

基于宽动态地面目标的高分二号卫星在轨定标与评价

韩启金¹ 马灵玲² 刘 李¹ 张学文¹ 傅俏燕¹ 潘志强¹ 王爱春¹

¹中国资源卫星应用中心,北京 100094

²中国科学院光电研究院,北京 100190

摘要 为检测高分二号(GF-2)卫星发射前后辐射性能变化,获取可靠的GF-2卫星遥感器在轨定标系数,提出了基于宽动态地面目标的场地定标方法。以敦煌戈壁场为基础,重新选建涵盖高、中、低多级反射特性的定标场,并借助反射率基法和地面观测试验,实现了GF-2卫星首次在轨辐射定标。以发射前实验室定标结果为参考,讨论GF-2卫星定标系数变化及影响因素。结果表明:1) GF-2卫星发射前后系统自身偏移量均接近于零,且相对稳定;而辐射响应特性发生了一定变化;2) 采用多场地定标获取的在轨定标系数能更好表征GF-2卫星在轨辐射特性,该定标系数可作为后续定量产品反演和系统性能评估的基础。

关键词 遥感; 高分二号卫星; 遥感器; 辐射定标; 定标场

中图分类号 TP722.4; TP721.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0728003

On-Orbit Calibration and Evaluation of GF-2 Satellite Based on Wide Dynamic Ground Target

Han Qijin¹ Ma Lingling² Liu Li¹ Zhang Xuewen¹ Fu Qiaoyan¹
Pan Zhiqiang¹ Wang Aichun¹

¹China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

²Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract To validate the radiometric performance changing of GF-2 satellite, and obtain reliable on-orbit calibration coefficients of GF-2 sensors, an in-situ calibration methodology based on wide dynamic ground target is presented. Based on Dunhuang Gobi site, a test site including high, middle, and low reflective characteristics is re-selected and established. After that, the first on-orbit calibration for GF-2 is performed using the reflectance-based method and field measurement campaign. At last, the calibration coefficients changes and influence by comparing with prelaunch laboratory calibration results is discussed. The results indicate that: 1) the system offset of GF-2 itself is close to zero and relatively stable, while the radiometric responsivity has changed; 2) the calibration coefficients by using multi-site calibration method can better characterize on-orbit performance of GF-2 compared to the prelaunch lab calibration; the new calibration coefficients can be used for quantitative products retrieval and systems performance evaluation.

Key words remote sensing; GF-2 satellite; sensor; radiometric calibration; calibration test site

OCIS codes 280.4788; 040.1520; 120.0280; 120.4640

1 引 言

陆地卫星遥感信息定量应用对于我国经济社会高速发展、环境保护、减灾防灾和信息安全具有不可替代的作用,近年来,我国相继发射了十余颗陆地观测卫星^[1],各种卫星载荷的遥感数据量已达到国际前列,但定量化应用水平和国际先进水平相比还存在很大的差距。作为实现遥感数据量化的必需环节和重要基础,辐射定标已成为制约我国卫星遥感规模化、业务化应用的技术瓶颈。随着我国高分系列卫星的相继发

收稿日期: 2014-12-26; 修订日期: 2015-03-09

基金项目: 国家863计划课题(2012AA12A302),国家自然科学基金(41401424)

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方面的研究。

E-mail: cresda_hanjin@126.com

射,高分卫星的后续应用对辐射定标的精度以及长期稳定性都提出了更高的要求,尤其是高分二号(GF-2)卫星的成功发射,将我国陆地卫星遥感带入了“亚米级”时代,也对在轨定标的方法和精度提出了新的挑战。解决现有定标方法的不足,提高卫星在轨定标结果的稳定性和精度对于充分发挥高分二号卫星的综合效能,加速国产卫星遥感定量化应用具有重要意义。

