

文章编号 1004-924X(2014)07-1707-08

高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标

韩启金*, 傅俏燕, 张学文, 刘 李
(中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要:为实现高分一号卫星宽视场成像仪的实时辐射定标,准确获取成像仪在轨暗电流噪声引起的偏移量信息,提出了高频次辐射定标方法,并分析了方法的可靠性和测算精度。介绍了卫星遥感器在轨辐射定标原理。以敦煌辐射校正场为实验区,利用该场地历史光谱数据和实时气象观测数据确定了高频次定标的基准。基于成像仪夜间大面积海洋场景数据测算了偏移量信息,即在无辐射能量输入的条件下,测算成像仪自身暗电流噪声引起的输出数值。然后,利用地面参考基准数据和偏移量信息,实现了高分一号卫星宽视场成像仪的在轨定标。最后,分析和检验了高频次定标方法的不确定性和定标结果的可靠性。结果表明:高分一号卫星宽视场成像仪高频次定标的不确定度小于5.3%;基于该定标结果获取的辐亮度产品与基于官方定标结果获取的辐亮度总体相对偏差小于5.6%;基于夜间海洋场景计算的定标截距(即偏移量)更接近于理论设计值。该方法可用于高分一号卫星宽视场成像仪的在轨定标和暗电流噪声定期检测。

关键词:高分一号卫星;宽视场成像仪;偏移量;辐射定标

中图分类号: TP722.4; TP731 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1707

High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite

HAN Qi-jin*, FU Qiao-yan, ZHANG Xue-wen, LIU Li

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

* Corresponding author, E-mail: cresda_hanjin@126.com

Abstract: To realize real-time radiometric calibration of a wide field-of-view sensor on the GF-1 satellite and to obtain offset information caused by dark-noise signals of the WFV sensor, a high-frequency calibration method was established and the reliability and precision of this method were researched and analyzed. Firstly, the in-flight radiometric calibration theory was introduced, and the reference benchmark of calibration data was established by using historical spectral reflectance data and real-time atmosphere profiles of Dunhuang test site. The offset was calculated based on a nighttime offing observing image, which is the digital number signal output from the sensor in the condition of naught radiance input. Then the WFV sensor of GF-1 satellite was calibrated by using the reference data from ground and the offsets prepared. Finally, the uncertainty of this method and accuracy of calibration results were analyzed and validated. Experimental results indicate that the uncertainty of high-frequency calibration of WFV sensor is less than 5.3%, and the difference between radiance based on high-frequency calibration coefficients and radiance with official

收稿日期:2013-10-28;修订日期:2013-12-10.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA12A302)

promulgation publicized results is lower than 5.6%. The offset, calibration intercept, calculated with nighttime sea image accords with the theoretical design value, meanwhile, the calibration method can satisfy the requirement of the in-flight calibration and dark-noise detection of the WFV sensor on GF-1 satellite periodically.

Key words: GF-1 satellite; wide field-of-view sensor; offset; radiometric calibration

1 引言

随着地球科学理论研究的深入以及数据处理技术的快速革新,遥感数据的应用不断向多元化、自动化和定量化方向发展。但是与卫星获取数据的能力相比,遥感数据的处理分析、产品质量以及对遥感数据信息提取的能力却远远不足,已成为制约遥感发展的瓶颈^[1]。其中,绝对辐射定标作为遥感数据定量化应用的前提和基础,是遥感数据由定性走向定量、由基础制图走向深入应用的关键。目前,实时准确的在轨辐射特性的检测和标定已成为遥感技术领域要重点解决的技术问题^[2]。

