

基于稳定场地再分析资料的多源遥感器替代定标

韩启金 刘 李 傅俏燕 张学文 王爱春 潘志强

(中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要 为监测多源卫星遥感器在轨辐射性能, 提出了基于均匀稳定目标再分析基准数据库的替代定标方法。以均匀稳定的敦煌辐射校正场为实验场区, 在分析场区历史光谱和大气数据的基础上, 建立了地表反射率参考与实时气溶胶估算模型; 并结合现有反射率基法定标模型实现了资源一号 02C(ZY-1 02C)、资源三号(ZY-3)和高分一号(GF-1)卫星多个遥感器的辐射定标。采用星-地同步实测数据和常规外场定标方法对获取的定标系数进行验证, 结果表明: 基于类似敦煌场的稳定目标再分析资料可实现多源遥感器的辐射定标; 定标后的辐亮度与基于实测数据反演的辐亮度平均差异小于 5.0%, 且与常规外场定标结果总体精度相近。该方法可用于多源卫星遥感器在轨辐射性能日常检测, 并为定标系数修订提供参考。

关键词 遥感; 替代定标; 稳定场地; 反射率

中图分类号 TP722.4; TP721.1; TP731

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.1128002

Vicarious Calibration of Multiple Sensors Based on Reanalysis Data of Pseudo-Invariant Site

Han Qijin Liu Li Fu Qiaoyan Zhang Xuwen Wang Aichun Pan Zhiqiang

(China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

Abstract To monitor the in-orbit radiometric performance of multiple satellite remote sensors onboard, a vicarious calibration methodology based on pseudo-invariant reanalyzed benchmark database is presented. Using Dunhuang radiometric calibration site, a homogeneous stable test site, the reflectance-based reference and aerosol real time estimated models are established after analyzing the reflectance spectral and atmospheric characteristics at the site. Meanwhile, the radiometric calibration of ZY-1 02C, ZY-3 and GF-1 remote sensors is carried out using fore-mentioned reflectance-based calibration model. The research results by comparing the calibration results with usual method and ground measured data are validated and discussed. The results indicate that the calibration of multiple remote sensors can be performed based on analyzed data of pseudo-invariant site, and the relative difference is less than 5.0% between radiance based on the calibration results and the predicted radiance with the ground measurements, and the accuracy of new method is the same as usual calibration result. The research results can provide data reference for future calibrating the radiometric calibration coefficients and monitoring the property change of remote sensors.

Key words remote sensing; vicarious calibration; pseudo-invariant site; reflectance

OCIS codes 280.4788; 040.1520; 120.0280; 120.4640

1 引 言

定标与检验是确保生成陆表参量产品所用遥感数据和算法模型摆脱遥感器性能变化和数据处理等因素影响的关键环节, 遥感器辐射定标作为上述过程的一个最基本部分, 是遥感数据定量化应用中涉

及内容最多、过程最复杂的技术领域^[1-2]。目前, 卫星遥感器辐射定标可归纳为三个领域: 发射前定标、发射后星上定标以及在轨替代或直接定标, 这里的发射前定标是围绕遥感器综合性能检测所开展的实验室定标或偶尔的室外定标, 而星上定标和替代定

收稿日期: 2014-06-17; **收到修改稿日期:** 2014-07-15

基金项目: 国家 863 计划(2012AA12A302)

作者简介: 韩启金(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事卫星光学遥感器性能检测与遥感应用等方面的研究。

E-mail: cresda_hanjin@126.com

标是监测遥感器在轨辐射性能变化以及校准发射前定标系数偏差所开展的在轨定标^[3],这些方法的优缺点已经过详细的对比和讨论^[4]。通过辐射定标将不同卫星遥感器的输出数据标定到可溯源的统一物理量基准上,从而确保遥感数据产品辐射基准的一致性和质量精度的稳定性。