虽然作为实验室定标的重点工作,包括绝对辐射定标系数在内卫星遥感器的性能特点在发射之前均需经过准确的标定,但卫星发射时的振动、在轨运行环境变化、自身元器件系统老化等因素常常会引起成像系统性能衰减。为确保遥感产品辐射质量一致性和可靠性,必须对上述衰减引起的辐射性能变化重新进行在轨定标^[1]。目前卫星在轨定标包括星上定标、交叉定标和场地定标,其中星上定标受限于元器件水平、卫星平台稳定性以及电路系统等众多因素,且由于空间辐射基准不可避免的存在自身性能变化,在外层空间环境下难以准确溯源。为弥补星上定标系统的不足,研究人员提出了多种替代定标方法,包括基于戈壁、干盐湖、沙漠、海洋、湖泊、云层、以及人工靶标等参考目标的场地定标,借助于高精度辐射定标的星载/机载多光谱、高光谱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,这些方法多年来已成功应用于 Landsat-TM/ETM+、SPOT、MODIS、EO-1、AVHRR、ASTER、SeaWiFS 等卫星遥感器的在轨定标工作^[3-8]。近期发射的卫星通过星上定标系统以及地面自动监测场定标系数,在轨绝对辐射定标精度达到了 2%~3%,如 Landsat8-OLI^[9],同时具备着长期定标精度稳定性的技术特点。

我国自 20 世纪 90 年代以来,相继建设了敦煌和青海湖两个国家级辐射定标场,并针对 CBERS-01/02/02B、HJ-1A/B、ZY-102C、ZY-3、GF-1 和 FY-1/2/3C 等多颗卫星进行了在轨辐射定标,完成了各卫星遥感器在轨辐射性能的监测和及时修订^[10-13]。同时也采用交叉定标等手段,以 Landsat-TM/ETM+、MODIS、ASTER 等遥感器为参照基准,对 CBERS-01/02、HJ-1A/B、ZY-102C、FY-2C/3C、GF-1 等卫星遥感器进行在轨定标^[14],但交叉定标的精度依赖于参考遥感器的精度、两个遥感器对同一目标同时观测以及相互间光谱、几何的匹配精度,由于参考遥感器、样区基础数据等条件限制,使得该方法在用于陆地卫星遥感器定标时,定标的时效性和精度难以保证^[15]。截止到目前,我国陆地卫星遥感器的在轨定标工作仍主要基于敦煌场地同步观测试验的方法实现,但由于场地光谱特性相对单一,必须在确定卫星遥感器自身偏移量的前提下实现辐射定标,难以确保定标系数的可靠性和稳定性^[16],亟需开展卫星遥感器在轨定标新方法的研究,以解决现有定标方法的不足,从而提高辐射定标系数的精度和适用范围。

本文针对 GF-2 卫星遥感器性能特点,以我国敦煌定标场为基础,借助人工靶标和周边均匀地物目标建立涵盖高、中、低多级反射特性的定标场,并通过地面同步观测手段实现 GF-2 卫星发射后首次在轨定标。本文从以下几方面介绍:1) GF-2 卫星相机的指标参数与地面参照目标的选取;2) 定标模型确定和星地同步观测试验数据测量;3) GF-2 卫星定标数据处理及结果计算;4) GF-2 卫星发射前后辐射响应特性分析与讨论。

2 遥感器与定标模型

2.1 遥感器介绍

2014 年 8 月 19 日成功发射的 GF-2 卫星,是我国首颗空间分辨率优于 1 m 的民用陆地卫星,其选择了 632km 的太阳同步回归冻结轨道,具备侧摆 $\pm 35^\circ$ 的能力,该星搭载了 2 台覆盖多个波段(Panchromatic-P:0.45~0.90 μm ; Blue-B1:0.45~0.52 μm ; Green-B2:0.52~0.59 μm ; Red-B3:0.63~0.69 μm ; NIR-B4:0.77~0.89 μm)的 1 m 全色/4 m 多光谱相机(PMS),相机采用 10 bit 量化等级,拼接幅宽大于 45 km,GF-2 卫星 PMS 相机光谱响应特性如图 1 所示。

2.2 定标场与方法

以敦煌定标场为中等反射特性目标,选择其北部约 30 km 处的石膏区为高反射目标,并在核心场区南侧 300 m 处人工布设 160 m \times 160 m 的黑色靶标作为低反射目标,将上述三个区域作为 GF-2 卫星场地定标的地面参考目标。敦煌定标场位于我国甘肃省敦煌市以西 20 km 的戈壁区,其中核心区面积为 500 m \times 500 m ($40^\circ 05' 27.75''\text{N}$, $94^\circ 23' 39''\text{E}$),海拔高度 1220 m。该场地光谱特征均一稳定,整个选区可见光-近红外波段的光谱反射率相对差异小于 1%,详细介绍见文献[12]。位于核心区北部的石膏区也具有较好的光谱稳定性,该

