

高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标

韩启金, 张学文, 乔志远, 杨磊, 潘志强, 刘李

(中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 为克服卫星传感器常规定标方法不足, 实现 GF-1 卫星 PMS 相机高精度在轨定标, 提出了多场地宽动态辐射定标方法, 分析了新方法的不确定度。首先, 介绍宽动态辐射定标原理和试验场区概况, 设计开展了 GF-1 卫星多场地同步观测试验; 接着, 基于试验数据和宽动态定标模型, 实现了 GF-1 卫星 PMS 相机的在轨辐射定标; 最后, 讨论 GF-1 卫星 PMS 相机多场地定标的不确定度和模型的稳定性。结果表明: GF-1 卫星 PMS 相机自发射以来辐射响应特性与实验室定标结果相比发生了一定变化, 最大变化量达到了 7.72%; PMS 相机多场地辐射定标的综合不确定度为 5.35%。所获取的 PMS 相机定标系数满足遥感辐亮度产品生产的精度要求, 且多场地定标可作为后续高分卫星的在轨定标的方法参考。

关键词: 高分一号卫星; PMS 相机; 试验场; 辐射定标; 不确定度

中图分类号: TP722.4; TP721.1; TP731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0127-07

Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites

Han Qijin, Zhang Xuewen, Qiao Zhiyuan, Yang Lei, Pan Zhiqiang, Liu Li

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

Abstract: In order to overcome the limitations of conventional calibration method and realize high precision in-flight radiometric calibration of GF-1 PMS sensors, a new wide dynamic radiometric calibration method using multi-test sites was presented, and the uncertainty of this method was analyzed. Firstly, the wide dynamic radiometric calibration theory was introduced and the characteristics of test sites was described. Besides, the GF-1 satellite to field synchronous observing campaign with multi test sites was designed. Secondly, based on measured data and wide dynamic calibration model, the calibration of PMS sensors was finished. Finally, the uncertainty and feasibility of this calibration algorithmic were discussed. The radiometric properties of GF-1 PMS sensors have changed comparing with the prelaunch laboratory calibrated results, and the biggest change is close to 7.72%. And the uncertainty of wide dynamic radiometric calibration of PMS sensors based on multi-test sites is 5.35%. The obtained precision of calibration coefficients meets the requirements of remote sensing radiance's retrieval, and the method provides a reference for further calibration of high resolution satellite.

Key words: GF-1 satellite; PMS sensor; test site; radiometric calibration; uncertainty

收稿日期: 2014-05-14; 修订日期: 2014-06-03

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2012AA12A302)

作者简介: 韩启金(1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事卫星性能检测与遥感应用方面的研究。Email: cresda_hanjin@126.com

0 引言

高分一号卫星作为我国高分辨率对地观测系统国家科技重大专项的首颗卫星,已于 2013 年 4 月 26 日中午在酒泉卫星发射中心成功发射,标志着高分专项工程取得了阶段性成果。GF-1 卫星是我国首颗设计考核寿命要求大于 5 年的低轨遥感卫星,轨道高度为 645 km,轨道倾角为 97.96°,星上搭载有 2 台全色/多光谱相机(简称“PMS 相机”)和 4 台宽视场成像仪(简称“WFV 相机”),其中 PMS 相机设置有 2 m 全色、8 m 多光谱波段,2 台相机拼接覆盖宽度大于 70 km,该传感器突破了高空间分辨率、多光谱与宽覆盖相结合的光学遥感等关键技术,将为我国资源调查、环境监测、精准农业等重点领域提供有效的遥感数据资源。