卫星遥感器的性能特点在发射之前均需要经过准确的标定,获取绝对辐射定标系数,卫星发射入轨及在轨运行中,受发射时的振动、外部环境变化、元器件与电路系统老化等因素的影响会造成遥感器辐射特性产生变化,必须对遥感器在轨定标系数进行检测、校准,从而确保遥感器输出数据辐射质量的可靠性^[5]。国际上许多致力于卫星遥感器定标与检验的研究机构经过多年的努力,提出了多种在轨定标方法,包括基于戈壁、干盐湖、沙漠、海洋、湖泊、云层、恒星源以及人工靶标等均匀参考目标的场地定标,借助于高精度辐射定标的星载多光谱、高光谱遥感器以及机载遥感器的交叉定标以及基于全球定标场网历史数据的替代定标等,这些方法被成功地应用于 Landsat-TM、ETM+、SPOT、MODIS、EO-1、AVHRR、ASTER、SeaWiFS 等卫星遥感器的在轨定标^[6-9]。我国随着航天遥感技术的不断发展,也形成了涵盖资源(ZY)系列、风云(FY)系列、海洋系列以及高分(GF)系列卫星组成的对地观测体系,定标与检验技术也得到了一定发展,建立了实验室检校设备与基准、国家级辐射校正场地资源和在轨定标方法体系,并实现了我国自主卫星 CBERS-01/02/02B、ZY-3、ZY-1 02C、FY-1/2、GF-1 等遥感器的在轨定标^[10-13],不同的定标方法精度会受到实验条件、数据处理以及卫星遥感器本身特性的影响,特别是随着卫星系统机动性、灵活性以及发射的经济

性的提高,后续带有星上定标功能的卫星系统将更加缺乏,这将给交叉定标方法的使用带来限制,而单纯依靠定期组织星-地同步观测实验进行在轨定标已无法满足多种卫星遥感器的高频次在轨定标业务需求^[14],建立一种适合多种空间分辨率特点的卫星遥感器在轨定标方法,便捷地监测修正卫星遥感器在轨辐射定标系数变化,对于完善我国自主卫星遥感器定标技术体系和促进国产卫星遥感数据的量化应用具有重要意义。

本文讨论了利用敦煌辐射校正场历史观测数据建立基准参考来实现多源卫星遥感器长期辐射特性监测定标的可行性和可靠性。主要分 3 个部分:1)介绍了常规场地定标原理和敦煌辐射校正场基本特性,基于 1999 年以来敦煌辐射校正场历史观测资料建立多源遥感器辐射定标参考数据估算模型;2)利用上述基准数据对我国 ZY-1 02C、ZY-3 和 GF-1 等卫星搭载的光学遥感器进行辐射定标,获取各卫星遥感器的多次辐射定标系数;3)采用星地同步观测数据对上述定标结果进行验证,讨论该方法的扩展性和建立我国自动定标观测网的可行性和必要性。

2 方法模型

2.1 模型选取

卫星遥感器的在轨替代定标是借助外界设备或手段获取遥感器入瞳处等效辐亮度信息,并结合该输入能量下的遥感器输出数值信息,推算出待定标遥感器各光谱波段的辐射响应特性,即绝对辐射定标系数。根据太阳-大气-地表-遥感器相互作用的大气辐射传输方程,遥感器对地成像过程中接收的光谱辐亮度为

$$L_s(\lambda) = \frac{1}{\pi d^2} \left\{ \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot T(\theta_s)}{1 - \rho_n S} [\rho(\lambda) \exp(-\tau/\mu_v) + \rho_n \cdot t_d(\theta_v)] + E_s \cdot \mu_s \cdot \rho_p \right\}, \quad (1)$$

式中 $L_s(\lambda)$ 为波长 λ 处的遥感器入瞳处辐亮度, d^2 为日地距离修正因子, E_s 为大气外太阳等效辐照度, $\mu_s = \cos \theta_s$ (θ_s 为太阳天顶角), $T(\theta_s) = \exp(-\tau/\mu_s) + t_d(\theta_s)$ 为向下方向(太阳-地表)大气散射透射率, τ 为大气光学厚度, ρ_n 为邻近目标反射率, S 为大气半球反射率, $\mu_v = \cos \theta_v$ (θ_v 是观测天底角), $\rho(\lambda)$ 为波长 λ 处目标反射率, $t_d(\theta_v)$ 为向上方向(地表-卫星)大气散射透射因子, ρ_p 为大气路径的反射率。

