

引用格式: Li Zhenwang, Liu Liangyun, Zhang Hao, *et al.* Radiometric Calibration and Validation of TG-1 Hyper-spectral Imager[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 850-857. [李振旺, 刘良云, 张浩, 等. 天宫一号高光谱成像仪在轨辐射定标与验证[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 850-857.]

天宫一号高光谱成像仪在轨辐射定标与验证

李振旺^{1,2}, 刘良云¹, 张 浩¹, 张九星³, 李绪志³

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院空间应用工程与技术中心(筹), 北京 100094)

摘要: 利用 2012 年 2 月 3 日和 3 月 6 日在北京市组织的星地同步观测实验, 开展了天宫一号(TG-1)高光谱成像仪各通道在轨辐射定标与检验研究。首先, 利用 3 月 6 日地面定标场的定标实验数据, 采用 MODTRAN 辐射传输模型, 根据反射率基法获取天宫一号高光谱成像仪各通道辐射定标修正系数, 修正后的辐射定标参数与实验室和星上参数存在一定程度的差异, 可见近红外和短波红外各通道相对差异均超过了 10%。然后, 利用 2 月 3 日的星地同步观测数据, 对辐射定标结果进行验证。结果表明: 定标后的图像精度大大提高, 并且定标结果与验证数据具有很好的一致性。在绝大多数通道, 两者的相对误差小于 10%, 相对误差较大的通道主要分布在臭氧、水汽等气体吸收波段。因此, 天宫一号在轨定标的星地实验校正了高光谱成像仪的辐射定标系数, 提高了改进辐射校正产品的定量化精度。

关 键 词: 辐射定标; 修正系数; 反射率基法; MODTRAN; 天宫一号; 高光谱成像仪; 验证

中图分类号: V 556.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)05-0850-08

1 引 言

天宫一号是中国第一个目标飞行器, 于 2011 年 9 月 29 日 21 时 16 分 3 秒在酒泉卫星发射中心发射。按照任务计划安排, 天宫一号将开展一系列空间科学实验。其中, 空间对地观测实验将利用装载在天宫一号上的一台高分辨率高光谱成像仪, 在地球资源、海洋、环境、水土、农林、城市等领域开展遥感测绘研究与应用。天宫一号高光谱成像仪可分别在可见近红外和短波红外波段进行拍摄成像。由于发射、在轨运行环境影响和空间环境的巨大差异, 天宫一号高光谱成像仪星上光谱和辐射性能与发射前实验室和星上定标状态存在一定差异, 难以满足定量化遥感应用需求。因此在定量应用之前需要经过在轨辐射定标, 获取一套准确可用的传感器定标系数。

遥感器辐射定标是将卫星影像 DN 值转化为遥

感器入瞳处的辐亮度, 高精度的辐射定标不仅是遥感器性能评价与卫星数据定量化应用的前提, 也是不同遥感器图像数据比较分析的基础^[1]。世界上几乎每颗卫星在发射成功后都要进行在轨测试, 在轨辐射定标最早由美国 Arizona 大学的 Slater 等^[2]针对 Landsat TM 传感器辐射定标提出, 并指出在轨辐射定标法是定标精度较高、最直接有效的方法。Biggar, Thome 等^[3-6]使用该方法对 Landsat TM、Landsat ETM、ASTER、SPOT 和 Hyperion 等传感器成功地进行过多次在轨定标实验, 得到各传感器不同时期高精度的定标系数。在轨辐射定标方法在我国国产卫星的辐射定标中也得到了广泛的应用, 通过选择定标实验场地, 组织综合场地试验, 环境系列卫星^[7-9]、CBERS 系列卫星^[10-11]、风云系列卫星^[12-13]和北京一号卫星^[14]等都成功地进行过绝对在轨辐射定标, 并取得了较好的定标结果。同时高

收稿日期: 2012-08-06; 修订日期: 2013-04-29

基金项目: 国家 973 计划项目(2010CB951701), 载人航天工程天宫一号民用试应用项目及国家自然科学基金项目(41001206)资助。

作者简介: 李振旺(1988—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事光学遥感与应用方面的研究。E-mail: zwli@ceode.ac.cn。

通讯作者: 刘良云(1975—), 男, 湖南邵阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植被遥感与遥感机理应用方面的研究。E-mail: lyliu@ceode.ac.cn。

