, in which the uncertainty is better than 2%. Attenuation rate results show that the blue band attenuation is significant, especially in the band 8 (413 nm), the annual average attenuation rate is close to 7%. The red and the near infrared band (excluding the water vapor channel) are the most

收稿日期: 2017-06-05; 收到修改稿日期: 2017-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(41401417, 41471302, 41405035, 41571348)

作者简介: 王玲(1986—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事光学卫星遥感辐射定标方面的研究。E-mail: lingw@cma.gov.cn

* 通信联系人。E-mail: huxq@cma.gov.cn

stable wave bands, and the annual average attenuation rate is within $\pm 0.5\%$. The verification results show that the proposed method is in good agreement with other methods, and the deviation of the total attenuation rate of many years in most bands is less than 3% .

Key words measurement; calibration tracking; stable targets; medium resolution spectral imager

OCIS codes 120.0280; 120.1880; 280.4788

1 引 言

大部分卫星遥感应应用领域如农业估产、森林覆盖变化监测、环境动态变化监测等,对卫星资料的观测精度要求越来越高,通常需要对不同地区和不同时相的资料进行对比分析和综合应用,特别是在气候变化研究中,需要卫星遥感提供长时间序列的一致性观测数据^[1-3]。但是由于发射时的振动、恶劣的太空环境和仪器老化等多种因素,卫星传感器自发射后,其辐射响应特性会随着时空变化而衰减^[4-5]。因此需要在卫星传感器完整生命周期内,对其在轨辐射响应(也即定标系数)性能进行连续跟踪监测,及时发现传感器辐射响应变化,更新定标系数,确保从卫星观测时序中获取的地球物理量变化趋势是准确客观地反映地球系统的变化,而不是由卫星传感器性能变化产生的虚假信息^[1]。由此可见,对卫星传感器在轨辐射响应性能进行长期的连续跟踪和定标更新是实现不同地点、不同时间、不同类型传感器获取的遥感数据定量比较的基础。

基于地球稳定目标监测遥感仪器在轨辐射响应变化是一种低成本、日益被广泛应用的定标跟踪方法。位于非洲、南美洲以及我国西北的沙漠目标(如敦煌戈壁),以及南北极的冰川目标(Dome C 和 Greenland)是目前国内外应用最为广泛的遥感仪器定标跟踪的地球稳定目标^[5-10]。与沙漠目标相比,极地冰川目标具有更好的空间一致性和时间稳定性,Cao 等^[11]对 Dome C 的长期辐射稳定性研究表明,两个极地冰川目标可见光波段的反射率年际变化在 2% 以内,10 年的变化可达 1.5% 以内,可以满足不同仪器间定标跟踪要求。而且极地冰川具有较高的光谱反射率,在近紫外-可见波段($300 \sim 700 \text{ nm}$)范围内,反射率在 97% 以上^[10,12],而沙漠目标基本在 $30\% \sim 50\%$ 之间^[8]。另外,极地冰川还具有因海拔高(海平面 3 km 以上)而受大气影响小等优点^[13]。但极地冰川对反射太阳通道而言,一年中只有极昼时期(夏季)的观测数据可以使用,单一极地目标只有半年观测数据有效,目前国际上的研究者只是对南北极两个冰雪目标分开进行遥感器定标跟踪方法研究^[9,14],难以对卫星传感器性能进行

连续跟踪监测。针对这一不足,本文提出了通过建立冰雪目标上空卫星仪器表观反射率(TOA)的双向反射分布函数(BRDF)模型,将 Dome C 和 Greenland 冰雪目标表观反射率分别进行归一化,得到对卫星仪器辐射性能进行连续跟踪监测的方法,并利用该方法对风云-3A 卫星(FY-3A)/中分辨率光谱成像仪(MERSI)近 6 年(2008 年 6 月—2014 年 12 月)来反射太阳波段在轨辐射响应年际衰变规律进行了研究,并与其他有关 FY-3A/MERSI 辐射响应衰变规律研究的结果进行了比对验证。

2 研究区及数据源介绍

风云三号(FY-3)是中国新一代极轨气象卫星,目前该系列已有三颗卫星(A、B 和 C)在轨运行。其中,FY-3A 于 2008 年 5 月 27 日在太原卫星发射中心成功发射,卫星携带有 11 个有效载荷,具有全球、多光谱综合观测地球系统的能力^[15-16]。MERSI 是 FY-3A 搭载的一个关键光学成像仪,该仪器使用 45° 扫描镜和消旋 K 镜的跨轨多探元并扫式辐射计,扫描周期为 1.5 s ,可对星下点 $\pm 55^\circ$ 的视场进行对地观测,提供一个 2900 km (跨轨) $\times 10 \text{ km}$ (沿轨,星下点)的扫描带,可实现每天一次的全球扫描覆盖^[17]。该传感器具有 19 个反射太阳波段($0.41 \sim 2.13 \mu\text{m}$)和一个红外发射波段($11.25 \mu\text{m}$),其星下点空间分辨率为 250 m 和 1000 m ,具体指标参见表 1。本研究使用的数据为 FY-3A/MERSI 近 6 年(2008 年 6 月—2014 年 12 月)的 1 km 空间分辨率的 L1B 级原始观测数据,即 MERSI 对地观测计数值 V_{DN} 。FY-3A/MERSI 的波段 6 和 7 由于星上通道多档增益跳变频繁,不属于本研究方法适用范畴,本研究只对 17 个反射太阳波段的辐射响应衰变情况进行分析。

位于北极的 Greenland 和位于南极 Dome C 拥有大范围的表面特征季节变化小的冰帽区域。Greenland 以($75.0^\circ\text{N}, 41.0^\circ\text{W}$)为中心,南北长 800 km ,东西长 600 km ;Dome C 以($74.5^\circ\text{S}, 123.0^\circ\text{E}$)为中心,南北长 1024 km ,东西长 1024 km ,如图 1 所示。以上区域地面坡度小,因此无需进行地形订正,且海拔大于 3 km ,主要由压实的冰和雪组成,加之很低

的地表温度,因此冰雪常年不融化,具有长期稳定的特点^[18]。由于用于光学仪器太阳反射波段的定标跟踪,所以只能选用这两个地方的极昼时期进行研究。

Greenland 选取每年 3 月—10 月的 FY-3A/MERSI L1B 观测数据,Dome C 选取每年 10 月到次年 5 月的观测数据。

表 1 FY-3A/MERSI 光谱波段指标

Table 1 FY-3A/MERSI spectral band specifications

Band	CW / μm	BW / μm	NE Δ ρ /%	Dynamic range	Band	CW / μm	BW / μm	NE Δ ρ /%	Dynamic range
1	0.470	0.05	0.43	100%	11	0.520	0.02	0.05	80%
2	0.550	0.05	0.43	100%	12	0.565	0.02	0.05	80%
3	0.650	0.05	0.43	100%	13	0.650	0.02	0.05	80%
4	0.865	0.05	0.43	100%	14	0.685	0.02	0.05	80%
5	11.25	2.5	0.4	330K	15	0.765	0.02	0.05	80%
6	1.640	0.05	0.08	90%	16	0.865	0.02	0.05	80%
7	2.130	0.05	0.07	90%	17	0.905	0.02	0.1	90%
8	0.412	0.02	0.1	80%	18	0.940	0.02	0.1	90%
9	0.443	0.02	0.1	80%	19	0.980	0.02	0.1	90%
10	0.490	0.02	0.05	80%	20	1.030	0.02	0.1	90%

Note: CW is central wavelength, BW is band width, NE Δ ρ is signal-to-noise ratio,

bands 1-5 with a spatial resolution of 500 m, bands 6-20 with a spatial resolution of 1000 m.