在假设大气垂直变化、平面平行大气以及观测

目标相对均一的条件下,对(1)式进行变化得到卫星遥感器入瞳处光谱辐亮度计算模型为

$$L_s(\lambda) = \frac{T(\lambda) \cdot \rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda) S} + L_p(\lambda), \quad (2)$$

式中 $T(\lambda) = \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)}{\pi d^2}$, 其中 $T(\theta_v) = \exp(-\tau/\mu_v) + t_d(\theta_v)$ 为向上方向(地表-卫星)大气漫射散射因子, $L_p(\lambda) = \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot \rho_p}{\pi d^2}$ 为波长 λ 处的大气路径辐亮度;而上述参数均为遥感器波段、太阳

天顶角、太阳方位角、遥感器观测天顶角、遥感器观测方位角、观测区域气溶胶类型和气溶胶光学厚度(AOD)的函数,已知场地反射率和气溶胶数据情况下,可推算出卫星遥感器观测目标区对应的入瞳处光谱辐亮度。

将卫星遥感器观测特定场地目标对应的入瞳处光谱辐亮度与自身光谱响应函数进行卷积,即可获得各波段等效辐亮度,再结合遥感器观测场地时输出的图像计数值,计算出遥感器辐射定标系数(辐射响应度)为

$$G_{\text{band}} = \frac{N_{\text{band}} - X_{\text{band}}}{L_{\text{band}}}, \quad (3)$$

式中 L_{band} 为卫星遥感器波段等效辐亮度, N_{band} 为卫星遥感器输出波段计数值, X_{band} 卫星遥感器自身偏移量,可通过地面处理系统获得, G_{band} 为卫星遥感器绝对辐射定标系数,即辐射响应度。

2.2 基准数据

2.2.1 稳定场地选择

敦煌辐射校正场是我国第一个用于卫星可见光-近红外波段遥感器在轨辐射定标的场地,位于甘肃省敦煌市以西 20 km 处,地理坐标为 40.04°~40.28°N, 94.17°~94.5°E,海拔高度为 1105~1250 m,在场区

内 20 km×20 km 大小、基本无植被覆盖的区域分别确定面积为 550 m×550 m(40°05′27.75″N, 94°23′39″E)和 10 km×10 km 的实验观测区,用于高、低空间分辨率卫星的定标和辐射校正(图 1)。敦煌辐射校正场在可见光-近红外波段的地表反射比约为 14%~25%,短波红外波段约为 30%,场区表面光学均匀性较好,反射比相对变化小于等于±2%,其中资源卫星实验场区反射比相对变化小于等于±1%,随观测视场增大(分辨率降低),光学均匀性进一步改善。基于 1999~2010 年的实测数据分析,资源卫星核心场区在 350~1250 nm 范围内的地表反射光谱的相对差异变化范围为 2.88%~6.5%,平均为 3.88%,说明该场地的地表光学特性在时间域上比较稳定(图 2)。资源卫星场区以 5 m 为间隔的各样本点对应遥感器波段等效反射率的相对差异为 0.13%(450~520 nm)、0.18%(520~590 nm)、0.20%(630~690 nm)、0.22%(770~890 nm),进一步证明了资源卫星场区较好的空间一致性。敦煌地区大气污染小,且位于沙漠带边缘,大气干燥,经多年气溶胶光学厚度和水汽含量数据统计发现,敦煌场区各年度的月平均气溶胶光学厚度变化量较小,相对