卫星在轨运行过程中,定标结果会随着传感器周围的太空环境及其自身环境,如真空环境、太空能量粒子轰击、透光片透射系数和光学响应、电子元器件、电路系统的缓慢老化等的变化而改变。而卫星传感器因受系统链路响应、性能及环境的影响,在无信号输入情况下也会产生一定的能量信号输出,即暗电流或暗噪声^[3]。卫星在轨辐射定标是有效修订定标结果和检测传感器在轨暗电流噪声的有效手段^[4]。目前,卫星传感器在轨辐射定标方法主要有星上定标、交叉定标以及场地定标等^[5-6],但受卫星供电、重量和空间的限制,大多数卫星的可见光-近红外通道不具备星上定标能力,而是采用交叉定标和场地定标等方法获得在轨定标系数。其中,交叉定标是借助于高精度卫星传感器进行卫星传感器的在轨定标,其源于交叉卫星间的时间差以及定标参考区域的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)效应的主要误差很难消除;而场地定标因不受卫星系统设计的限制而成为卫星传感器在轨辐射定标的主要手段。近年来,各国研究人员提出了基于多种稳定目标,如海洋、沙漠、云、雪、干涸的湖、冰壳和恒星源等的场地定标方法,并成功地将该方法应用于

Landsat、SPOT、IKONOS、POLDER、MODIS、CBERS 和 FY 等^[7-10]卫星传感器的辐射定标中;但该方法常常需要开展大型的星-地同步观测试验,耗费大量的人力、物力和财力,同时其使用频次和精度受场地种类、数量以及空间分布等因素的影响,无法依靠单一种类的定标场地来综合定标卫星传感器的辐射响应特性和偏移量。因此,建立一种脱离大型同步观测试验,且不受场地种类、数量等条件限制的高频次实时定标方法,对后续高分卫星传感器在轨辐射性能监测校正以及遥感数据的高精度定量化应用具有重要意义。

高分一号(GF-1)卫星是我国高分辨率对地观测系统的首发星,星上搭载了 4 台幅宽大于 200 km 的 16 m 空间分辨率宽视场(Wide Field of View, WFV)成像仪,可成功获取视场拼接幅宽大于 800 km 的对地观测遥感数据,为各种定量化应用提供有效的数据源。为保证 GF-1 卫星 WFV 成像仪获取的辐亮度产品的质量精度,本文针对常规定标方法的局限性和卫星传感器在轨暗电流噪声检测的不便性,提出了一种分别定标 WFV 成像仪的辐射响应特性(即定标斜率)及其本身暗电流等因素对应辐射量(定标截距/偏移量)的在轨定标新方法,基于实验数据实现了 GF-1 卫星 WFV 成像仪的在轨辐射定标,并对定标系数进行了检验分析。最后,对高频次实时定标方法的不确定性和适用性进行了讨论。

2 辐射定标原理

卫星传感器成像时,可见光-近红外通道接收的入瞳处辐射能量主要包括 3 个部分:太阳反射通道能量中未到达地面经大气吸收和散射而到达传感器视场的辐射;太阳直射及天空漫射经大气到达地面,被地面目标反射再经过大气达到传感器视场的辐射;大气-背景经过单次及多次散射耦合产生的辐射^[11]。在假设大气垂直变化和平面平行大气的条件下,对于光学反射特性相对均匀的大面积目

标,卫星传感器接收的入瞳处辐亮度为:

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

式中: $L_s(\lambda)$ 是波长 λ 处的传感器入瞳处辐亮度, d^2 是日地距离修正因子, E_s 是大气外太阳光谱辐照度, $\mu_s = \cos \theta_s$ (θ_s 是太阳天顶角), $T(\theta_s) = e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s)$ 是向下方向(太阳到地面)的大气散射透过率, τ 是大气光学厚度, ρ_n 是目标邻近区地表反射率, S 是大气半球反照率, θ_v 是观测天底角, $\mu_v = \cos \theta_v$, $\rho(\lambda)$ 是波长 λ 处的目标反射率, $t_d(\theta_v)$ 是向上方向(地面到卫星)的大气透射散射因子, ρ_p 是大气路径的反射率。

考虑卫星传感器通道光谱的响应特性,可计算出卫星传感器通道 i 的入瞳处等效辐亮度:

$$L_e(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_s(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

其中: λ_i 是卫星传感器通道 i 的有效波长, $L_e(\lambda_i)$ 是卫星传感器通道 i 的等效辐亮度, $f_i(\lambda)$ 是卫星传感器通道 i 的光谱响应函数, λ_{\min} 是通道 i 的光谱响应的最小波长, λ_{\max} 是通道 i 的光谱响应的最大波长。