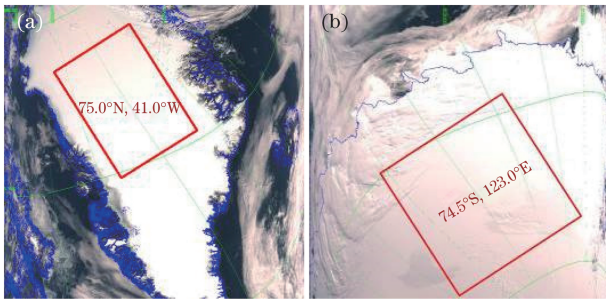


图 1 FY-3A/MERSI 南、北极冰雪目标遥感 RGB 图像。

(a) Greenland; (b) Dome C

Fig. 1 FY-3A/MERSI RGB images acquired over snow targets in south and north poles. (a) Greenland; (b) Dome C

3 原理方法

3.1 表观反射率计算与云污染数据剔除

对 FY-3A/MERSI 长时间序列(2008 年 6 月—2014 年 12 月)的观测资料,采用固定的定标系数(如卫星在轨运行初期的定标系数)计算表观反射率为:

$$\rho_{\text{TOA},i} = (\alpha_i \cdot V_{\text{DN}_i} + \beta_i) \cdot d^2 / \cos \theta_s, \quad (1)$$

式中 α_i 和 β_i 为 MERSI 第 i 波段的定标斜率和截距, d^2 为日地距离修正因子, V_{DN_i} 为 MERSI 第 i 波段对地观测计数值, θ_s 为太阳天顶角。

选取冰雪目标中心 20 km \times 20 km 的区域,用该区域的 ρ_{TOA} 均值作为冰雪目标的表观反射率。假设大气稳定和晴空情况下,如果仪器通道没有发生衰减,计算的目标表观反射率随时间是平稳的。

但是,如果仪器通道发生衰减,计算的目标表观反射率随时间将呈现下降趋势。本研究利用在 900 nm 以后雪反射率具有较大差异的特点(即:雪反射率迅速降低,而云仍保持较高反射率^[12,19]),剔除被云污染的观测数据。为了区分云和雪,通常选择的是 1640 nm^[18-19],考虑到 FY-3A/MERSI 在该波段处多档增益跳变频繁,数据可信度低,因此使用了 FY-3A/MERSI 中唯一一个大于 900 nm 的非水汽吸收波段[波段 20 (1030 nm)]进行云污染数据去除。稳定目标的辐射具有较高的空间均匀性和较好的时间稳定性的特点,反射率的空间和时间偏差系数(标准差/均值)通常低于 3%,如果被云污染则空间均匀性和时间稳定性将会变差,因此采用 Kim 等^[20-21]提出的空间和时间均一性判据剔除受云污染的数据。首先将研究区划分为 4 km \times 4 km 的子区域,针对每个子区域进行以下判断:

1) 空间均一性判断:计算子区域在 1030 nm 波段处的 ρ_{TOA} 均值和标准差,如果标准差与均值的比大于 0.1 则认为被云污染;

2) 时间一致性判断:子区域前后相邻 20 d 数据的 ρ_{TOA} 均值和标准差(1030 nm 波段),如果该天的表观反射率与邻近天的表观反射率均值差异大于邻近天 ρ_{TOA} 标准差的 2 倍,则认为该数据被云污染。

3.2 冰雪目标 BRDF 效应订正

Wiscombe 等^[22]通过多次散射计算,分析了太阳天顶角对深雪双向反射率的影响。结果表明对波长小于 700 nm 的波段,冰雪吸收特性较弱反射较

高, 太阳天顶角的变化影响相对较低; 对于大于 700 nm 的较长波段, 冰雪的吸收系数增大, 反射比相对较低, 受太阳天顶角的变化影响较大。对于散射特性而言, 雪的散射相函数是各向异性的, 因此双向反射率比在不同太阳天顶角的情况下差异很大。在太阳天顶角较小的情况下, 雪的 BRDF 近似朗伯体特性, 但对于太阳天顶角较大的情况下, 前向散射明显增大。由于 Greenland 和 Dome C 位于高纬地区, 太阳天顶角通常比较大, 因此需要对表观反射率的 BRDF 效应进行订正, 去除卫星传感器接收信号中由太阳天顶角引起的变化信息。

Simth 等^[18]的研究表明, 冰雪目标的表观反射率与太阳天顶角余弦 ($\cos \theta_s$) 之间的关系可以用二次多项式表示:

$$\hat{R} = k_0 + k_1 \cdot \cos \theta_s + k_2 \cdot \cos^2 \theta_s, \quad (2)$$

式中 \hat{R} 是模型计算的表观反射率值, k_0, k_1, k_2 是二次多项式模型的拟合系数, θ_s 是太阳天顶角。本研究也采用这一方法拟合极地冰雪表观反射率的 BRDF 模型。