高分卫星遥感器系统的科学应用,已不再局限于定性描绘地表基本特征,而是深入到定量地解译地球物理参量和地球环境的演变规律。GF-1 卫星研制过程中采用了多项新技术、新器件,其中 PMS 相机是迄今为止分辨率最高、拼接幅宽最大的新型光学遥感器,为实现遥感数据的连续性、稳定性和可靠性,提高 GF-1 卫星数据的遥感定量化应用水平,必须确保卫星数据的产品质量,尤其是辐射测量精度,即在轨绝对辐射定标的精度。卫星遥感器在发射之前均会利用实验室定标手段对其辐射测量性能进行定标,即获取发射前绝对辐射定标系数,但由于受发射时的振动、在轨空间环境及工作状态变化等因素的影响,会使卫星遥感器绝对辐射定标系数发生一定变化,同时考虑到 GF-1 卫星不具备星上定标系统功能,必须借助于替代定标的方式实现卫星在轨绝对辐射定标工作。

经过 20 多年的努力,航天遥感与应用领域的研究人员提出了许多替代定标方法,如瑞利散射定标、场地定标、海洋场景定标、交叉定标和恒星源定标等,这些新方法也广泛用于各类卫星,如 LANDSAT、SPOT、NOAA、POLDER、TERRA、CBERS 和 FY 等^[1-3]。而国内近年来针对气象、海洋和陆地观测系列卫星遥感器开展了星上定标、场地定标和交叉定标等研究工作,其中气象、海洋系列卫星遥感器因其波段设置、低空间分辨率、重访周期短和覆盖宽度大等特点

使得定标频次和业务化程度相对较高,而陆地观测卫星由于分辨率高、幅宽小、重访周期长,且主要利用可见光-近红外光谱波段,因此星上定标和交叉定标资源相对不足,主要基于地面辐射校正场同步观测试验实现在轨绝对辐射定标工作^[4-5],方法相对单一、定标的精度和稳定性相比国外同类遥感器均存在一定差距,有必要针对高分卫星遥感器开展新的定标技术研究,提高定标精度和结果的可靠性。

为解决现有单场地定标方法的局限性和定标动态范围问题,基于多种光学特性的地面场地目标开展 GF-1 卫星 PMS 相机的多场地宽动态辐射定标研究。通过多场地星-地联合同步观测试验数据,实现了 GF-1 卫星 PMS 相机的宽动态范围在轨辐射定标,并对 GF-1 卫星 PMS 相机发射前后的辐射探测性能进行分析。最后讨论了多场地宽动态辐射定标的不确定性和可行性,为后续高分卫星遥感器的精确在轨定标提供方法参考,由于篇幅所限,文中以 PMS1 (2 m/8 m)相机为例进行研究讨论。

1 方法与试验

1.1 方法原理

卫星遥感器过顶地面场区上空时,地面同步测量地表反射率(反射比因子)、场地上空大气气溶胶光学厚度和大气廓线数据,然后基于处理获得的地表光谱数据、大气光学特性参数、大气廓线数据和星地匹配辅助参数,如采样点定位信息、太阳观测角度、卫星遥感器观测几何路径信息等,利用辐射传输模型(6S、MODTRAN 等)模拟计算出卫星遥感器入瞳处等效辐亮度或反射率,并结合卫星遥感器同步观测图像匹配区域提取的观测通道计数值 DN,拟合出卫星遥感器输入输出之间的定量关系,即绝对辐射定标系数。

GF-1 卫星 PMS 相机观测特定地物目标时,接收的入瞳处大气顶层光谱辐亮度主要由大气路径散射(主要包括瑞利散射和气溶胶散射),目标区反射辐亮度和邻近目标的散射辐亮度组成:

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

式中: $L_s(\lambda)$ 是波长 λ 处的遥感器入瞳处辐亮度; 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 为太阳天顶角); $T(\theta_s) = e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\theta_s)$ 为向下方向(太阳到地面)大气散射透过率; τ 为大气光学厚度; ρ_n 为目标邻近区地表反射率; S 为大气球面反照率, $\mu_v = \cos \theta_v$ (θ_v 为观测天底角); $\rho(\lambda)$ 是波长 λ 处目标反射率; $t_d(\theta_s)$ 为向上方向(地面到卫星)大气透射散射因子; ρ_p 为大气路径的反射率。