卫星传感器的辐射探测性能具有线性移不变特性,当已知 1 组卫星传感器通道入瞳处的等效辐亮度和观测计数值 DN 以及自身暗电流噪声引起的偏移量信息 (DN_0), 或者 2 组传感器通道入瞳处的等效辐亮度和观测计数值 DN 时,即可依据式(3)推导出卫星传感器通道的绝对辐射定标系数。

$$L_e(\lambda_i) = \text{Gain} \cdot (DN_i - DN_0), \quad (3)$$

其中: Gain 为定标斜率; DN_i 为卫星传感器通道 i 入瞳处,辐亮度为 $L_e(\lambda_i)$ 时的观测计数值; DN_0 为定标截距(或偏移量),表示卫星传感器本身暗电流等因素引起的偏移量。实际工作中,通常用 Bias 表示定标截距,即 $\text{Bias} = -\text{Gain} \cdot DN_0$ 。

3 实验资料获取与处理

3.1 实验区与研究数据

敦煌辐射校正场是我国 95 期间建立的第一个国家级光学辐射校正场。自 1999 年起,国内许

多科研院所开始对该场地的地表光学特性、场区周边大气光学特性以及区域气候特点进行观测研究。该地区大气干洁、水汽含量低、场地光谱发射特性均一,地表光谱反射率在 350~1 000 nm 波段相对稳定^[12],且周边配备有实时的大气特性参数观测系统,可作为卫星传感器实时辐射校正的有效地面靶标,如图 1 所示。

依据 GF-1 卫星各 WFV 成像仪的轨道预报参数和覆盖实验场情况,本文分别于 2013 年 6 月 22 日、23 日和 26 日成功获取了 GF-1 卫星 WFV2 相机、WFV4 相机和 WFV3 相机过境实验场区的晴空影像,并安排 GF-1 卫星 WFV 成像仪夜间对大面积海洋场景目标进行成像(见图 2),获得了 WFV 成像仪无能量输入条件下的输出影像数据。另外,还收集了实验场的历史光谱数据以及卫星成像日期的大气光学、实时大气状态数据等(当地气象局提供)。