为了去除表观反射率的角度变化效应, 采用比值的方法, 使用(2)式建立冰雪目标的 BRDF 模型, 将表观反射率归一化为角度影响基本可以忽略的参数 R_{TOA} , 可以表示为:

$$R_{\text{TOA}} = \rho_{\text{TOA}} / \hat{R}, \quad (3)$$

式中 ρ_{TOA} 是表观反射率观测值, \hat{R} 是 BRDF 模型计算的表观反射率值, R_{TOA} 是经 BRDF 模型归一化的表观反射率比值。

3.3 基于冰雪目标的仪器响应跟踪监测模型

对去除 BRDF 效应后的冰雪目标的归一化表

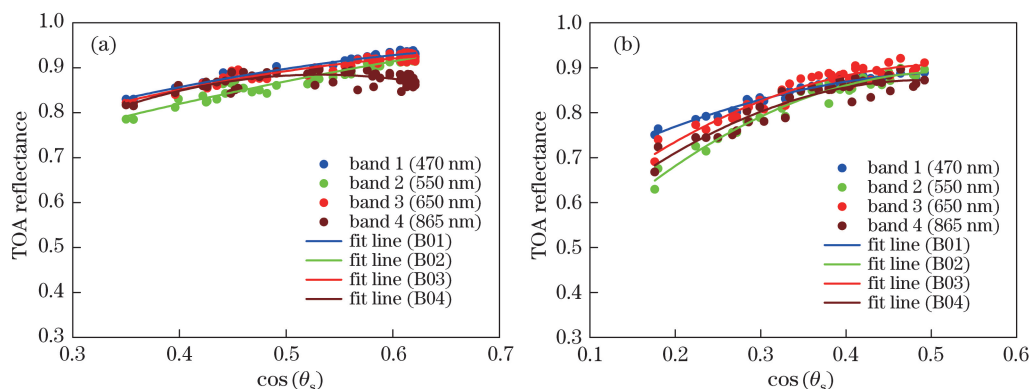


图 2 基于 2013 年 1 月—12 月 FY-3A/MERSI 表观反射率资料建立的 (a) Greenland 与 (b) Dome C 的二次多项式 BRDF 回归模型

Fig. 2 Quadratic polynomial BRDF regression models of (a) Greenland and (b) Dome C based on TOA data of FY-3A/MERSI from January 2013 to December 2013

观反射率序列 R_{TOA} , 采用二次多项式拟合的方法, 建立 R_{TOA} 时间序列与时间 t 之间的函数关系, 可以表示为:

$$R_{\text{TOA}} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2, \quad (4)$$

式中 a_0, a_1, a_2 是时间序列跟踪监测模型的系数, 由最小二乘法估计得到。

基于(4)式建立的时间序列跟踪监测模型, 可计算时间 t_1 到时间 t_2 期间 ($t_2 > t_1$) 仪器的总衰减率和年衰减率, 即:

$$D_{\text{total}} = \frac{\hat{R}_{\text{TOA}}(t_2) - \hat{R}_{\text{TOA}}(t_1)}{\hat{R}_{\text{TOA}}(t_1)} \times 100\%, \quad (5)$$

$$D_{\text{annual}} = \frac{D_{\text{total}}}{t_2 - t_1} \times 365 \times 100\%, \quad (6)$$

式中 D_{total} 和 D_{annual} 分别是遥感仪器辐射响应的总衰减率和年衰减率, $\hat{R}_{\text{TOA}}(t_2)$ 和 $\hat{R}_{\text{TOA}}(t_1)$ 分别是用时间序列跟踪监测模型计算的 t_2 和 t_1 时刻的归一化表观反射率值。

4 结 果

4.1 冰雪目标表观反射率 BRDF 模型

在建立冰雪目标表观反射率 BRDF 模型时, 为了降低仪器性能衰变的观测数据对表观反射率建模的影响, 采用 FY-3A/MERSI 在寿命相对晚期 (2013 年 1 月—12 月) 仪器辐射性能相对比较平稳的数据 (观测角度在 20° 以内的晴空观测资料), 采用二次多项式模型 [(2) 式] 建立冰雪目标表观反射率的 BRDF 模型。以 MERSI 前 4 个波段为例, 图 2(a) 和图 2(b) 分别是 Greenland 和 Dome C 用于建立 BRDF 模型的表观反射率随太阳天顶角余弦 ($\cos \theta_s$) 的分布情况, 以及采用二次多项式模型获

得的 BRDF 模型。采用相同的方法,可以获得其他太阳反射率波段的二次多项式 BRDF 回归模型。所有反射太阳波段的 BRDF 模型均方根误差(RMSE)和模型相关系数 R^2 列于表 2 中。由表 2 可见,两个冰雪目标各波段表观反射率与太阳天顶角余弦具有较高的相关性,相关系数 R^2 基本在 0.8 以上,但 Greenland 的三个水汽通道(波段 17~19)及 Dome C 的一个水汽强烈吸收通道(波段 18)较

低,在 0.5 以下。两个冰雪目标的 BRDF 模型精度也具有一致性,表现为:非水汽吸收波段精度较高, RMSE 低于 0.02, Greenland 略优于 Dome C; 三个水汽吸收波段(波段 17~19)拟合精度略低,但都在 0.04 以内,其中 Dome C 略优于 Greenland,在 0.025 以内。非水汽吸收通道的 BRDF 模型精度优于水汽吸收通道,说明表观反射率信号中大气贡献的比例及其变化程度是影响拟合效果的关键因素。

表 2 Greenland 与 Dome C 表观反射率 BRDF 模型参数及模型误差估计

Table 2 TOA BRDF model parameters and model error estimation for Greenland and Dome C

Band	Greenland					Dome C				
	k_2	k_1	k_0	RMSE	R^2	k_2	k_1	k_0	RMSE	R^2
1	-0.5552	0.9113	0.5809	0.0063	0.953	-0.9883	1.0929	0.5899	0.0058	0.975
2	-0.2985	0.7713	0.5587	0.0099	0.936	-1.9993	2.0961	0.3422	0.0124	0.963
3	-0.6748	1.0214	0.5504	0.0084	0.913	-1.6637	1.7364	0.4542	0.0142	0.930
4	-2.0483	2.1817	0.3036	0.0122	0.538	-1.8850	1.8597	0.4138	0.0173	0.893
8	-0.4440	0.7431	0.5240	0.0061	0.938	-0.4636	0.7186	0.5415	0.0123	0.883
9	-0.4242	0.6898	0.5801	0.0048	0.950	-0.4557	0.6564	0.5957	0.0145	0.802
10	-0.4425	0.7627	0.6334	0.0045	0.969	-0.8980	1.0450	0.6052	0.0058	0.975
11	-0.4214	0.7650	0.6345	0.0065	0.945	-1.4023	1.4880	0.5266	0.0077	0.973
12	-0.1189	0.5081	0.5860	0.0108	0.894	-1.7994	1.8458	0.3613	0.0139	0.937
13	-0.8165	1.0983	0.5340	0.0069	0.910	-1.7883	1.7971	0.4418	0.0144	0.924
14	-1.0380	1.2775	0.4902	0.0067	0.884	-1.5797	1.6080	0.4660	0.0124	0.933
15	-1.2257	1.4491	0.3379	0.0070	0.860	-1.3203	1.4067	0.3846	0.0109	0.941
16	-1.8061	1.9063	0.3751	0.0112	0.588	-1.5385	1.5638	0.4704	0.0146	0.903
17	-2.3517	2.2946	0.2616	0.0225	0.314	-1.8884	1.6466	0.4659	0.0202	0.731
18	-3.3217	3.1006	-0.1976	0.0365	0.391	-2.0034	1.5659	0.2472	0.0226	0.499
19	-2.4339	2.2978	0.2264	0.0237	0.415	-1.7180	1.4790	0.4475	0.0191	0.696
20	-1.9092	1.7594	0.2845	0.0232	0.689	-2.0632	1.7159	0.3160	0.0122	0.827