则 GF-1 卫星 PMS 相机通道 i 测量的特定目标等效辐亮度 L_i 为:

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

式中: L_i 是 PMS 相机通道 i 的等效辐亮度; $L_s(\lambda)$ 为大气顶层卫星入瞳处光谱辐亮度; λ_i 为 PMS 相机通道 i 的等效中心波长; $f_i(\lambda)$ 为 PMS 相机通道 i 的光谱响应函数; λ_{\min} 为通道 i 的最小波长; λ_{\max} 为通道 i 的最大波长。

对于 GF-1 卫星 PMS 相机, 其通道测量等效辐亮度 L_i 与对应通道输出的计数值 DN 的关系为:

$$L_i = \text{Gain} \cdot \text{DN}_i + \text{Bias} \quad (3)$$

式中: Gain 为定标斜率; Bias 为定标截距, 单位均为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; DN_i 为 PMS 相机同步图像目标区的通道计数值。

当 GF-1 卫星 PMS 相机观测多种反射率地物目标时, 采用多个场地同步观测数据可推算出多组入瞳处等效辐亮度和通道观测计数值信息, 从而基于公式(3)的等量关系拟合出 GF-1 卫星 PMS 相机在轨宽动态辐射定标系数。

1.2 试验场地选择与介绍

卫星遥感器多场地辐射定标的精度受多个环节的影响, 其中场地的具体特征是该方法使用的首要前提, 因此必须确保所选场地的表面特性、大气特点和均匀区面积符合在轨场地定标的具体要求, 详细的选取原则如下:

- (1) 场地反射特性涵盖高、中、低多种地物类型;
- (2) 单个场地的空间特性和反射特性相对均匀, 在光学遥感器波段范围内光谱反射率变化平缓;
- (3) 场地位于高海拔地区, 周边大气相对干洁, 且大气相对稳定;
- (4) 各场地可被卫星遥感器同一轨观测图像覆盖;
- (5) 场地均匀区域面积应大于待定标遥感器的 10 像元 \times 10 像元, 且场地周边无大目标遮挡物;
- (6) 各

场地具备开展星-地同步观测试验的交通条件。

综合上述各中条件要求, 选取了敦煌地区高、中、低三种反射特性地物目标作为试验场地, 具体分布特点见图 1。

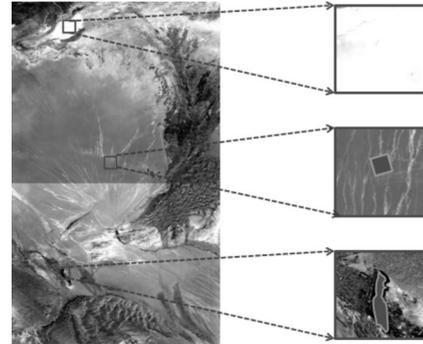


图 1 试验场区空间分布图像

Fig.1 Test sites distributing images

(1) 高反射试验场

高反射试验场(石膏)位于敦煌辐射校正场北侧, 场区总面积约为 $6 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, 试验区面积为 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, 地理坐标为 $\text{N}40^\circ 28', \text{E}94^\circ 22'$, 该区域可见光-近红外波段反射率约为 $35\% \sim 45\%$, 不同遥感器像元间光谱反射率变化小于 1% ^[6]。

(2) 中等反射试验场

中等反射试验场(戈壁)选取敦煌辐射校正场资源卫星场区, 该场位于敦煌市西侧约 30 km 处的戈壁滩上, 总面积约 $30 \text{ km} \times 35 \text{ km}$, 其中资源卫星场区为 $550 \text{ m} \times 550 \text{ m}$, 地理坐标为 $\text{N}40^\circ 05' 27.75'', \text{E}94^\circ 23' 39''$, 海拔高度为 1229 m , 该场区具有较高的稳定性和均匀性, 可见光-近红外波段反射率约为 $15\% \sim 30\%$, 不同遥感器像元间光谱反射率变化约为 $1\% \sim 2\%$ ^[7]。