海亮等^[7,15]针对在轨辐射定标过程中的不确定性和光谱响应函数的敏感性进行了分析,为以后传感器的定标实验提供了借鉴和指导。

目前在轨辐射定标主要通过交叉定标和场地定标等在轨替代定标方法来实现^[1]。由于轨道参数和光谱通道匹配问题,天宫一号交叉定标的实现比较困难。场地定标法是目前国际上最常使用的绝对辐射定标方法^[16],定标方法分为 3 种:①反射率基法^[17],即在遥感器飞越辐射定标场地上空时,在定标场地选择若干个像元区,获取地面地物光谱和大气环境数据,利用辐射传输模型求取遥感器入瞳处的表观辐亮度,确定它与成像光谱仪对应输出的 DN 值的数量关系,求解定标系数;②辐照度基法^[2],该方法主要是对反射率法的改进。利用测量的总辐照度与漫射辐照度比值,更准确地得到大气透过率,从而提高定标的准确度;③辐亮度基法^[18],该方法是利用严格定标的航空遥感器与卫星遥感器观测同一目标,利用航空遥感器获得的辐亮度和辐射传输模型计算得到卫星遥感器接收到的辐亮度,是 3 种方法中精度最高的。3 种方法在辐射定标中各有利弊,辐亮度基法和辐照度基法相比反射率基法精度有所改进,但对测量的地表辐亮度和辐照度有很高的要求^[15],同步测量的光谱辐射误差将直接

传递到卫星遥感器定标参数;而反射率基法反射率法易于实现,人力物力成本较低。

鉴于目前我国地面光谱仪辐射定标的时效性和辐射定标精度,本文使用场地定标方法中的反射率基法,通过设计地面同步试验获取卫星过境时的地面和大气参数,利用 MODTRAN 4 把地面反射率转换到表观辐亮度,并与天宫一号高光谱成像仪的 L1 级辐射校正产品进行比对,计算一套辐射定标修正系数,对实验室和星上定标系数进行改正。

2 地面试验与参数获取

2.1 定标场地选择

天宫一号先后于 2012 年 2 月 3 日和 2012 年 3 月 6 日过境北京,根据天宫一号过境情况以及预先提供的飞行轨迹,提前选择地面同步试验地点。选择的定标场地要求下垫面平坦均匀,地物单一稳定,开阔无遮挡,且定标场地要求大于 5 个像元。通过综合考虑,最终选择北京市少年宫一块天然足球草地(图 1(a))和北京市房山区的青龙湖水库附近的一块翻耕农田(图 1(b))作为本次试验的定标场地,分别于 2012 年 2 月 3 日和 3 月 6 日开展地面同步实验。两个场区场地均匀开阔,满足地面同步试验的要求。