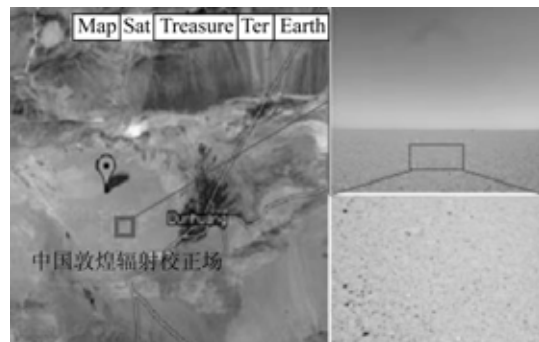


图 1 敦煌辐射校正场观测图像
Fig. 1 Image of Dunhuang radiometric calibration test site

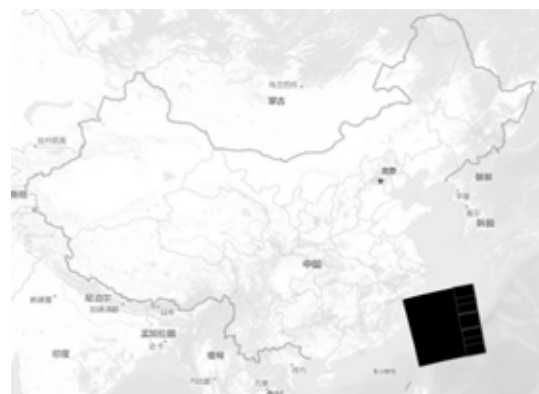


图 2 海洋场景夜间成像区域
Fig. 2 Observation region of ocean scene

3.2 数据处理分析

3.2.1 光谱反射率基准确定

中国遥感卫星辐射校正场敦煌资源卫星的观测场区面积约为 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$, 本文选取 1999 年至 2010 年近 20 次观测试验实测的辐射校正场地表反射光谱数据进行处理分析, 确定稳定的地面目标参考光谱数据。首先, 依据测量仪器的差异对实测光谱数据集进行处理分析, 分别将各年度多次测量的光谱数据处理结果进行平均, 获得场地反射率光谱, 如图 3、图 4 所示。经对比发现, 敦煌辐射校正场各年的实测反射率光谱曲线趋势一致, 且场地的整体反射率相对均匀, 在 $350 \sim 1\ 000\text{ nm}$ 辐射校正场地表光谱反射率的相对偏差小于 0.5% 。针对 GF-1 卫星 WFV 成像仪 16 m 的空间分辨率, 采用历史平均光谱反射率数据引入的总体偏差应在 $0.5\% \sim 1\%$, 因此将场地实测的历史光谱反射率的平均值作为定标区的参考光谱反射率。

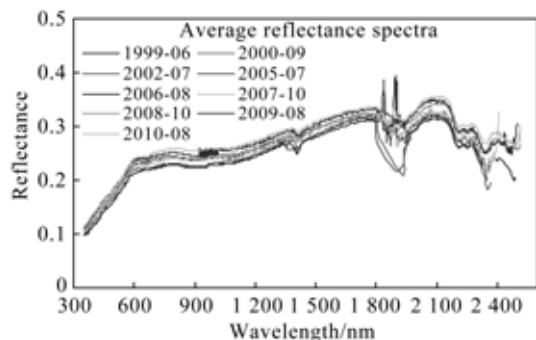


图 3 敦煌辐射校正场历史反射率光谱

Fig. 3 Historical reflectance spectra at Dunhuang radiometric calibration test site

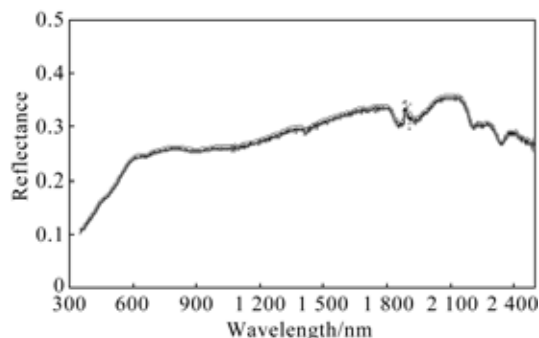


图 4 敦煌辐射校正场反射率光谱参考基准

Fig. 4 Reference reflectance spectra at Dunhuang radiometric calibration test site

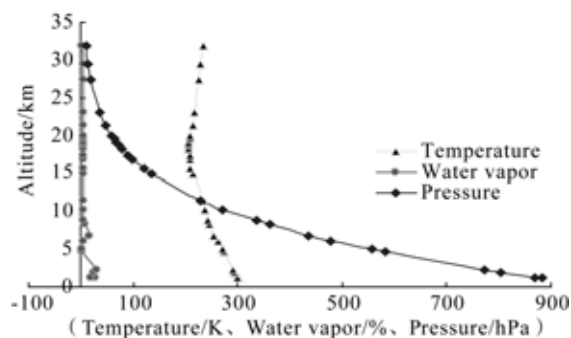
3.2.2 大气参数确定

依据敦煌市气象局提供的 GF-1 卫星 WFV 成像仪过境期间的气象数据, 推算卫星过顶时刻敦煌地区的大气气溶胶的光学厚度和温湿压廓线。其中, 大气光学特性数据采用全自动太阳辐射计 CE318 全天观测模式采集, 该仪器位于敦煌市气象局业务楼南侧 100 m 的塔楼上; 大气状态参数采用探空仪携带的温湿压传感器采集, 释放高度达 20 km , 分别于每日的 $7:00, 13:00$ 和 $17:30$ 进行常规观测。由于敦煌市气象局位于敦煌市郊区, 且 GF-1 卫星过境时刻敦煌地区晴空无云, 同时该地区属于大陆沙漠型气候条件, 同一时刻大气状态参数的区域性变化不明显^[13], 因此采用气象局实测数据作为辐射校正场上空的大气参数, GF-1 卫星过顶时大气状态参数的处理结果如表 1 和图 5 所示。