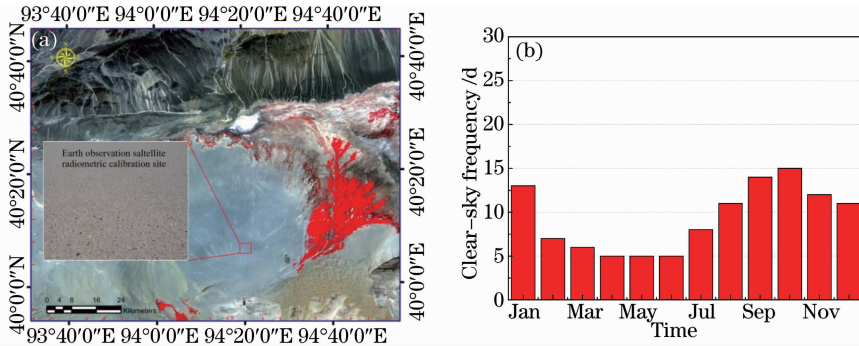


图 1 (a)敦煌辐射校正场图像;(b)月平均晴空日数

Fig. 1 (a) Image of Dunhuang site; (b) average clear-sky days every month

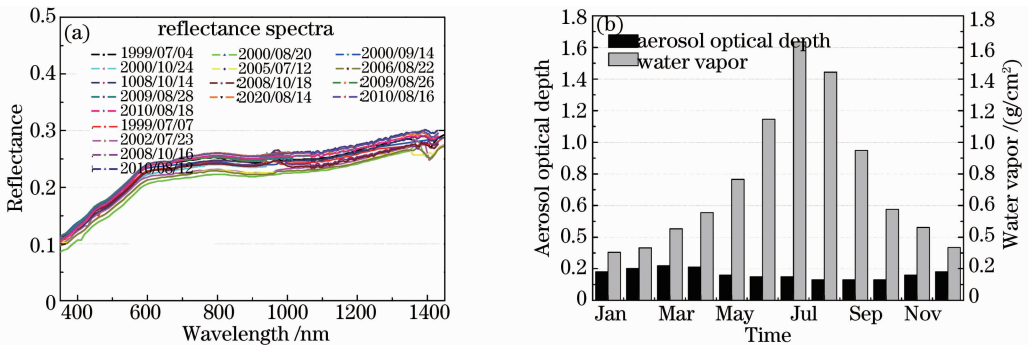


图 2 敦煌场区历史数据。(a)反射率光谱;(b)月平均气溶胶与水汽含量

Fig. 2 History data of Dunhuang site. (a) Reflectance; (b) average AOD and water vapor

比较稳定,总体上该场区的月平均气溶胶光学厚度范围为 0.13~0.22[图 2(b)],且相对稳定,全年气溶胶光学厚度小于等于 0.15 的天数占 58%,小于等于 0.25 的天数占 86%。敦煌地区月平均水汽含量变化范围为 0.31~1.58 g/cm²[图 2(b)],且各月均值随年度变化差异较小。综合以上特点,确定敦煌辐射校正场作为研究的稳定实验场地^[14]。

2.2.2 基准数据建立

选取敦煌辐射校正场资源卫星场区为参考目标,对 2000~2010 年夏秋季近 20 次外场实验获取的目标反射光谱进行处理分析,确定该稳定目标区参考光谱数据基准。依据测量仪器工作原理,计算出各次实验期间的场区光谱反射率,将历次获取的

光谱反射率的均值化处理结果作为该场区目标的参考光谱反射率基准(图 3)。经分析在我国陆地卫星遥感器多光谱波段范围内(400~1000 nm),该场区目标的地表光谱反射率的相对变化小于 1.0%。

敦煌地区大气干洁,考虑到气溶胶光学厚度的变化特点,以 2003~2010 年敦煌地区各月平均气溶胶光学厚度为参考,推算出平均气溶胶光学厚度随时间的变化趋势关系(晴空条件下),从而确定出定标时所需的气溶胶光学厚度计算模型[图 3(b)],并将模型计算的气溶胶光学厚度作为后续替代定标的参数输入,考虑到水汽含量受季节性影响较大,因此定标过程中的水汽含量以敦煌气象局大气探测数据为准。