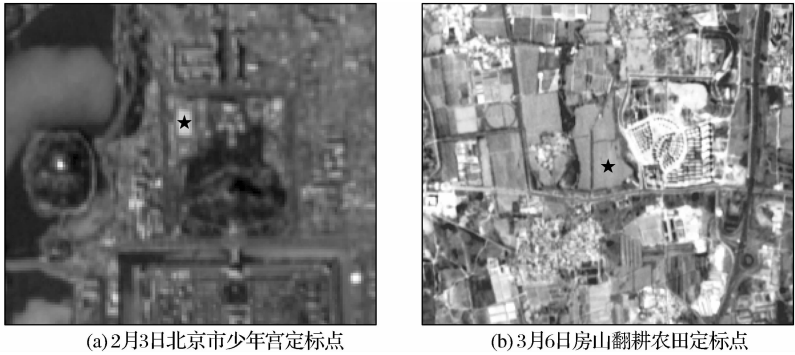


图 1 定标场地天宫一号影像图

Fig. 1 Tiangong images of every calibration site

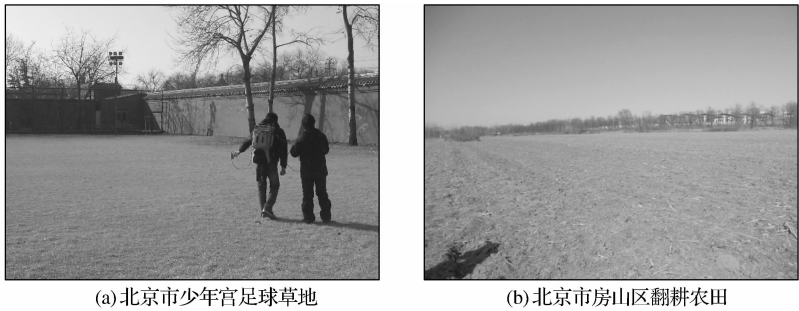


图 2 定标场地场景图

Fig. 2 Scene of every calibration site

2.2 地面光谱测量

天宫一号两次过境北京的时间分别是2012年2月3日9:20左右和2012年3月6日14:30左右,地面试验要求在卫星过境的前后15 min内对定标场地完成地面光谱测量。光谱测量仪器为美国ASD公司生产的可见光近红外地物光谱仪ASD FieldSpec Pro,参考板采用中国科学院安徽光机所生产标定的白色参考板。ASD地物光谱仪光谱范围350~2 500 nm,在350~1 000 nm范围内光谱采样间隔为1.4 nm,1 000~2 500 nm范围内采样间隔为2 nm。光谱仪在完成测量后经仪器自身软件插值处理,在350~2 500 nm整个光谱范围内以1 nm的采样间隔输出结果。地面光谱测量时,在每个定标场地中央选择面积约50 m×50 m的均匀区域,样区内按样带垂直向下测量地物80~100次,并前后各测量参考板10次,通过多次平均获得测量样区的光谱反射率。为减小测量人员和设备对散射光的干扰,测量人员穿深色服装,并侧身伸出胳膊,垂直于太阳主平面方向观测地物光谱。测量同时利用GPS设备对试验场地精确定位,获取经纬度和地面高程信息。

经过室内处理,对地面试验获取的光谱数据进行处理。通过删除异常光谱曲线,分别求取地物和参考板的平均测量值,并利用式(1)求出定标场地地物平均反射率(图3)。

$$\rho_{\text{地物}} = \frac{D_{\text{地物}}}{D_{\text{板}}} \times \rho_{\text{板}} \quad (1)$$

其中: $\rho_{\text{地物}}$ 为定标场地地物地面反射率, $D_{\text{地物}}$ 为地物测量平均值, $D_{\text{板}}$ 为参考板测量平均值, $\rho_{\text{板}}$ 为已知标定参考板的反射率。

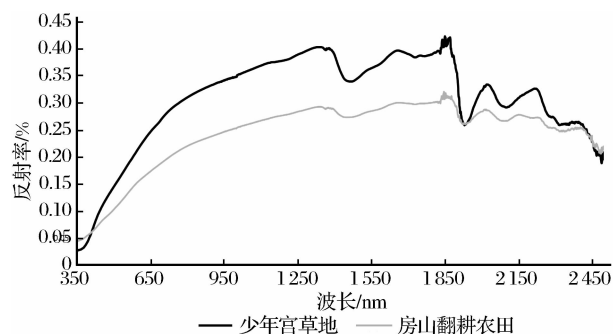


图3 定标场地平均反射率

Fig. 3 Average reflectance of every calibration site

2.3 大气参数测量与获取

2月3日北京市少年宫地面同步实验,由于没能及时准备好气溶胶观测设备,未能对大气参数进

行观测。本文通过使用同日相近时段的“MODIS 大气可降水量”和MOD04_L2气溶胶产品对垂直水汽柱含量和550 nm处的气溶胶光学厚度进行反演,作为本次验证试验定标实验场地上方的大气参数。

3月6日的地面实验,在地面光谱测量的同时,对大气参数进行了观测。大气参数测量采用美国Solar Light公司生产的手持式五通道太阳光度计(Microtops II),可检测440、500、675、870、1 020 nm共5个通道气溶胶散射的光学厚度,同时也可以获得垂直水汽柱含量、大气压和海拔高度等一系列大气参数^[19]。

Microtops II太阳光度计可以测量440、500、675、870、1 020 nm 5个波段的气溶胶光学厚度,但是MODTRAN 4中水平气象视距参数的计算需要用到550 nm处的气溶胶光学厚度。利用气溶胶光学厚度与波长的经验关系^[19](式(2)),选择440 nm和870 nm气溶胶光学厚度求解方程获得参数,来计算550 nm波段气溶胶光学厚度:

$$\tau_a(\lambda) = \alpha \lambda^{-\beta} \quad (2)$$

其中: $\tau_a(\lambda)$ 是某一波长(μm)的气溶胶光学厚度, β 是埃斯特朗指数,它与气溶胶的平均粒径有关, α 是浑浊度系数,它与粒子浓度有关。