图 3 和图 4 分别展示的是 Greenland 与 Dome C 自 2008 年 6 月到 2014 年 12 月 FY-3A/MERSI 长时间序列的表观反射率观测值(黑色方块),以及 BRDF 模型计算值(红色圆点)和经 BRDF 模型归一化的表观反射率 R_{TOA} (蓝色三角形)。在仪器长期响应稳定的前提下,归一化表观反射率 R_{TOA} 理论上应保持为 1 不变,因此 R_{TOA} 的变化可以体现仪器辐射响应的变化。从图 3 和图 4 可以看出,对于波长较长的波段 3(650 nm)和波段 4(865 nm),长时间序列的 R_{TOA} 基本维持 1 不变;但对于波长较短的波段 1(470 nm)和波段 2(550 nm), R_{TOA} 呈单调递减的趋势,时间离 2013 年越远, R_{TOA} 偏移 1 的程度越大。以上 R_{TOA} 的变化很好地反映了仪器的衰减情况,即 R_{TOA} 下降程度越大,仪器衰减越大。

4.2 BRDF 订正的归一化表观反射率变化趋势

如图 3 和图 4 所示,由于极地观测资料的极昼极夜限制,Dome C 和 Greenland 冰雪目标表观反射率序列在时间上是不连续的,因此单独使用一个冰雪目标,难以对卫星传感器性能进行时间上的连续跟踪监测。图 5 展示的是联合使用这两个冰雪目标,对 FY-3A/MERSI 自 2008 年 6 月到 2014 年 12 月期间,辐射响应衰变情况进行跟踪监测的结果,由于篇幅的限制,图 5 只给出前 4 个波段的结果。图 5 中红色圆圈是 Greenland 经 BRDF 订正后的归一化表观反射率 R_{TOA} ,蓝色圆圈是 Dome C 上的 R_{TOA} ,黑色线是对两者的 R_{TOA} 时间序列进行二次多项式拟合的结果。图 5 中 Dome C 上空的 R_{TOA} 年内变化在波段 2~波段 4 处存在两端大中间

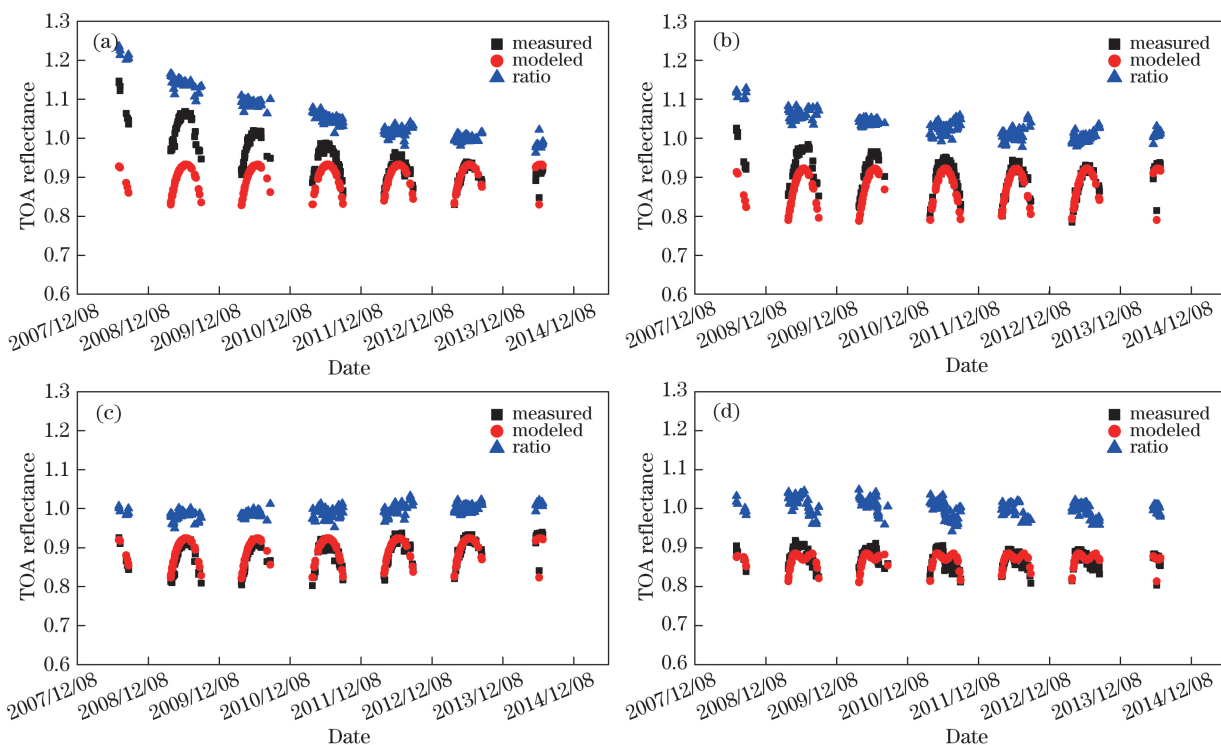


图 3 Greenland 上 FY-3A/MERSI 表观反射率观测值、BRDF 模型预测值以及观测值与模型预测值的比值。
(a)波段 1; (b)波段 2; (c)波段 3; (d)波段 4

Fig. 3 Observed values of TOA, predicted values of BRDF model and ratios of the observed values and predicted values of model for FY-3A/MERSI over Greenland. (a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3; (d) band 4