(3) 低反射试验场

低反射试验场选取辐射校正场南侧南湖水体, 场区夏秋季节的面积约为 $3.5 \text{ km} \times 1.2 \text{ km}$, 地理坐标为 $\text{N}39^\circ 52', \text{E}94^\circ 07'$, 平均水深约 5 m , 水体无污染, 特性均匀。

1.3 同步观测试验

根据 GF-1 卫星 PMS 相机 1 的轨道预报结果, 2013 年 6 月 22 日 PMS 相机 1 以 -9.7° 侧摆角度覆盖高、中、低 3 个场区, 为确保数据获取的准确性和一致性, 地面试验分 3 个队伍同时开展。其中采用地物光谱仪(2 台 ASD Field-spec FR, 1 台 SVC HR-1024)对

高、中、低三个场区进行同步测量,其中陆地场区测量面积为 400 m×400 m,利用不同颜色小旗对场区按沿轨和垂轨方向布设样本点,每间隔 25 m 确定一个样本点,即 256 个样本点。试验过程中,分别在每个样本点周围随机选择 5 个子样本点进行光谱测量,并于每个样本点位置附近对漫反射率参考板测量 2 次。由于水体目标的特殊性,在同步观测过程中采用航船随机走点的方式进行测量,样本数均匀分布于水体场区域,三个场地的同步光谱数据测量均在卫星过境前后 20 min 内完成。

场区光谱同步观测当天分别利用全自动太阳辐射计 CE318 和手动太阳辐射计 CE317 对敦煌辐射校正场区和和水体场的气溶胶光学厚度进行测量,测量时间为 8:00~13:00,采用等间隔时间自动测量太阳直射辐射强度,并在卫星过境前半小时释放大气探空仪获取大气温湿压廓线数据。由于敦煌场属于干燥的沙漠气候,场区污染小、水汽含量低,经过 1999 年以来的大气光学特性观测数据,分析得知敦煌场区周边的大气光学特性相对均匀稳定,同一时刻不同地理区域的大气状态差异较小,因此认为高、中两个试验场区场大气光学特性参数一致。

2 结果分析与讨论

2.1 反射光谱处理

GF-1 卫星 PMS 相机星-地同步观测场地空间距离大于 20 km,且场地光谱反射率数据测量时间约 40 min,为减小太阳辐照度变化以及观测仪器差异性对测量数据造成的误差,对高反射和中等反射场地光谱数据处理过程如下:(1) 进行异常值剔除,并对每 5 个子样本点的光谱测量值进行平均得到各场区 256 个样本点的光谱平均值;(2) 同时利用实验室标定的漫反射率参考板 BRF 数据按测量时刻太阳天顶角进行插值计算,得到各个场地的漫反射参考参考光谱数据;(3) 以各样本点前后测量的 2 次参考板平均值为参考,计算各样本点的光谱反射率,再对全部样本点光谱数据进行平均,获得各场区的平均光谱反射率,如图 2 所示;(4) 以戈壁场所用 ASD Field-spec FR 地物光谱仪和漫反射率参考板为标准对另外 1 台 ASD Field-spec FR 地物光谱仪和 SVC HR-1024 地物光谱仪进行修订,修订因子以 3 台仪器在晴空条件下,同时同角度观测漫反射参考板的

输出光谱数据依据进行对比计算;(5) 最后将修订后的各场区光谱反射率与 GF-1 卫星 PMS 相机通道光谱响应函数进行卷积处理(公式(4)),从而计算出各场区对应的 PMS 相机各通道等效反射率:

$$\rho_i = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{\rho(\lambda)} f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中: ρ_i 为 PMS 相机通道 i 的等效反射率; $\overline{\rho(\lambda)}$ 为场区平均反射率光谱处理结果; $f_i(\lambda)$ 为 PMS 相机通道的光谱响应函数。