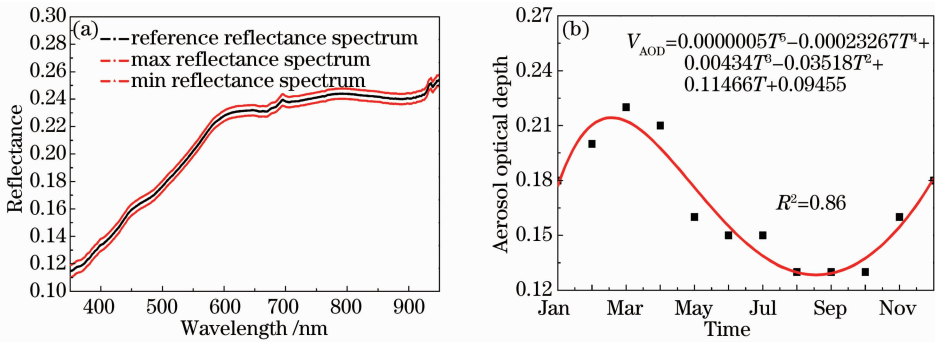


图 3 敦煌场地基准参考。(a)地表反射率光谱;(b)气溶胶光学厚度

Fig. 3 Reference data of Dunhuang site. (a) Land surface reflectance spectra; (b) AOD

3 定标结果

为分析替代定标方法的稳定性和使用精度,开展 ZY-1 02C、ZY-3 和 GF-1 卫星共 8 个多光谱遥感器进行辐射定标实验,各遥感器技术指标参数如表 1 所示。根据上述各卫星遥感器过境敦煌场区轨道预报,选择 2013 年 6 月至 8 月期间各卫星遥感器获取的敦煌场地晴空条件下影像数据与基准数据进行定标分析,各卫星遥感器的成像时间、观测几何参数

以及基于基准参考模型估算的瞬时气溶胶光学厚度如表 2 所示。

以上述过程确定的卫星遥感器成像时刻敦煌场地光谱反射率、大气气溶胶光学厚度以及观测几何等辅助参数为输入条件,采用大气辐射传输模型(Modtran)计算出各遥感器成像时刻入瞳处等效辐亮度,并结合提取的参考区域计数值信息,获得各遥感器在轨辐射定标系数结果如表 3 所示。

表 1 卫星遥感器的设计指标参数

Table 1 Sensor design parameters

Technology parameters	ZY-1 02C MSS	ZY-3 PMS	GF-1	
			PMS (two)	WFV(four)
Spectral band width /μm	Band 1	0.45~0.52	0.45~0.52	0.45~0.52
	Band 2	0.52~0.59	0.52~0.59	0.52~0.59
	Band 3	0.63~0.69	0.63~0.69	0.63~0.69
	Band 4	0.77~0.89	0.77~0.89	0.77~0.89
Spatial resolution at nadir /m	10	5.8	8	16
Width /km	60	51	70 (two)	800 (four)
Quantization /bit	8	10	10	10
Design life /a	3	5	5	5

表 2 卫星观测基准数据信息

Table 2 Information of observer and reference data

Remote sensor	Date	Solar	Solar	View	View	Predicted AOD
		zenith /($^{\circ}$)	azimuth /($^{\circ}$)	zenith /($^{\circ}$)	azimuth /($^{\circ}$)	
ZY-1 02C MSS	Jun. 22	21.52	136.69	22.37	103.76	0.142
ZY-3 PMS	Jul. 4	21.89	137.53	17.75	44.21	0.137
GF-1 PMS	1 Jun. 22	22.01	134.88	11.45	96.68	0.142
	2 Jun. 26	22.11	134.16	12.75	96.30	0.140
GF-1 WFV	1 Aug. 5	28.31	137.87	26.67	101.52	0.128
	2 Jun. 22	22.83	134.59	18.58	101.01	0.142
	3 Aug. 2	25.68	148.97	17.58	283.10	0.129
	4 Jun. 23	19.26	146.50	29.94	285.46	0.142

表 3 基于敦煌稳定场的多源遥感替代辐射定标结果

Table 3 Vicarious calibration results of multiple sensors based on pseudo-invariant Dunhuang site

Remote sensor	Radiometric calibration results - gain / [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$]			
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
ZY-1 02C MSS	—	1.6001	1.6080	1.7120
ZY-3 PMS	4.1962	4.5961	5.7616	5.3199
GF-1 PMS1	4.5084	5.6045	5.9467	5.8482
GF-1 PMS2	4.5038	5.3562	5.6630	5.5654
GF-1 WFV1	5.8514	7.1531	8.3682	7.4738
GF-1 WFV2	5.6930	7.4238	9.2565	8.4867
GF-1 WFV3	5.4894	6.2898	7.6871	7.1645
GF-1 WFV4	5.3068	6.3293	7.5801	7.6390