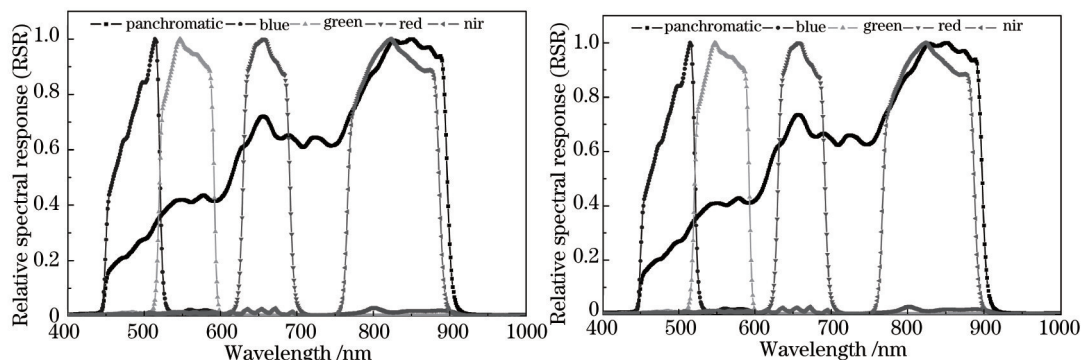


图1 高分二号卫星 PMS 相机光谱响应曲线。(a) PMS1; (b) PMS2

Fig.1 Relative spectral response of PMS sensor onboard GF-2. (a) PMS1; (b) PMS2

选区的光谱相对差异小于 1.2%,人工黑色靶标采用双层铺设方案,光谱特性完全满足卫星在轨定标的选取要求,各场地布局如图 2 所示。

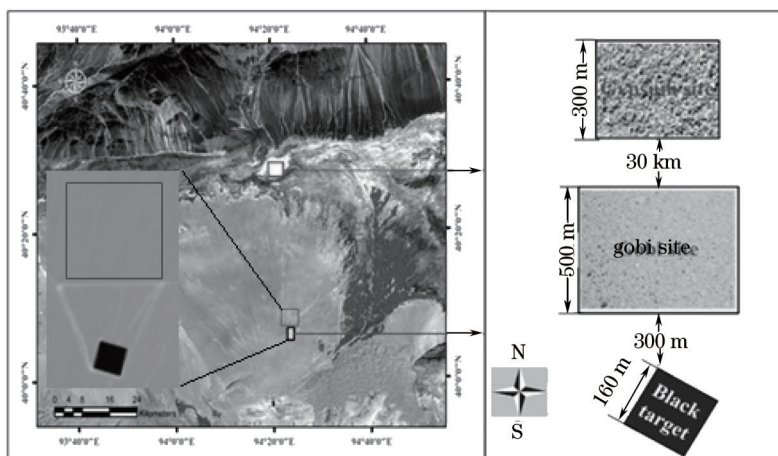


图2 多级辐射定标场

Fig.2 Multiple radiometric calibration test site

以人工黑色靶标代替自然水体目标,作为遥感器低端响应定标的参考目标,解决了光谱均匀性和不稳定测量的问题,结合高、中反射特性地物目标建立宽动态范围的地面参考基准,实现宽动态的 GF-2 卫星在轨辐射定标。具体过程如下:GF-2 卫星过境高、中、低三级反射地面目标时,借助多套观测仪器同步获取各目标区的光谱反射率、气溶胶光学厚度等辅助参数,借助大气传输模型推算出卫星成像时刻各场地对应的大气顶层光谱辐亮度,结合 GF-2 卫星遥感器光谱响应函数获取各波段入瞳处等效辐亮度,再与 GF-2 卫星同步输出图像的数字计数值联合推算出定标系数,该方法解决了单一场地定标存在的问题,可有效提高定标结果的稳定性和精度^[17]。