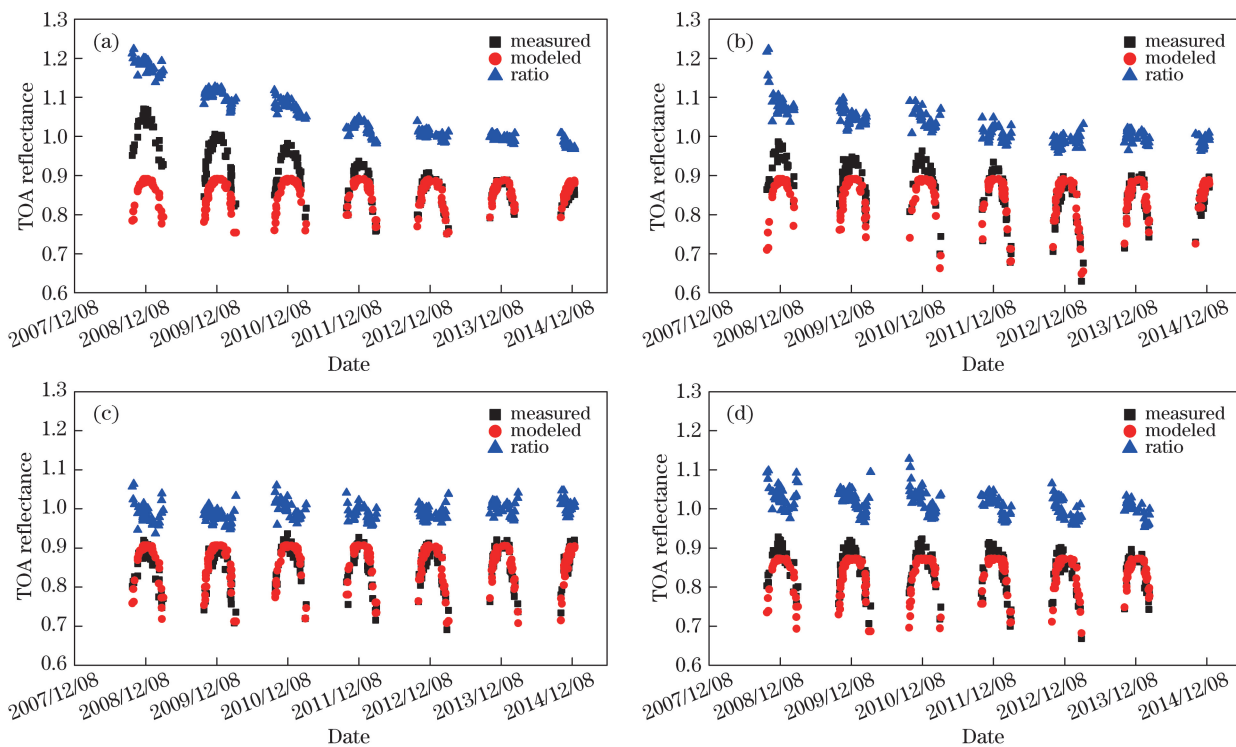


图 4 Dome C 上 FY-3A/MERSI 表观反射率观测值、BRDF 模型预测值以及观测值与模型预测值的比值。
(a)波段 1; (b)波段 2; (c)波段 3; (d)波段 4

Fig. 4 Observed values of TOA, predicted values of BRDF model and ratios of the observed values and predicted values of model for FY-3A/MERSI over Dome C. (a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3; (d) band 4

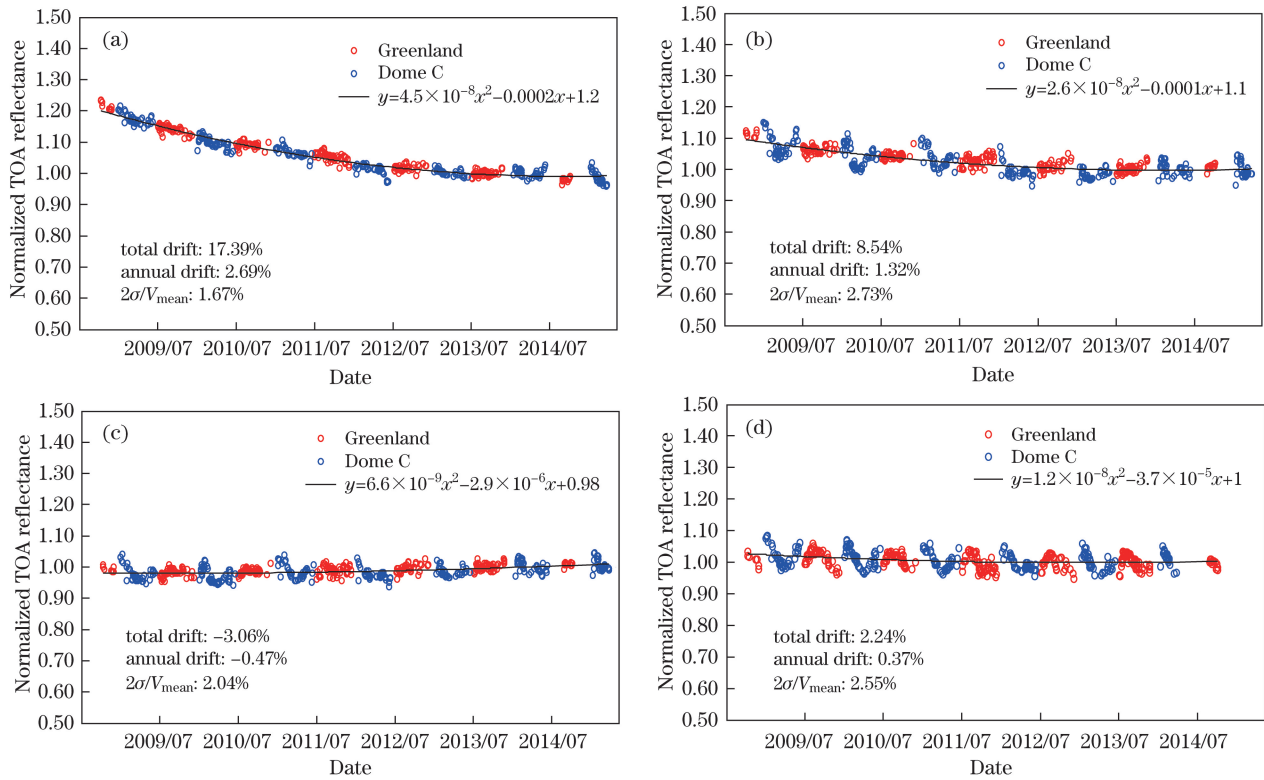


图 5 Greenland 和 Dome C 冰雪目标 FY-3A/MERSI 归一化表观反射率时间序列及辐射响应衰减跟踪监测结果。

(a) 波段 1; (b) 波段 2; (c) 波段 3; (d) 波段 4

Fig. 5 Time series and radiometric response degradation tracking results of normalized TOA of FY-3A/MERSI over Greenland and Dome C snow target. (a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3; (d) band 4