4 验证与讨论

任何模型及算法的建立和推广应用必须经过真实性检验,验证算法模型的可靠性和使用精度,从而确保后续输出结果的可靠性。为分析基于均匀稳定场(敦煌辐射校正场)再分析资料的多源遥感替代定标方法精度,采用直接检验、间接检验等方法对多个遥感器定标结果进行验证:1)利用2013年6月22日ZY-1 02C和2013年7月4日ZY-3卫星观测敦煌地区时的石膏场地面实测数据对本次定标结果

进行验证。通过对地面实测光谱、大气参数进行处理得到卫星成像时刻地面辅助数据,并利用辐射传输模型计算遥感器入瞳处辐亮度,以该结果为相对真值对基于定标系数计算的辐亮度进行验证(表4);2)利用2013年度星-地同步定标实验获取的定标系数对GF-1卫星定标系数进行验证(表5)。

L_{true} 为基于实测数据计算的辐亮度, $L_{predicted}$ 为基于定标系数反演的辐亮度。

表 4 ZY-1 02C 与 ZY-3 卫星定标系数验证对比结果

Table 4 Validation results of ZY-1 02C and ZY-3 calibration coefficients

Parameters		Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
ZY-1 02C	L_{true}		162.52	150.88	108.59
	$L_{predicted}$	—	157.15	152.17	116.22
	$\Delta = (L_{true} - L_{predicted}) / L_{true}$		3.31%	-0.86%	-7.02%
ZY-3	L_{true}	178.43	179.6	168.88	121.11
	$L_{predicted}$	161.25	160.47	144.03	103.63
	$\Delta = (L_{true} - L_{predicted}) / L_{true}$	9.63%	10.65%	14.71%	0.14%

通过对ZY-1 02C、ZY-3以及GF-1卫星的8个遥感器进行定标与验证分析,结果表明:1)采用类似于敦煌辐射校正场特性的大面积均匀地物目标历史资料再分析方法对任意卫星遥感器进行辐射定标是

可行的;2)基于定标结果反演的辐亮度与基于地面实测数据反演的辐亮度相对差异较小;3)在假设遥感器光谱响应函数相对稳定的前提下,分析该方法获取的GF-1卫星定标精度,发现该方法与常规星-

地同步实验定标法获取的定标系数总体一致性高于90%(表5),也进一步说明该方法的可靠性。总体而言基于稳定场再分析资料的替代定标精度满足卫

星遥感器在轨辐射性能的日常监测需要,且定标结果可指导地面处理系统进行卫星定标系数修订工作。

表5 GF-1 卫星 2013 年度外场定标与本次定标结果对比

Table 5 Result comparison of GF-1 between 2013 *in situ* calibration and this calibration

Parameters		Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
GF-1 PMS1	<i>In-situ</i> CAL gain	4.8031	5.9809	5.7208	5.3107
	$\Delta=(G_{in-situ}-G_{our})/G_{our}$	6.54%	6.72%	-3.80%	-9.19%
GF-1 PMS2	<i>In-situ</i> CAL gain	4.8263	5.6306	5.6497	5.2383
	$\Delta=(G_{in-situ}-G_{our})/G_{our}$	7.16%	5.12%	-0.23%	-5.88%
GF-1 WFV1	<i>In-situ</i> CAL gain	5.8652	7.1517	8.3642	7.4762
	$\Delta=(G_{in-situ}-G_{our})/G_{our}$	0.24%	0	0	0
GF-1 WFV2	<i>In-situ</i> CAL gain	6.2972	6.6007	7.9936	8.2713
	$\Delta=(G_{in-situ}-G_{our})/G_{our}$	10.61%	-11.09%	-13.64%	-2.54%
GF-1 WFV3	<i>In-situ</i> CAL gain	6.4267	5.8824	7.1839	7.3855
	$\Delta=(G_{in-situ}-G_{our})/G_{our}$	17.08%	-6.48%	-6.55%	3.08%
GF- WFV4	<i>In-situ</i> CAL gain	5.4975	5.6754	6.8353	6.5703
	$\Delta=(G_{in-situ}-G_{our})/G_{our}$	3.59%	-10.33%	-9.83%	-13.99%