3 结果与讨论

3.1 定标结果

3.1.1 场地光谱处理

GF-2 卫星 PMS 相机在轨场地定标试验,分别于 2014 年 9 月 2 日和 17 日获取了地面同步观测数据。场地反射率采用地物光谱仪和反射特性已知的漫反射参考板测算,在 GF-2 卫星过境前后 30 min,对石膏场、戈壁场和靶标场进行反射率同步测量,测量仪器均为 2 台 SVC 地物光谱仪(其中戈壁和靶标场共用 1 台)。为确保地面数据测量的准确性和可靠性,分别以 3~5 m 为间隔,沿着 GF-2 卫星轨道方向进行测量,每隔 5 个采样点采集 2 次参考板光谱,每个采样点各测量 2 次,试验时借助自动遥控小汽车架设光谱仪进行测量,保证了地面数据获取的时效性,并在 GF-2 卫星过境时刻进行加密测量。各场地目标测量数据处理后得到可见-近红外波段的平均反射率光谱曲线如图 3 所示,可见,三个场地的反射特性覆盖的动态范围较大,且光谱平

滑度较高。最后,将场地平均光谱反射率与PMS相机各波段光谱响应函数进行卷积,得到相应的等效反射率。

$$\rho_r(\lambda) = \frac{v_r(\lambda)}{v_t(\lambda)} \cdot \rho_{brf}(\lambda), \quad (1)$$

$$\rho_c(\lambda_i) = \frac{\int \overline{\rho_r(\lambda)} \cdot f_i(\lambda) d\lambda}{\int f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中 $\rho_r(\lambda)$ 为目标光谱反射率; $v_r(\lambda)$ 和 $v_t(\lambda)$ 为光谱仪测量目标和参考板时对应输出信号值; $\rho_{brf}(\lambda)$ 为测量角度下参考板反射比因子,即BRF值; $\rho_c(\lambda_i)$ 为PMS相机波段等效反射率; $\overline{\rho_r(\lambda)}$ 为目标平均光谱反射率; $f_i(\lambda)$ 为PMS相机的波段光谱响应函数。

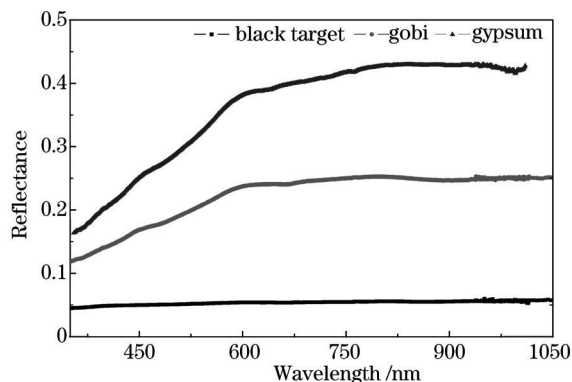


图3 GF-2卫星定标地面宽动态参照目标平均光谱反射率

Fig.3 Mean spectral reflectance of GF-2 calibration test site

3.1.2 大气参数处理

场地光谱同步观测当天,采用大气探空雷达进行实时大气温湿压廓线测量(图4),利用太阳光度计CE318进行大气参数测量,并依据气溶胶反演原理,采用440 nm和870 nm两个波段的气溶胶光学厚度推算Angstrom系数 α 和大气浑浊系数 β ,从而导出550 nm波长处的气溶胶光学厚度(图5)。