小的跳跃, Greenland 上空的 R_{TOA} 年内变化仅波段 4 存在类似情况, 其他波段的年内变化较小。 R_{TOA} 反映了实际观测值与模型模拟值之间的差异, 这与模型的精度密切相关。4.1 节的冰雪目标 BRDF 模型评估结果表明, Greenland 除波段 1 的模型精度略低于 Dome C 外, 波段 2~波段 4 的模型精度均优于 Dome C。对比波段 1~波段 4 的结果发现, 波长最长的波段 4 (865 nm) 的跳跃最大, 可能是因为冰雪在波长较长波段 (>700 nm) 后, 反射率迅速降低, 模型模拟的误差较之波长较短波段较差。表 2 的模型误差统计结果也显示, 波段 4 的模型误差大于前三个波段的误差。 R_{TOA} 的年内跳跃出现在两端, 对应于太阳天顶角比较大的地方, 可能与模型在太阳天顶角比较大时精度较差有关。Hu 等^[8] 在利用 Dome C 研究中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 辐射响应变化时, 获得的 R_{TOA} 也存在类似的变化情况。2008 年 6 月—2014 年 12 月期间, 所有太阳反射率波段的辐射响应跟踪监测模型 (二次多项式) 参数, 即二次项系数 a_2 、一次项系数 a_1 、截距 a_0 和拟合模型的不确定度 $2\sigma/V_{\text{mean}}$, 以及辐射响应的年衰

减率和总衰减率如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 波长小于 900 nm 的通道的跟踪监测模型精度较高, 不确定性 ($2\sigma/V_{\text{mean}}$) 在 3% 以内, 其中, 波长小于 550 nm 的短波段可达到 2% 以内; 波长大于 900 nm 的波段 20 及两个弱水汽吸收通道 (波段 17 和波段 19) 的跟踪监测模型精度略低, 但不确定性 ($2\sigma/V_{\text{mean}}$) 在 5% 以内; 水汽强烈吸收通道 [波段 18 (940 nm)] 的跟踪监测模型精度较差, 不确定性 ($2\sigma/V_{\text{mean}}$) 接近 10%。孙凌等^[23] 在利用多个沙漠目标对 FY-3A/MERSI 进行跟踪监测时, 发现蓝波段的定标跟踪模型的不确定性较大, 超过了 3%, 尤其波段 8 (412 nm) 为 5.69% (图 6)。因此, 与沙漠目标相比, 极地冰雪目标更适合对遥感器的蓝波段进行跟踪监测。一方面, 由于极地冰雪目标海拔高, 大气状态相较于低海拔地区的沙漠目标要更干洁, 气溶胶与分子散射影响较小, 因此卫星接收信号中大气信息的贡献相对较小; 另一方面, 冰雪目标较沙漠目标而言, 蓝波段具有更高的反射率, 通常大于 0.9^[12], 因此具有更高的信噪比。

表 3 基于 2008 年 6 月—2014 年 12 月 Greenland 和 Dome C R_{TOA} 时间序列的 FY-3A/MERSI 辐射响应跟踪监测模型参数和模型不确定性统计及模型计算的辐射响应衰减率
 Table 3 FY-3A/MERSI radiometric response tracking model parameters derived from R_{TOA} time series from June 2008 to December 2014 over Greenland and Dome C, model uncertainty statistics and calculated radiometric response degradation rate of model

Band	Wavelength /nm	a_2	a_1	a_0	$2\sigma/V_{mean}$	Annual drift /%	Total drift /%
1	470	4.52×10^{-8}	-1.95×10^{-4}	1.2010	1.67	2.69	17.39
2	550	2.67×10^{-8}	-1.03×10^{-4}	1.0964	2.73	1.32	8.54
3	650	6.64×10^{-9}	-2.94×10^{-6}	0.9800	2.04	-0.47	-3.06
4	865	1.19×10^{-8}	-3.66×10^{-5}	1.0267	2.55	0.37	2.24
8	412	1.23×10^{-7}	-6.17×10^{-4}	1.7230	2.05	6.95	44.83
9	443	1.97×10^{-8}	-2.22×10^{-4}	1.3416	1.52	4.77	30.79
10	490	2.63×10^{-8}	-1.33×10^{-4}	1.1502	1.35	2.25	14.49
11	520	2.12×10^{-8}	-8.93×10^{-5}	1.0875	1.79	1.32	8.52
12	565	1.45×10^{-8}	-4.56×10^{-5}	1.0300	2.82	0.41	2.62
13	650	7.54×10^{-9}	-9.77×10^{-6}	0.9890	2.18	-0.30	-1.91
14	685	9.57×10^{-9}	-1.28×10^{-5}	0.9886	2.03	-0.36	-2.34
15	765	1.36×10^{-8}	-3.59×10^{-5}	1.0172	2.04	0.14	0.89
16	865	3.88×10^{-10}	-1.22×10^{-5}	1.0214	2.36	0.40	2.61
17	905	2.24×10^{-8}	-7.87×10^{-5}	1.0633	3.62	0.89	5.74
18	940	2.60×10^{-8}	-1.11×10^{-4}	1.1015	9.29	1.65	10.64
19	980	1.53×10^{-8}	-9.56×10^{-5}	1.1191	3.98	1.94	12.52
20	1030	4.97×10^{-9}	-1.39×10^{-4}	1.2385	4.90	3.75	24.19

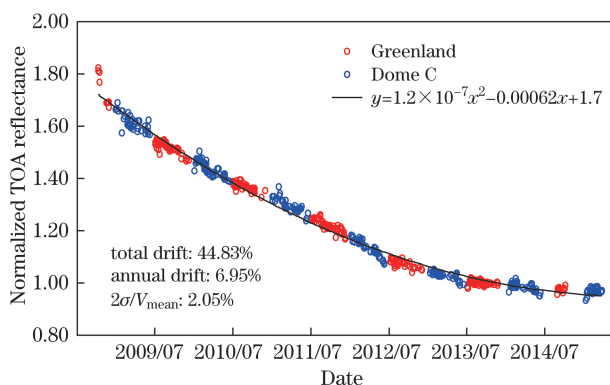


图 6 Greenland 和 Dome C 冰雪目标 FY-3A/MERSI 波段 8 归一化表观反射率时间序列及辐射响应衰减跟踪监测结果
 Fig. 6 Time series and radiometric response degradation tracking results of normalized TOA of FY-3A/MERSI band 8 over Greenland and Dome C snow target

从表 3 列出的 MERSI 各个波段的衰减率结果可以看出,光学遥感器的辐射响应变化与波长大小成负相关的关系。波长小于 500 nm 的蓝光波段衰减最显著,年衰减率在 2% 以上,近 6 年(2008 年 6 月—2014 年 12 月)的总衰减率在 10% 以上,特别是波段 8(412 nm),其年衰减率为 6.95%,总衰减为 44.83%;波长大于 550 nm 的红光和近红外波段(水

汽通道除外)最为稳定,年衰减率和总衰减率分别在 ±0.5% 和 ±3% 以内,几乎没有衰减;波长在 500~550 nm 之间的绿光波段,衰减率介于蓝光和红光之间,年衰减率约为 1.5%。