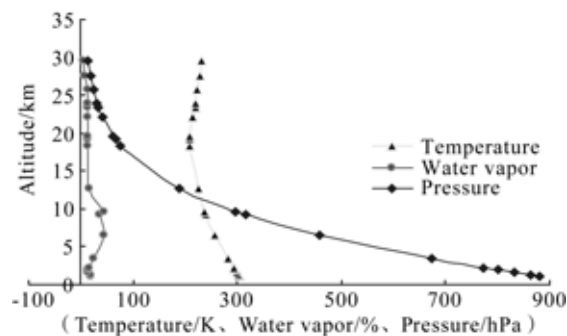
表 1 GF-1 卫星 WFV 成像仪过境时大气气溶胶的光学厚度

Tab. 1 Optical depth at synchronization aerosol 550 nm during GF-1 passing territory

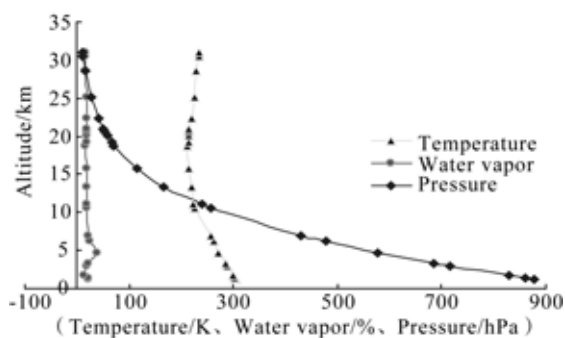
卫星遥感器	日期	气溶胶光学厚度(550 nm)
WFV2	2013-06-22	0.295 8
WFV4	2013-06-23	0.303 9
WFV3	2013-06-26	0.272 5



(a) 2013-06-22



(b) 2013-06-23



(c)2013-06-26

图 5 GF-1 卫星过境前后大气温湿压廓线

Fig. 5 Synchronization atmosphere profiles before and after GF-1 passing territory

3.2.3 WFV 成像仪自身偏移量计算

卫星光学传感器入瞳处的辐射信号需要经过光学透镜、CCD 响应器件和后续处理电子链路 3 个主要环节才能输出数字影像。理想条件下,卫星遥感器在没有入射信号情况下的输出信号为零;但实际成像过程中,受链路响应、遥感器本身性能和环境的影响,其在无信号输入情况下也存在一定的信号输出,即暗电流噪声会引起卫星影像的灰度偏移量。通常可利用实验室定标数据或整星积分球定标数据中辐亮度为 0 的影像推算得到暗电流噪声,而卫星在轨运行过程中因系统状态、外界环境等因素的影响,卫星遥感器的暗电流与发射前实验室的标定结果会产生一定偏差。针对 GF-1 卫星 WFV 成像仪不具备星上定标系统的特点,本文采用夜间大面积海洋场景成像数据进行测算。考虑到 GF-1 卫星夜间开机的安全性和数据接收的可靠性,安排 WFV 成像仪在夜间对我国东南海域进行成像,获取 5 景夜间海域影像即可认为该影像对应的入瞳处辐亮度为 0。

根据 GF-1 卫星各 WFV 成像仪 5 景夜间海洋场景的影像数据,综合统计各成像仪的观测计数值,按式(4)计算出 GF-1 卫星 WFV 成像仪的暗电流对应偏移量 DN_0 (表 2)。

$$DN_0 = \frac{\sum_{i=0}^n DN_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (4)$$

式中: DN_0 为 GF-1 卫星 WFV 成像仪某个通道对应的偏移量; DN_i 为通道观测计数值,且

$0 \leq DN_i \leq 1\ 023$; k_i 为 DN_i 出现的次数; n 为 DN_i 出现的个数。

表 2 GF-1 卫星 WFV 成像仪的暗噪声偏移量

Tab. 2 Offsets of GF-1 satellite WFV sensors caused by dark-noise

GF-1 卫星 WFV 成像仪	DN_0			
	Band1	Band2	Band3	Band4
WFV2	0. 012 5	0. 019 3	0. 042 9	0. 001 1
WFV3	0. 007 1	0. 033 4	0. 022 6	0. 011 7
WFV4	0. 036 9	0. 023 5	0. 021 7	0. 005 0