根据何立明等^[20]的研究,MODTRAN中水平气象视距参数与 $1/\tau_{550}$ 存在很好的线性关系,并与气溶胶类型(乡村、城市、海洋)和季节变化(春夏、秋冬)有关。具体的经验公式表示为:

$$\text{VIS} = \frac{1}{\tau_{550}} - \frac{b}{a} \quad (3)$$

其中:VIS是水平气象视距(km), τ_{550} 是550 nm处的气溶胶光学厚度, a 、 b 为经验系数,具体取值请参见文献^[20]。

根据地面同步实验Microtops太阳光度计测量得到的440和870 nm气溶胶光学厚度,由式(2)得到 τ_{550} ,就可以得到卫星过境时定标场地的水平气象视距。另外,MODTRAN输入大气参数中 CO_2 体积混合比采用IPCC2011发布的数据390 ppmv。臭氧含量来自美国Aura卫星OMI臭氧探测器数据(http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead_v8.html)。通过对地面同步试验获取数据分析和处理,得到MODTRAN中所需定标场地输入大气参数,见表1。

3 定标系数计算

3.1 辐射传输计算

MODTRAN(中光谱分辨率大气辐射传输模

式)是近 30 a 发展起来的一种国际公认的大气辐射传输模式与算法,是在对 LOWTRAN(低光谱分辨率大气辐射传输模式)改进的基础上发展而来的。MODTRAN 充分考虑了二氧化碳、水汽、臭氧等微

量和痕量气体与气溶胶的吸收和散射作用,模式本身提供了多种标准大气、痕量气体参数以供选择。输入参数共分 5 类:控制运行参数、传感器的参数、大气参数、观测几何条件和地表参量^[21-22]。

表 1 各定标场地辐射传输模型输入大气参数
Table 1 Atmospheric inputs of radiance transfer model at each calibration site

参数	北京市少年宫	北京市房山翻耕农田
太阳天顶角/°	71.25	53.44
垂直水汽柱含量/g·cm ⁻²	0.25	0.1
臭氧含量/ATM-cm	0.37	0.365
CO ₂ 体积混合比/ppmv	390	390
大气模式	中纬度冬季	中纬度冬季
气溶胶类型	城市型	乡村型
水平气象视距/km	30.25	33.034401
目标高度/km	0.05	0.072

在已知大气参数的情况下(大气廓线、AOD、水汽),把测得的地面反射率、大气参数(表 1)以及卫星几何参数等输入 MODTRAN 4 辐射传输模型,运行得到 350~2 500 nm 波长之间 1 nm 间隔的传感器入瞳处表观辐亮度。

3.2 光谱响应函数模拟

国外针对高光谱传感器在轨定标研究中,往往采用高斯型函数构建各通道的光谱响应函数,如 EO-1 卫星上的 Hyperion 高光谱传感器和 AVIRIS 航空成像光谱仪^[13]。天宫一号高光谱成像仪没有提供各通道的光谱响应函数,本文根据高光谱成像仪各通道的中心波长和波段宽度构建高斯函数,与辐射传输模型计算的表观辐亮度卷积运算,依次计算得到高光谱成像仪每个通道的等效表观辐亮度。

$$L_{eq}(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSF(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSF(\lambda) d\lambda} \tag{4}$$