4.3 结果验证

验证资料来源于 Chen 等^[3,23-24]发表的有关 FY-3A/MERSI 太阳反射率波段在轨响应变化研究成果。孙凌等^[23]基于敦煌辐射校正场多年的定标系数序列,研究了 2008 年 9 月—2011 年 8 月期间, FY-3A/MERSI 太阳反射率波段在轨响应变化; 2013 年,孙凌等^[24]又利用多个地球稳定目标,研究了 2008 年 9 月—2011 年 12 月期间, FY-3A/MERSI 太阳反射率波段在轨响应变化;Chen 等^[3]基于深对流云(DCC)目标,研究了 2008 年 8 月—2012 年 8 月期间, FY-3A/MERSI 太阳反射率波段辐射响应衰变规律。其中,Chen 等^[3]将孙凌等^[23-24]的研究成果统一到 2008 年 8 月—2012 年 8 月期间,与其研究成果进行了对比分析。因此,为便于比较,本研究利用 4.2 节基于极地冰雪目标 R_{TOA} 时间序列建立的辐射响应衰减跟踪监测模型,重新计算了与 Chen 等^[3]同一时间段(2008 年 8 月—2012 年 8 月)内,

FY-3A/MERSI 的总衰减率。本方法(即联合利用南、北极冰雪目标, snow)以及其他三种方法[即 DCC、多个稳定目标 (multi-site) 和敦煌场地 (Dunhuang)] 获得的 FY-3A/MERSI 在 2008 年 8 月—2012 年 8 月期间的辐射响应总衰减率如图 7 所示,具体数值列于表 4 中。

由图 7 可以看出,本方法与其他三种方法的结果具有很好的一致性,都监测到蓝光波段(波段 1、波段 8、波段 9 和波段 10)的衰减明显,2008 年 8 月—2012 年 8 月期间,总衰减率超过了 10%,且随着波长的减小,衰减率趋于增大,波长最小的第 8 波段(412 nm),4 年间的总衰减率接近 40%。波段 3、波段 4 和波段 13~波段 16 这 6 个波长大于 600 nm 的红光和近红外通道最为稳定,4 年的总衰减率基本在 3%以内,即年衰减率不到 1%。值得注意的是,4 种方法都监测到水汽通道(波段 17~波段 19)和波段 20(1030 nm)存在明显的衰减,其中波段 17(905 nm)略小,在 5%~10%之间,其他三个波段大于 10%。对比衰减率的绝对偏差可以看出,本方法与其他三种方法的差异较小,大部分波段在 3%

以内,特别是衰减最大的波段 8,差异在 ±1% 以内(表 4)。对比本方法与其他不同方法差异的大小,可以发现,本方法与 DCC 方法的一致性最好,仅有波段 11(520 nm)的偏差较大,为 4.9%,其他波段的差异都在 ±2.5% 以内(表 4)。Chen 等^[3]的研究指出,DCC 在波段 11 的 MERSI 观测信号饱和,因此

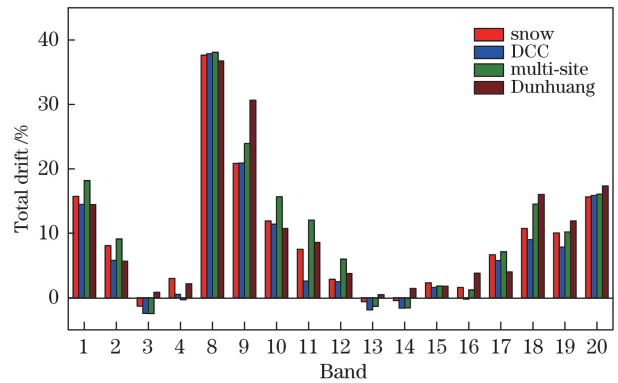


图 7 4 种不同方法获取的 FY-3A/MERSI 在 2008 年 8 月—2012 年 8 月期间反射太阳通道总衰减率
Fig. 7 Total degradation rate of reflected solar channel of FY-3A/MERSI from August 2008 to August 2012 derived from four different methods

表 4 4 种不同方法获取的 FY-3A/MERSI 在 2008 年 8 月—2012 年 8 月期间反射太阳通道总衰减率及所提方法与其他三种方法的偏差

Table 4 Total degradation rate of reflected solar channel of four methods and deviation of proposed method and other three methods derived from FY-3A/MERSI from August 2008 to August 2012

Band	Degradation / %				Degradation difference / %		
	Snow	DCC	Multi-site	Dunhuang	Snow/DCC	Snow/multi-site	Snow/Dunhuang
1	15.72	14.48	18.18	14.44	1.24	-2.46	1.28
2	8.06	5.79	9.12	5.67	2.27	-1.06	2.39
3	-1.30	-2.44	-2.46	0.83	1.14	1.16	-2.13
4	2.97	0.52	-0.31	2.14	2.45	3.28	0.83
8	37.63	37.87	38.08	36.76	-0.23	-0.45	0.87
9	20.84	20.89	23.94	30.65	-0.05	-3.10	-9.81
10	11.92	11.41	15.67	10.74	0.51	-3.75	1.18
11	7.50	2.59	12.04	8.57	4.91	-4.54	-1.07
12	2.84	2.48	6.00	3.75	0.37	-3.16	-0.91
13	-0.61	-1.87	-1.32	0.45	1.26	0.71	-1.06
14	-0.44	-1.60	-1.59	1.43	1.16	1.15	-1.87
15	2.30	1.59	1.81	1.79	0.71	0.49	0.51
16	1.58	-0.21	1.21	3.81	1.79	0.37	-2.23
17	6.65	5.77	7.13	4.00	0.88	-0.48	2.65
18	10.72	9.00	14.52	16.00	1.73	-3.80	-5.28
19	10.05	7.84	10.18	11.92	2.21	-0.13	-1.87
20	15.64	15.87	16.06	17.33	-0.23	-0.42	-1.69

该波段的衰减率结果可信度较低。但是该波段与敦煌辐射校正场方法的绝对偏差就比较小,为 -1.07% 。

5 结 论

针对基于单一极地冰雪目标进行遥感器定标跟踪存在不连续的问题,提出了联合使用两个极地冰雪目标(Dome C 和 Greenland)对 FY-3A/MERSI 太阳反射率波段辐射性能进行连续跟踪的方法。在建立冰雪目标表观反射率 BRDF 模型的基础上,将两个冰雪目标的表观反射率进行归一化,消除表观反射率中与冰雪目标 BRDF 特性相关的变化信息,获得反映遥感器辐射性能变化的参量,实现不同冰雪目标数据序列的融合。最后,基于融合后的数据序列进行定标跟踪趋势分析,获得了 FY-3A/MERSI 在 2008 年 6 月—2014 年 12 月期间连续完整的辐射响应衰变规律,并与其他相关研究成果进行了对比验证。得到以下结论:

1) Dome C 和 Greenland 冰雪目标的表观反射率 BRDF 模型可以表示成有关太阳天顶角余弦的二次多项式。非水汽吸收波段的 BRDF 模型具有较高的相关系数和较高精度,相关系数 R^2 大于 0.8, RMSE 小于 0.02。水汽吸收波段的精度略低, RMSE 约为 0.02~0.04, R^2 约为 0.05。这说明两个极地冰雪目标上气溶胶与分子散射影响不明显,但存在一定的水汽影响。

2) 对于波长小于 900 nm 的波段,联合两个极地冰雪目标的定标跟踪模型不确定性优于 3%,尤其波长小于 550 nm 的蓝波段可达到 2% 以内。利用多个沙漠目标对 FY-3A/MERSI 进行跟踪监测研究,发现蓝波段的定标跟踪模型的不确定性较大($>3\%$),尤其波长最短波段(412 nm),不确定性为 5.69%。因此,相较沙漠目标而言,极地冰雪目标更适合对遥感器的蓝波段进行跟踪监测。

3) 本方法的跟踪监测结果表明, FY-3A/MERSI 太阳反射率波段的辐射响应变化量与波长成负相关的关系。2008 年 6 月—2014 年 12 月期间,波长小于 500 nm 的蓝光波段衰减最显著,年衰减率高于 2%,特别是波段 8(412 nm),其年衰减率为 6.95%,总衰减达 44.83%;波长大于 600 nm 的红光和近红外波段(水汽通道除外)最为稳定,年衰减率在 $\pm 0.5\%$ 以内;波长在 500~600 nm 之间的绿光波段,衰减率介于蓝光和红光之间,年衰减率约为 1.5%。

4) 本方法获得的 FY-3A/MERSI 辐射响应变化规律与其他相关研究具有很好的一致性,特别是衰减最显著的第 8 波段,本方法与其他三种方法计算的 4 年(2008 年 8 月—2012 年 8 月)总衰减率差异在 $\pm 1\%$ 以内。综合所有太阳反射率波段的总衰减率差异,本方法与 DCC 方法一致性最好,除 DCC 饱和的波段外,其他波段的差异在 $\pm 2.5\%$ 以内。

综上,本方法不仅弥补了传统冰雪目标定标跟踪方法的连续性不足,而且在短波波段(小于 500 nm)具有更好的定标跟踪不确定性。目前的研究仅考虑了极地冰雪目标 BRDF 特性对表观反射率变化的贡献,没有考虑大气变化的影响,所以目前的研究中,水汽吸收通道的辐射响应跟踪监测模型不确定性大。因此,如何去除卫星观测序列中水汽变化信息,提高水汽通道定标跟踪精度,是下一步需要开展的工作。

参 考 文 献

- [1] Heidinger A K, Cao C, Sullivan J T. Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D23): AAC11.
- [2] 顾行发, 田国良, 李小文, 等. 遥感信息的定量化[J]. *中国科学 E 辑: 信息科学*, 2005, 35(z1): 1-10.
- [3] Chen L, Hu X Q, Xu N, *et al.* The application of deep convective clouds in the calibration and response monitoring of the reflective solar bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager)[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6958-6975.
- [4] Nagaraja R C R, Chen J. Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9, and -11 spacecraft[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(11): 1931-1942.
- [5] Xu N, Wu R H, Hu X Q, *et al.* Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228001.
徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228001.
- [6] Bhatt R, Doelling D, Wu A, *et al.* Initial stability assessment of S-NPP VIIRS reflective solar band calibration using invariant desert and deep convective cloud targets[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(4): 2809-2826.
- [7] Helder D L, Basnet B, Morstad D L. Optimized

- identification of worldwide radiometric pseudo-invariant calibration sites[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 527-539.
- [8] Hu X, Liu J, Sun L, *et al.* Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 566-582.
- [9] Wu A. Using Dome C for moderate resolution imaging spectroradiometer calibration stability and consistency[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 033520.
- [10] Masonis S J, Warren S G. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional reflectance of Antarctic and Greenland snow[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(8): 1495-1520.
- [11] Cao C, Ma L, Upreti S, *et al.* Spectral characterization of the Dunhuang calibration/validation site using hyperspectral measurements[C]. SPIE, 2010, 7862: 78620J.
- [12] Grenfell T C, Warren S G, Mullen P C. Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and near-infrared wavelengths[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(9): 18669-18684.
- [13] Wu A, Xiong X, Cao C. Using BRDF derived from MODIS observations over Dome C to characterize calibration stability and consistency of POS sensors[C]. SPIE, 2009, 7456: 745605.
- [14] Upreti S, Cao C. Suomi NPP VIIRS reflective solar band on-orbit radiometric stability and accuracy assessment using desert and Antarctica Dome C sites[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 166: 106-115.
- [15] Dong C, Yang J, Yang Z, *et al.* An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(10): 1531-1544.
- [16] Zhang P, Yang H, Qiu H, *et al.* Quantitative remote sensing from the current Fengyun 3 satellites[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(4): 6-11.
张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力[J]. 气象科技进展, 2012, 2(4): 6-11.
- [17] Hu X, Sun L, Liu J, *et al.* Calibration for the solar reflective bands of Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) onboard FY-3A[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4915-4928.
- [18] Smith D L, Mutlow C T, Nagaraja R C. Calibration monitoring of the visible and near-infrared channels of the Along-Track Scanning Radiometer-2 by use of stable terrestrial sites[J]. Applied Optics, 2002, 41(3): 515-523.
- [19] Feng S Y, Zhang N, Shen J, *et al.* Method of cloud detection with hyperspectral remote sensing image based on the reflective characteristics[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 198-204.
冯书谊, 张宁, 沈霁, 等. 基于反射率特性的高光谱遥感图像云检测方法研究[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 198-204.
- [20] Kim W. Assessment of radiometric degradation of FY-3A MERSI reflective solar bands using TOA reflectance of pseudoinvariant calibration sites[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 793-797.
- [21] Helder D L, Basnet B, Morstad D L. Optimized identification of worldwide radiometric pseudo-invariant calibration sites[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 527-539.
- [22] Wiscomb W J, Warren S G. A model for the spectral albedo of snow I: pure snow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37(12): 2712-2733.
- [23] Sun L, Hu X Q, Guo M H, *et al.* Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(4): 84-96.
孙凌, 胡秀清, 郭茂华, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场地定标跟踪[J]. 气象科技进展, 2013, 3(4): 84-96.
- [24] Sun L, Guo M H, Xu N, *et al.* On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1869-1877.
孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1869-1877.