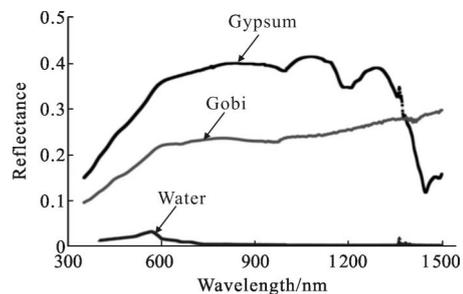


图 2 各场区平均光谱反射率

Fig.2 Average spectral reflectance of test sites

2.2 大气特性数据处理

根据太阳辐射计测量的直射太阳辐射和天空辐射数据,采用 Langley 方法反演得到卫星过顶时刻的大气气溶胶光学厚度,假定气溶胶粒子分布满足龙格(Junge)分布,利用 440 nm 和 870 nm 2 个通道的气溶胶光学厚度计算得到波长指数 α 和浑浊系数 β ,由此可以导出 550 nm 波长处的气溶胶光学厚度见图 3。

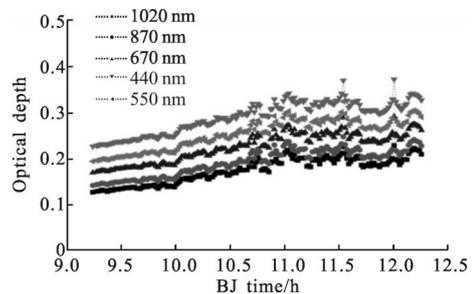


图 3 大气气溶胶光学厚度

Fig.3 Aerosol optical depth

图 3 显示出试验当天场区大气状态相对比较稳定,气溶胶光学厚度波动较小。由于卫星过境时间前后大气温湿压廓线均采用一套设备获得,探测海拔高度约 20 km,现对高于 10 km 的测量数据进行插值处理,作为各个场区星-地同步大气辐射传输模拟的输

入大气廓线依据见图 4。

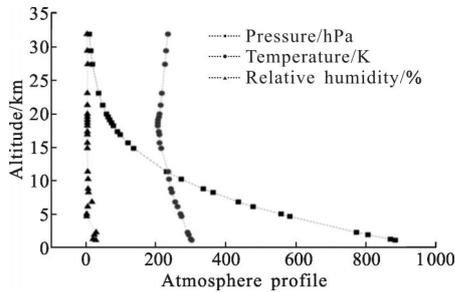


图 4 大气温湿压廓线

Fig.4 Atmosphere profiles of temperature, relative humidity and pressure

2.3 定标系数计算

将星-地同步观测数据推算的 PMS 相机通道等效场地反射率、大气气溶胶光学厚度、大气廓线以及太阳、卫星几何观测条件等参数输入 MODTRAN 辐射传输模型,获得 PMS 相机各通道大气顶等效辐亮度;再结合星-地空间几何位置配准图像上提取的同步区通道计数值,计算绝对辐射定标系数。GF-1 卫星 PMS 相机 6 月 22 日各场地同步图像的计数值相对差异均小于 5%,其中石膏场区全色波段 P 为 2.43%,蓝光波段 B1 为 3.55%,绿光波段 B2 为 0.82%,红光波段 B3 为 2.39%,近红外波段 B4 为 3.15%;戈壁场区全色波段 P 为 4.04%,蓝光波段 B1 为 0.47%,绿光波段 B2 为 0.74%,红光波段 B3 为 0.93%,近红外波段 B4 为 1.16%;水体场区全色波段 P 为 1.05%,蓝光波段 B1 为 2.66%,绿光波段 B2 为 4.28%,红光波段 B3 为 3.84%,近红外波段 B4 为 2.12%;进一步说明各场地的均匀性较好。