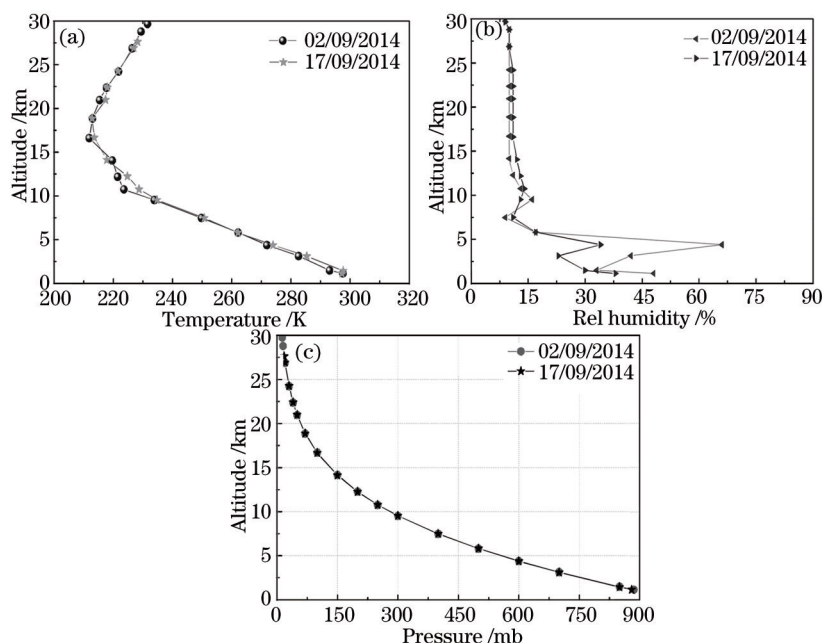


图4 大气廓线。(a) 温度;(b) 相对湿度;(c) 气压

Fig.4 Atmosphere profile. (a) Temperature; (b) relative humidity; (c) pressure

3.1.3 图像计数值提取

GF-2卫星同步图像对应计数值的提取影响定标系数计算的可靠性,为确保图像计数值的准确性,分别

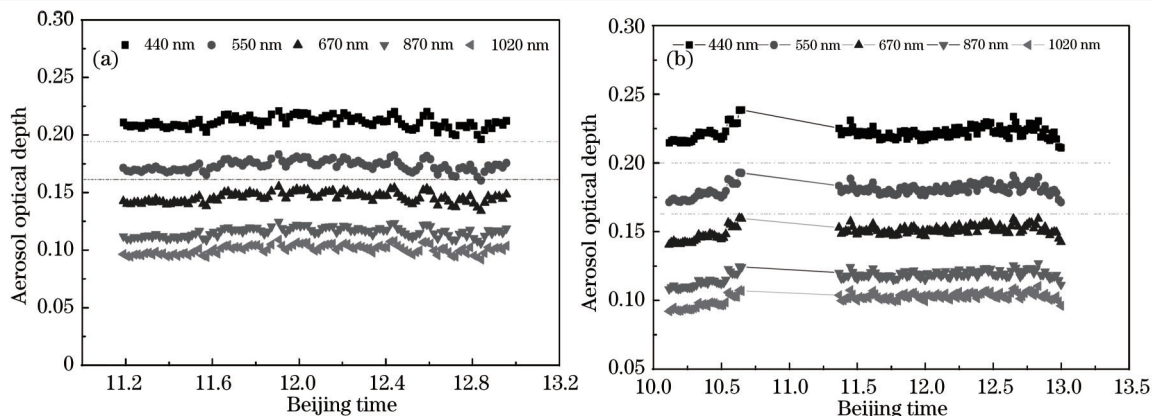


图5 瞬时气溶胶光学厚度。(a) 2014/09/02; (b) 2014/09/17

Fig.5 Aerosol optical depth. (a) 2014/09/02; (b) 2014/09/17

对石膏场、戈壁场和人工靶标区域同步图像进行处理。选取的图像是经过地面系统相对辐射校正处理的1级产品(实现了相同输入信号情况下输出计数值的一致性校准),且上述3个场地的均匀性相对较好。针对GF-2卫星图像全色1 m/多光谱4 m的空间分辨率特点,分别取各场区中间约100 m×100 m的区域进行波段计数值的提取,并将各区域的平均波段计数值作为后续定标系数计算的基础,经分析各场区提取区域的图像波段计数值相对差异均小于1.5%。

3.1.4 定标系数计算

综合上述数据处理得到的各场地等效反射率、550 nm处瞬时气溶胶光学厚度和大气温湿压廓线,在考虑GF-2卫星观测各场地对应的成像几何等条件下(表1),借助辐射传输模型(PcModWin5.2)推出GF-2卫星PMS相机各波段大气顶层等效辐亮度,最后结合同步图像输出的波段计数值信息基于最小二乘拟合的方法获得GF-2卫星PMS相机在轨定标系数(图6、表2)。