5 结 论

随着多源卫星遥感器的不断发射,我国自主卫星遥感数据的定量化应用进入了快速发展的阶段,现有卫星辐射性能监测定标手段已难以保证后续遥感数据产品质量精度的稳定性和遥感器性能变化修订的时效性^[15]。陆地观测卫星具有空间分辨率高、时间分辨率低以及应用领域广等特点,必须针对陆地卫星遥感器研究可提高定标频次、精度和使用范围的在轨定标方法,特别是可自主运行的定标技术体系。以大面积光学特性均匀的敦煌辐射校正场为实验区,利用该场地历史实测数据和气象资料为基础,研究基于稳定场再分析资料开展多源遥感器替代定标的可行性。基于敦煌场再分析资料建立的参考基准,实现了 ZY-1 02C、ZY-3 和 GF-1 卫星多个遥感器的在轨替代定标,并利用地面实测数据和常规定标方法进行了定标系数验证分析。结果表明:采用均匀稳定的场地目标再分析资料开展后续多源遥感器替代定标精度相对可靠,可用于卫星遥感器在轨辐射性能的日常监测工作;同时也进一步证明基于稳定场地目标建立无人值守的在轨定标监测系统,实现多源卫星遥感器自动化、业务化辐射定标是可行的。

参 考 文 献

1 P M Teilet, G Fedosejevs, R P Gauthier, *et al.*. A generalized approach to the vicarious calibration of multiple Earth observation sensors using hyperspectral data [J]. *Remote Sensing of*

Environment, 2001, 77(3): 304-327.
 2 P M Teilet, D N Horler, N T O'Neill. Calibration, validation, and quality assurance in remote sensing: A new paradigm [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1997, 23(4): 401-414.
 3 Han Qijin, Fu Qiaoyan, Pan Zhiqiang, *et al.*. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(s1): 167-173.
 韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 等. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(s1): 167-173.
 4 M Dinguirard, P N Slater. Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3): 194-205.
 5 C Gyanesh, T J Hewison, X Q Wu, *et al.*. Overview of intercalibration of satellite instruments [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1056-1080.
 6 Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. *Radiometric Calibration Theory and Method of Space Optical Sensors* [M]. Beijing: China Science Press, 2013.
 顾行发, 田国良, 余涛, 等. *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.
 7 Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.*. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space borne optical remote sensors [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, (4): 117-128.
 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见光近红外通道辐射定标研究进展[J]. *遥感信息*, 2010, (4): 117-128.
 8 S L Liang. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2004.
 9 X X Xiong, B William. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(1): 69-79.
 10 C Gyanesh, J David, D L Meyer, *et al.*. Cross calibration of the landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI sensor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2821-2831.
 11 Han Qijin, Pan Zhiqiang, Wang Aichun. In-orbit radiometric calibration and quantitative application for civil remote sensing satellite payloads [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(2): 57-65.

- 韩启金, 潘志强, 王爱春. 民用遥感卫星遥感器在轨辐射定标与定量应用[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(2): 57-65.
- 12 Han Qijin, Pan Zhiqiang, Zhang Xuewen, *et al.*. The cross-calibration of GF-1 WFV and SJ-9A PMS sensors based on homogeneous land surface targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0628003.
- 韩启金, 潘志强, 张学文, 等. 基于均匀目标的 GF-1 WFV 与 SJ-9A PMS 相机交叉定标 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628003.
- 13 Xu Wenbin, Zheng Xiaobing, Yi Weining. Cross-calibration method based on hyperspectral imager Hyperion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0528002.
- 徐文斌, 郑小兵, 易维宁. 基于超光谱成像仪 Hyperion 的交叉定标[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528002.
- 14 China Remote Sensing Radiometric Calibration Site. Spectral Data Sets for Satellite Calibration Site and Typical Earth Objects [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- 中国遥感卫星辐射校正场 编著. 卫星校正场地面和典型地物波谱数据集[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- 15 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212007.
- 徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多级灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212007.

栏目编辑: 苏 岑