GF-1 卫星 PMS 相机在地面相对辐射校正过程中已基于发射前实验室定标结果进行暗噪声去除,即排除相机自身偏移量信息,但由于卫星发射时的振动、在轨空间环境及运行状态变化等影响,难免引起暗噪声的变化,因此采用多个场地目标可同时定标出 PMS 相机的辐射响应(增益)和在轨偏移量(截距),从而对发射前实验室定标系数进行监测修正。为分析 GF-1 卫星 PMS 相机在轨辐射响应特性变化,仅对定标增益的变化趋势进行分析,基于多场地宽动态辐射定标方法获取的 GF-1 卫星 PMS 相机的在轨定标系数及与实验室定标系数对比结果如表 1 所示。

表 1 GF-1 卫星 PMS 相机多场地定标系数与实验室定标系数

Tab.1 Multi-sites calibration coefficients and laboratory calibration coefficients of GF-1 PMS sensors

GF-1 satellite sensor	Spectral band	Multi-sites calibration coefficients		Laboratory calibration coefficients		Relative difference
		Gain	Bias	Gain	Bias	
PMS1	P	0.188 6	-13.127	0.176 1	-1.364 4	7.10%
	B1	0.208 2	4.618 6	0.212 9	0.104 3	-2.21%
	B2	0.167 2	4.876 8	0.168 8	0.216 3	-0.95%
	B3	0.174 8	4.892 4	0.169 7	0.400 9	3.01%
PMS2	B4	0.188 3	-9.477 1	0.174 8	0.284 7	7.72%
	P	0.187 8	-7.973 1	0.174 5	0.105 7	7.62%
	B1	0.207 2	7.534 8	0.213 7	-0.020 1	-3.04%
	B2	0.177 6	3.939 5	0.179 1	-0.413 8	-0.84%
	B3	0.177	-1.744 5	0.177	-1.522 1	0.00%
	B4	0.190 9	-7.205 3	0.187 7	-0.775 9	1.70%

注: 相对差异 = $\frac{\text{Gain}_{\text{场地}} - \text{Gain}_{\text{实验室}}}{\text{Gain}_{\text{实验室}}} \times 100\%$

2.4 讨论分析

2.4.1 算法可靠性分析

我国陆地观测卫星遥感器的在轨场地定标一直沿用敦煌辐射校正场(戈壁场)单一类型目标作为同步试验场,且定标算法模型均假设定标系数截距为零,即地面处理系统已完全将遥感器的自身偏移量信息去掉了,而大量实践结果证明,随着卫星遥感器在轨运行时间的延长,遥感器自身的暗电流、电路辐射等因素引起的自身偏移量已偏离发射前实验室标定的结果^[8-9],因此在轨绝对辐射定标过程中应考虑遥感器自身偏移量的变化。同时,单点法场地定标的辐射量范围相对单一,无法实现宽动态乃至全动态范围的辐射定标,采用多场地相结合的辐射定标方法,不但可以降低单场地定标数据的不确定性,还可以确保定标系数拟合精度,提高算法模型的稳定性,同时实现卫星遥感器辐射响应的宽动态在轨定标^[10]。

2.4.2 不确定度分析

多场地宽动态辐射定标是以常规反射率基法为基础建立的,该方法的影响因素主要有场区反射率、大气光学特性参数、大气吸收气体含量、辐射传输模

型固有精度、太阳辐照度变化、太阳与卫星观测几何条件以及其他相关假设引入的影响等,针对本次星-地同步试验数据,依据不确定度分析理论和定标系数计算模型对该次 PMS 相机宽动态辐射定标系数的不确定度进行分析^[10]。

多场地定标以敦煌辐射校正场(戈壁场)及其周边大面积均匀地物目标为同步测区,经对文章所用星-地同步观测数据处理结果进行分析,可得 GF-1 卫星 PMS 相机多场地定标系数的不确定度来源如下:

(1) 场区反射率不确定度,即各样本点测量光谱标准差与平均光谱的比值如下:石膏区反射率不确定度为 0.38%,戈壁区反射率不确定度约为 0.44%,水体区反射率不确定度约为 0.56%,而漫反射率标准参考板标定不确定度约为 1.92%,则各场区平均光谱反射率的总不确定度分别为石膏场 1.16%,戈壁场 0.83%,水体场 0.71%;