表1 GF-2卫星PMS相机观测几何与550nm处气溶胶光学厚度

Table 1 Observing parameters of GF-2 PMS and AOD at 550nm

Sensors	Date	Test sites	Solar zenith(°)	Solar azimuth(°)	View zenith(°)	View azimuth(°)	AOD /VIS km
PMS2	2014/09/02	Gypsum	51.28	155.17	13.11	283.25	0.1563
		Gobi, black target	54.55	150.32	9.11	283.60	/50.75
PMS1	2014/09/17	Gypsum	49.63	157.33	15.23	282.81	0.2553
		Gobi, black target	49.93	157.02	15.23	282.74	/30.11

表2 GF-2卫星PMS相机在轨定标系数

Table 2 On-orbit calibration coefficients of GF-2 PMS

Sensors	On-orbit calibration coefficients	Pan	Band1	Band2	Band3	Band4
PMS1	$g_{ain} / (W \cdot m^{-2} \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	0.1630	0.1585	0.1883	0.1740	0.1897
	o_{ffset}	-0.6077	-0.8765	-0.9742	-0.7652	-0.7233
PMS2	$g_{ain} / (W \cdot m^{-2} \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	0.1823	0.1748	0.1817	0.1741	0.1975
	o_{ffset}	0.1654	-0.5930	-0.2717	-0.2879	-0.2773

GF-2卫星计数值与辐亮度转换公式为: $L = g_{ain} \cdot D_N + o_{ffset}$, L 为GF-2卫星PMS相机波段等效辐亮度, g_{ain} 和 o_{ffset} 为PMS相机绝对辐射定标系数(定标斜率和定标截距), D_N 为GF-2卫星PMS相机对应波段计数值。

3.2 讨 论

GF-2卫星已在轨运行近1个月,开展在轨辐射定标可检测修订在轨运行状态下的辐射响应特性。为进一步确定GF-2卫星PMS相机在轨辐射响应特性,以发射前实验室定标结果为参考(表3),通过对比GF-2卫星PMS相机发射前后定标结果,分析GF-2卫星的辐射响应稳定性和系统可靠性。由发射前实验室定标结果可见:GF-2卫星PMS相机具有线性辐射响应特点(图7),且在遥感器的整体系统暗噪声信号较小,在无辐射信号输入情况下,自身辐射偏移量均小于1。

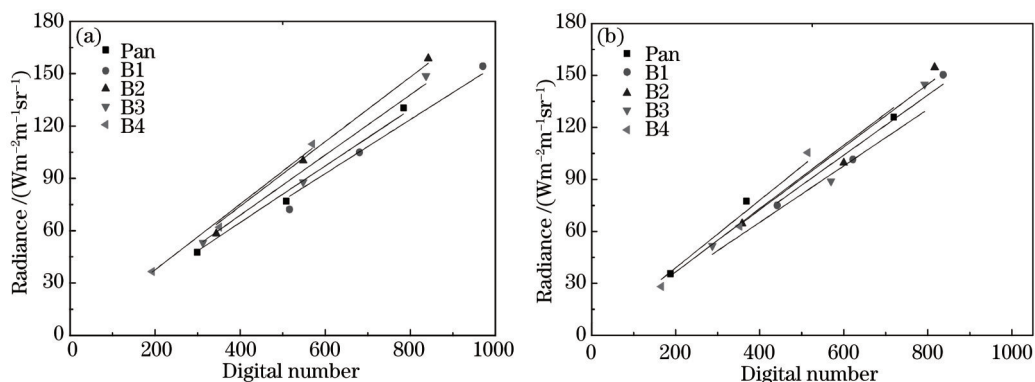


图 6 GF-2 卫星在轨辐射定标。(a) PMS1; (b) PMS2

Fig.6 In-orbit calibration results of GF-2. (a) PMS1; (b)PMS2

表 3 GF-2 卫星 PMS 相机发射前定标系数

Table 3 Pre-launch calibration coefficients of GF-2 PMS

Sensors	Pre-launch calibration coefficients	Pan	Band1	Band2	Band3	Band4
PMS1	$g_{ain} / (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	0.1607	0.1438	0.1711	0.1700	0.1894
	o_{ffset}	0.3921	0.6958	0.7135	0.5520	0.5201
PMS2	$g_{ain} / (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	0.1957	0.1708	0.1731	0.1794	0.1732
	o_{ffset}	0.1045	-0.1977	0.4266	0.0259	0.3854