4 结果分析

4.1 定标系数计算

计算定标系数时,首先利用 GF-1 卫星 WFV 成像仪的光谱响应函数,对各参考实验区的地表光谱反射率基准数据进行卷积,获得各 WFV 成像仪波段的等效场地反射率;然后结合卫星过境时刻的气溶胶光学厚度、实时大气状态数据和太阳、卫星观测几何参数,采用 MODTRAN 辐射传输模型计算出各 WFV 成像仪在通道入瞳处的等效辐亮度^[14];最后依据实验区同步观测影像数据提取出对应的通道观测计数值。根据卫星遥感器在轨定标方法原理,基于实验数据获取辐射校正场地对应的入瞳处辐亮度、同步观测通道计数值以及海洋场景确定的偏移量计算 GF-1 卫星 WFV 成像仪的在轨定标系数 Gain,结果如表 3 所示。

表 3 GF-1 卫星 WFV 成像仪定标斜率

Tab. 3 Calibration gain of GF-1 satellite WFV sensors ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

GF-1 卫星 WFV 成像仪	Gain			
	Band1	Band2	Band3	Band4
WFV2	0. 175 7	0. 134 7	0. 108 0	0. 117 8
WFV3	0. 182 2	0. 159 0	0. 130 1	0. 139 6
WFV4	0. 188 4	0. 158 0	0. 131 9	0. 130 9

4.2 分析与检验

敦煌辐射校正场资源卫星观测场区的地表光学特性稳定、朗伯性好,无云条件下地表光谱反射

率的相对变化小于 1.0%，对卫星入瞳处辐亮度的不确定度贡献小于 2.0%。采用敦煌市气象局实测的大气数据代替场地上空气象参数，由于 CE318 测量数据和气溶胶光谱厚度处理算法模型误差的存在，大气气溶胶光学厚度测算的不确定度约为 2.3%。历史观测数据的分析结果表明，敦煌地区 30 km 范围内同一时刻气溶胶的相对差异小于 5.0%，因此气溶胶数据引入的卫星入瞳处辐亮度的计算不确定度应小于 2.5%。除此之外，MODTRAN 辐射传输模型的固有不确定度为 2.0%，其他假设引入的不确定度为 3.66%，则卫星入瞳处辐亮度的总不确定度约为 5.3%。如假设 GF-1 卫星 WFV 成像仪具有线性移不变特性，一定时间内成像仪的暗电流影响相对稳定，在不受入瞳处辐射能量影响的前提下，该算法的总不确定度约为 5.3%^[15-16]。

通过辐射定标将卫星输出通道计数值转换为对应入瞳处辐亮度的过程涉及到多个链路误差^[17]，且用户在订购和使用卫星辐亮度时首先需要明确产品的质量和可靠性。为验证高频次定标方法的适用性、可靠性和先进性，分别基于本文的定标系数和官方发布的定标系数获得同一景卫星遥感辐亮度产品，检验高频次定标方法的精度；以 GF-1 卫星发射前实验室确定 WFV 成像仪暗电流引起的偏移量检验高频次定标方法测算的在轨定标偏移量精度。由于篇幅有限，此处以 WFV2 相机为例进行讨论，选取涵盖高、中、低反射特性的 8 个均匀地物类型作为目标区(图 6)。