(2) 由于敦煌地处大陆型干旱气候区,气溶胶类型选择沙漠型,依据反射率基法对气溶胶折射指数选择和分布类型的假设,引起的入瞳处等效辐亮度不确定度小于 2.91%,利用 CE318 测算的气溶胶光学厚度不确定度约为 7.21%,所引入的大气顶层等效辐亮度不确定度约为 2.06%;

(3) 模型吸收气体假设、场地朗伯特特性假设、太阳天顶角误差不确定性以及 MODTRAN 模型本身不确定性等因素综合引入的辐亮度不确定度约为 3.66%;

(4) GF-1 卫星 PMS 相机各通道计数值的平均不确定度为石膏场 2.46%,戈壁场 1.47%,水体场 2.29%;

采用多场地同步观测数据处理结果进行宽动态辐射定标系数的拟合计算,综合考虑各个场地数据的不确定度,可知 GF-1 卫星 PMS 相机多场地辐射定标系数增益的总体平均不确定度分别为:全色波段 4.11%,蓝光波段 B1 为 5.35%,绿光波段 B2 为 4.86%,红光波段 B3 为 4.31%,近红外波段 B4 为 4.09%,即该次 PMS 相机定标系数总体定标不确定度优于 5.35%。

3 结论

随着遥感应用的深入,新型卫星传感器不断涌现,GF-1 卫星作为我国高分辨率对地观测系统重大

专项中的第一颗光学传感器,其在轨辐射性能标定精度影响着后续遥感数据产品质量精度及可靠性的提高。为克服现有单场地定标方法的不足,准确检测 GF-1 卫星传感器在轨辐射性能特点,获取高精度的在轨绝对辐射定标系数,提出了基于多场地目标的宽动态辐射方法,并利用 2013 年 6 月星-地同步观测数据获取了 GF-1 卫星 PMS 相机自发射以来的在轨辐射定标系数。结果表明:(1) 由于各种因素的影响,GF-1 卫星 PMS 相机在轨运行状态下的辐射响应特性与发射前实验室标定结果相比发生了一定变化,除个别波段的变化量较大外(PMS1 相机全色波段 7.10%、近红外波为 7.72%,PMS2 相机的全色波段变化量为 7.62%),其余光谱波段的辐射响应特性变化量均小于 3%;(2) 基于多场地目标的宽动态辐射定标可有效克服常规单场地定标方法的不足,该次定标结果总体不确定度约为 5.35%。文中基于敦煌高、中、低三个目标场区的多场地宽动态辐射定标方法获取了 GF-1 卫星 PMS 相机在轨定标系数,并开展了不确定度分析工作,为检验该算法的适用性和移植性,后续将对算法的模型精度进行验证分析工作,同时进一步考虑非同时观测的多场地辐射定标问题,以提高我国后续高分卫星的在轨定标技术水平。

参考文献:

- [1] Liang Shunlin. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. London: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [2] Xiong X X, William B. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(1): 69-79.
- [3] Dinguirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging payloads: a review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 194-205.
- [4] 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. (in Chinese)
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.
- [5] Han Qijin, Liu Li, Fu Qiaoyan, 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. (in Chinese)

- 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.
- [6] Han Qijin, Fu Qiaoyan, Zhang Xuwen, 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. (in Chinese)
- 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次辐射定标 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(7): 1707-1714.
- [7] Xing Hui, Zhao Huijie, Cheng Xuan, et al. Radiometric calibration of hyperspectral imaging spectrometer based on AOTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 205-210. (in Chinese)
- 邢辉, 赵慧洁, 程宣, 等. AOTF 的高光谱成像光谱仪的辐射定标技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 205-210.
- [8] 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. (in Chinese)
- 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.
- [9] 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.
- [10] Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, et al. Radiometric Calibration Theory and Method of Space Optical Sensors[M]. Beijing: Science Press, 2013: 72-126. (in Chinese)
- 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: 72-126.