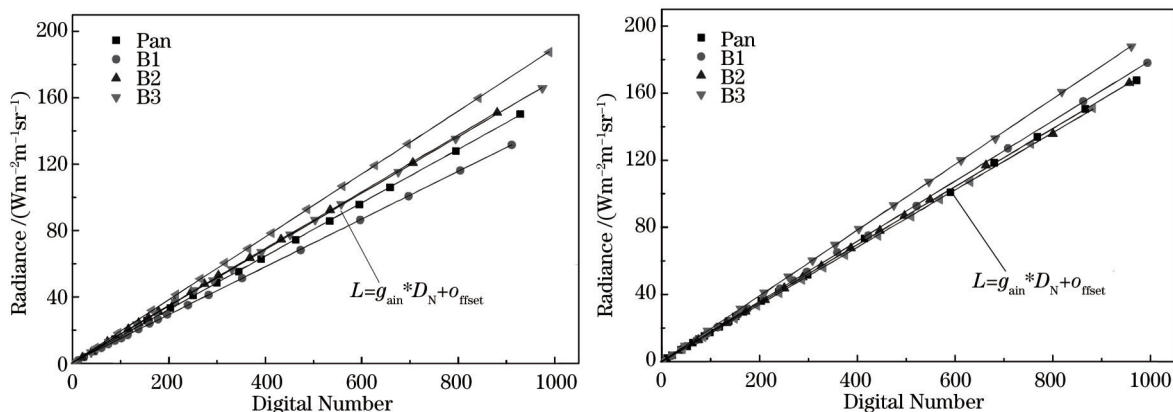


图 7 GF-2 卫星发射前实验室定标。(a) PMS1; (b) PMS2

Fig.7 Pre-launch laboratory calibration results of GF-2. (a) PMS1; (b) PMS2

卫星遥感器自身偏移量是一段时间内系统暗噪声的总体表现,依据 GF-2 卫星发射前后辐射定标系数偏移量差异大小,可认为 GF-2 卫星 PMS 相机的自身系统暗噪声处于稳定状态。而 GF-2 卫星发射后在轨辐射响应度与发射前实验室定标相比产生了一定变化(表 4),这与国际上许多研究成果的结论相一致,即卫星光学遥感器发射前后辐射响应特性会产生变化,且发射运行初期的衰减量最大,并逐渐平稳。GF-2 卫星发射前后辐射定标系数变化原因分析如下: 1) GF-2 卫星 PMS 相机的发射前实验室定标环境为模拟状态,而在轨定标过程中卫星处于太空运行状态,发射前后卫星工作环境、系统稳定性等条件差异可能引起卫星系统辐射响应特性的变化; 2) 卫星遥感器发射后在轨测试调整阶段,常常因为外部温度聚变、平台姿态的以及成像模式的频繁调整引起电荷耦合元件(CCD)器件自身响应特性波动,从而造成定标系数的变化; 3) 卫星实验室定标采用模拟光源,而在轨定标采用场地反射的太阳光源,并经过了大气的多重作用,不同光源间的色温以及能量分布差异可能引起定标结果的偏差。GF-2 卫星发射前后的辐射响应特性差异也进一步说明发射后再定标的重要性和必要性。

表 4 GF-2 卫星 PMS 相机发射前与在轨定标系数对比

Table 4 Comparison between pre-launch and on-orbit calibration of GF-2 PMS

Sensors	Relative deviation $\Delta = (g_{in-orbit} - g_{pre})/g_{pre}$				
	Pan	band1	band2	band3	band4
PMS1	1.43%	10.22%	10.05%	2.35%	0.16%
PMS2	-6.85%	2.34%	4.97%	-2.95%	14.03%