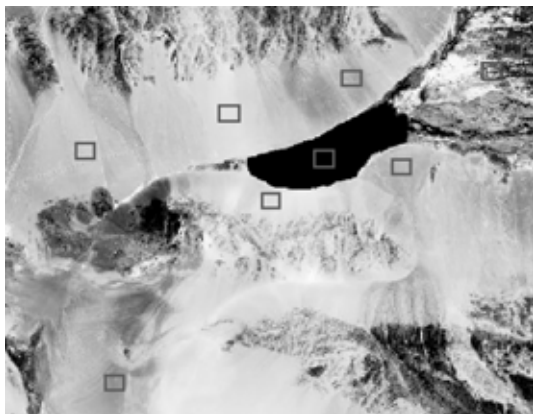


图 6 检验对比区域图像

Fig. 6 Image of validation regions

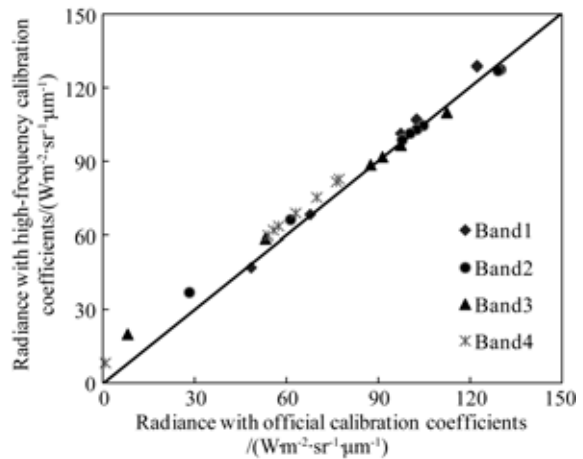


图 7 基于不同定标系数获取的辐亮度对比

Fig. 7 Comparison of radiance based on different calibration coefficients

由图 7 可知，基于高频次定标系数获取辐亮度与基于官方定标系数方法获取的辐亮度相关性较好，总体偏差小于 5.6%。其中，WFV2 相机波段 1 的辐亮度相对差异小于 4.17%，波段 2 相对差异小于 5.94%，波段 3 相对差异小于 2.72%，波段 4 相对差异小于 9.69%。高频次定标方法采用夜间海洋场景影像计算 GF-1 卫星 WFV 成像仪的偏移量。对比发现其结果远远小于官方发布定标系数的偏移量，但与基于发射前实验室定标数据计算的偏移量大小相近。由于卫星遥感器的暗电流噪声主要受元器件本身性能的影响，卫星研制过程中，各元器件严格按照高可靠性设计；在轨运行初期，元器件性能衰减不会发生较大的变化，利用海洋场景数据也说明 GF-1 卫星 WFV 成像仪的暗电流控制较好。由此可知，高频次定标方法获取的偏移量相比官方常规定标方法更加准确有效。

5 结 论

本文以 GF-1 卫星 WFV 成像仪为研究对象，提出了基于大面积场地目标和海洋场景夜间观测数据的高频次定标方法来弥补常规定标方法的不足^[18]。采用多景夜间海洋场景数据测算了 GF-1 卫星 WFV 成像仪暗电流引起的偏移量，然后利用敦煌辐射校正场的历史光谱数据和实时大气状态数据获取了 GF-1 卫星 WFV 成像仪的在轨定

标系数。最后,依据误差理论分析了方法的不确定性,并采用实验室定标系数和官方定标系数对高频次定标精度进行了对比检验。实验结果表明:基于敦煌辐射校正场地的GF-1卫星WFV成像仪的高频次定标不确定度小于5.3%;基于GF-1卫星WFV成像仪定标系数获取的辐亮度产品与基于官方定标结果获取的辐亮度相对差异小于5.6%,而基于夜间海洋场景计算的定标截距,即偏移量大小更接近于理论设计值。该方法可用于GF-1卫星在轨辐射性能和暗电流噪声的实时监测与校准。

由于GF-1卫星轨道计划安排以及敦煌实验

场区天气状况等原因,本次实验未对GF-1卫星WFV1相机进行定标,同时在卫星定标系数计算的过程中未考虑地面目标的BRDF特性影响,后续将开展高频次定标方法的影响因素及误差控制等方面的研究,以为卫星遥感器的业务化定标提供方法参考。

6 致 谢

感谢航天东方红卫星有限公司、敦煌市气象局等单位在实验资料和方法研究上给予的支持与帮助。

参考文献:

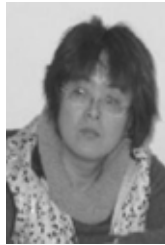
- [1] 顾行发,田国良,李小文,等. 遥感信息的量化[J]. 中国科学E辑:信息科学,2005,35(增刊I):1-10.
GU X F, TIAN G L, LI X W, et al.. Quantitative of remote sensing information [J]. *Science in China Ser. E: Information Sciences*, 2005, 35 (suppl. I): 1-10. (in Chinese)
- [2] 梁顺林. 定量遥感[M]. 范文捷译. 北京:科学出版社,2009.
LIANG SH L. *Quantitative remote sensing of land surfaces* [M]. FAN W J Translated. Beijing: China Science Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 董建婷,张旭辉. 光学遥感器光电信号处理系统的空间辐射效应研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(4):57-63.
DONG J T, ZHANG X H. Space radiation effects on photoelectric signal processing system of optical remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(4):57-63. (in Chinese)
- [4] BIGGAR S F. In-flight methods for satellite payload absolute radiometric calibration [P]. *Dissertation of Ph D, Tucson: The University of Arizona, USA*, 1990.
- [5] 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.
GAO H L, GU X F, YU T, 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. (in Chinese)
- [6] 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.
HAN Q J, FU Q Y, PAN ZH Q, et al.. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1):167-173. (in Chinese)
- [7] MARKHAM B L, HELDER D L. Forty-year calibrated record of earth reflected radiance from Landsat: a review [R/OL]. NASA Publications, Paper 70, 2012. <http://digitalcommons.unl.edu/nasapub/70>.
- [8] 李元,戎志国,郑照军,等. FY-3A扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):2966-2974.
LI Y, RONG ZH G, ZHENG ZH J, et al.. Post launch site calibration of visible and near infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2966-2974. (in Chinese)
- [9] THOME K J. Absolute radiometric calibration of landsat-7 ETM+ using the reflectance-based method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78:27-38.
- [10] TEILLET P M, SLATER P N, DING Y, et al.. Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 31:105-120.
- [11] JENSEN J R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*[M]. Second Edition. Twin Cities: University of Minnesota, Prentice Hall, 2000.
- [12] 中国遥感卫星辐射校正场编. 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.
China remote sensing radiometric calibration site

- compile. *Spectral Data Sets for Satellite Calibration Site and Typical Earth Objects* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [13] 胡秀清, 张玉香, 张广顺, 等. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 257-266.
HU X Q, ZHANG Y X, ZHANG G SH, *et al.*. Measurement and study of aerosol optical characteristics in China radiometric calibration sites [J]. *Journal of Applied Meteorology Sciences*, 2001, 12(3): 257-266. (in Chinese)
- [14] THOME K J. Absolute radiometric calibration of landsat-7 ETM + using the reflectance-based method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78: 27-38.
- [15] ZHENG X B, WU H Y, ZHANG J P, *et al.*. High-accuracy primary and transfer standards for radiometric calibration [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(21): 2009-2013.
- [16] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 基于内蒙试验场地的定标系数真实性检验方法与不确定性分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 287-294.
GAO H L, GU X F, YU T, *et al.*. Method study and uncertainty analysis of calibration coefficients validation based on the Inner Mongolia test site [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43: 287-294. (in Chinese)
- [17] 陈健, 王伟国, 高慧斌, 等. 紫外探测器的辐射定标及标准传递[J]. 中国光学, 2012(4): 423-429.
CHEN J, WANG W G, GAO H B, *et al.*. Radiation calibration for UV detectors and standard transferring [J]. *Chinese Optics*, 2012(4): 423-429. (in Chinese)
- [18] 傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 等. 敦煌场地 CBERS-02 CCD 传感器在轨绝对辐射定标研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 433-439.
FU Q Y, MIN X J, LI X CH, *et al.*. In-flight absolute calibration of the CBERS-02 CCD sensor at the Dunhuang test site [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4): 433-439. (in Chinese)

作者简介:



韩启金(1983—),男,河北承德人,硕士,工程师,2007年于长安大学获得学士学位,2010于中国空间技术研究院获得硕士学位,主要从事卫星光学载荷性能检测评价与遥感量化应用等方面的研究。E-mail: cresda_hanjin@126.com



傅俏燕(1970—),女,北京人,博士,研究员,2005年于北京师范大学获得硕士学位,2011年于中国科学院遥感应用研究所获得博士学位,现为中国资源卫星应用中心应用开发部部长,主要从事卫星定标及遥感数据处理分析等方面的研究。E-mail: fuqiaoyan@spacechina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)