4 结 论

GF-2 卫星自发射以来已在轨运行近 1 个月,经在轨参数优化调整目前状态已正式确定,卫星发射时振动、发射前后工作环境变化以及系统平台状态波动等影响,难免引起卫星遥感辐射响应特性即定标系数的变化,有必要借助外部手段对 GF-2 卫星遥感器进行发射后再定标,从而修正发射前实验室定标系数,以满足后续该卫星遥感数据的定量化应用需要。为此以现有敦煌辐射校正场为基础,通过建立涵盖高、中、低多种反射特性的替代场地目标,借助多场地星地同步观测试验数据,实现了 GF-2 卫星遥感器的发射后在轨辐射定标。进一步地,以 GF-2 卫星实验室定标结果为基准检验 GF-2 卫星在轨辐射性能,并讨论了引起辐射定标系数变化的原因。结果表明:借助多种反射特性的多场地辐射定标方法可同时获取卫星遥感器在轨定标系数(辐射响应度和偏移量),GF-2 卫星系统辐射性能相对稳定,其中系统暗噪声引起的辐射偏移量基本恒定,而发射后的辐射响应度发生了一定变化,进一步说明了对发射前实验室定标结果进行修订的必要性和重要性。基于人工靶标与自然场地相结合的宽动态地面目标实现了 GF-2 卫星的在轨辐射定标,获取了完整的 GF-2 卫星在轨辐射定标系数,后续有必要进一步检验分析基于宽动态地面目标的在轨定标结果的准确性和可靠性,并考虑基于包头北方综合验证场多级灰度人工固定靶标开展高分卫星的在轨辐射定标性能检测,以为后续高分系列卫星的在轨业务化场地定标奠定基础。研究结果可为 GF-2 卫星遥感数据的定量产品反演和系统性能评估提供依据。

参 考 文 献

- 1 Xu Wen. Current situation and considerations on the strategic development of China's land observation satellites[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2011, 41(s): 1-9.
徐 文. 我国陆地观测卫星现状及发展战略思考[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(s): 1-9.
- 2 S L Liang. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- 3 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.
- 4 G Chander, T J Hewison, N Fox, *et al.*. Overview of intercalibration of satellite instruments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1056-1080.
- 5 B L Markham, D L Helder. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: a review[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 30-40.
- 6 P M Teilet, D L Helder, B L Markham, *et al.*. A lifetime radiometric calibration record for the Landsat Thematic Mapper[C]. *Proceedings of the 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing*, 2001, 17-25.
- 7 N Mishra, D Helder, A Angal, *et al.*. Absolute calibration of optical satellite sensors using Libya 4 pseudo invariant calibration site[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1327-1346.
- 8 K G Karlsson, E Johansson. Multi-sensor calibration studies of AVHRR-heritage channel radiances using the simultaneous nadir observation approach[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 1845-1862.
- 9 B Markham, J Barsi, G Kvaran, *et al.*. Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12275-12308.
- 10 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.
- 11 Han Qijin, Fu Qiaoyan, Zhang Xuewen, *et al.*. High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1707-1714.
韩启金, 傅俏燕, 张学文, 等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1707-1714.
- 12 Han Qijin, Liu Li, Fu Qiaoyan, *et al.*. Vicarious calibration of multiple sensors based on reanalysis data of pseudo-invariant site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1128002.
韩启金, 刘 李, 傅俏燕, 等. 基于稳定场地再分析资料的多源遥感器替代定标[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1128002
- 13 Han Qijin, Fu Qiaoyan, Zhang Xuewen, *et al.*. Validation and analysis of in-flight radiation properties of CCD camera on HJ-1A/B satellite[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 29-36.

- 韩启金,傅俏燕,张学文,等. HJ-1A/B星 CCD相机在轨辐射性能检测分析[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 29-36.
- 14 Gu Xingfa, Tian Guliang, 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.
- 15 Han Qijin, Pan Zhiqiang, Zhang Xuewen, *et al.*. 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-1WFV与SJ-9A PMS相机交叉定标[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628003.
- 16 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近红外通道辐射定标研究进展[J]. 遥感信息, 2010, 4: 117-128.
- 17 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0212007.
- 徐伟伟,张黎明,杨本永,等. 基于多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: 刘丰瑞