其中: $L_{eq}(\lambda_i)$ 为卷积后的等效表观辐亮度, $L(\lambda)$ 为 MODTRAN 模拟出的 1nm 间隔的表观辐亮度,

$RSF(\lambda)$ 为高斯型光谱响应函数。

3.3 卫星对应像元值获取与定标系数计算

天宫一号高光谱影像分为 0B、L1 和 L2 3 种产品,0B 级数据是原始 DN 值图像,L1 级数据是经过辐射校正和 SMILE 校正的表观辐亮度产品,L2 级数据是在 L1 级基础上经系统几何校正得到的遥感产品。本文定标修正系数的获取使用的是 2012 年 3 月 6 号 L1 级辐亮度图像,本次研究只针对可见近红外通道 410~1 030 nm 之间的 66 个有效波段,短波红外通道 930~2 510 nm 之间的 70 个有效波段进行辐射定标。首先,根据地面同步试验地点位置找到影像上对应像元,选出地物类型均匀的 4×4 大小的区域,提取出对应像元值,并计算平均像元值。然后,假设高光谱成像仪各通道成线性响应,且已经消除暗电流,建立定标场地等效表观辐亮度 $L_{eq}(\lambda)$ 与天宫一号高光谱 L1 级数据对应像元的辐亮度值 $L_p(\lambda)$ 的关系,得到各通道的定标修正系数 $A(\lambda)$,结果见图 4。

$$L_{eq}(\lambda) = A(\lambda) \cdot L_p(\lambda) \tag{5}$$

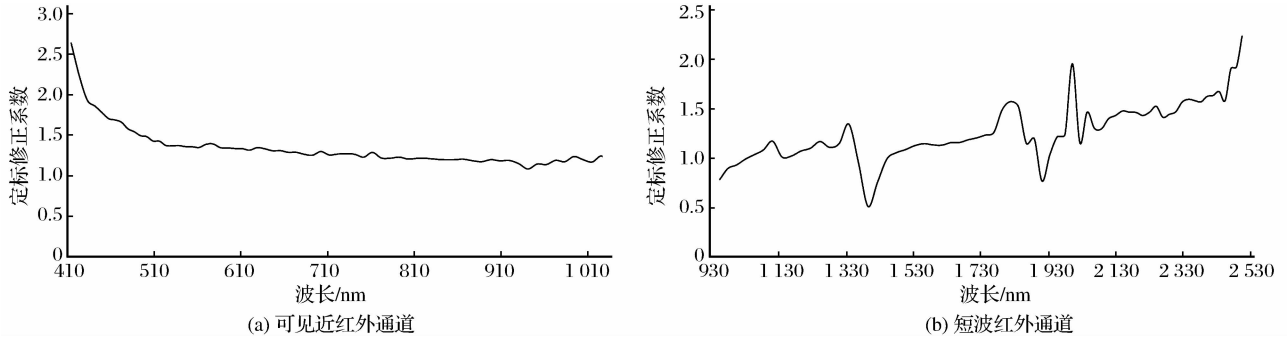


图 4 可见近红外和短波红外各通道定标修正系数
Fig. 4 Calibration correction coefficients of VNIR and SWIR channels

对图 4 各通道定标修正系数分析看出,由于星地间差异等影响,天宫一号升空后高光谱可见近红外和短波红外各通道都出现了一定程度的变化。其中,波长较短的 410~440 nm 与波长较长的2 470~2 510 nm 之间的几个通道变化较大,相对差异达到了 50%以上。其他各通道也有不同程度衰减,衰减幅度相对较小,但也均超过了 10%。

4 定标系数验证

在定标修正系数得到应用之前,需要经过验证,以确保天宫一号影像定量化应用的准确可靠性。本次研究以 2012 年 2 月 3 日天宫一号过境北京时的地面同步试验测量数据来验证修正系数的准确性。首先,采用 2012 年 3 月 6 日得到的修正系数,对 2 月 3 日天宫一号 L1 级高光谱影像进行辐射定标,

得到表观辐亮度影像,并根据地面同步试验位置找出影像上验证试验场地对应像元,提取出 3×3 的像元值,做平均处理得到天宫一号影像对应像元值。然后利用地面测量得到的地面反射率和大气参数值,通过 MODTRAN 辐射传输模型计算得到对应的等效表观辐亮度。对天宫一号辐亮度像元值与两个表观辐亮度进行比较,检验定标修正系数的精度,结果见图 5,定标前后相对误差具体波段数量统计见表 2。可以看出定标后的表观辐亮度精度大大提高,定标前可见近红外大部分通道相对误差在 15%以上,最大可达 54%,定标后最大误差降到了 14.6%,平均相对误差从 18.17%降到了 8.02%;短波红外通道在定标前有 47 个通道相对误差大于 15%,定标后降到了 21 个,且大部分位于水汽吸收通道,平均相对误差从 35.63%下降到了 16.39%。

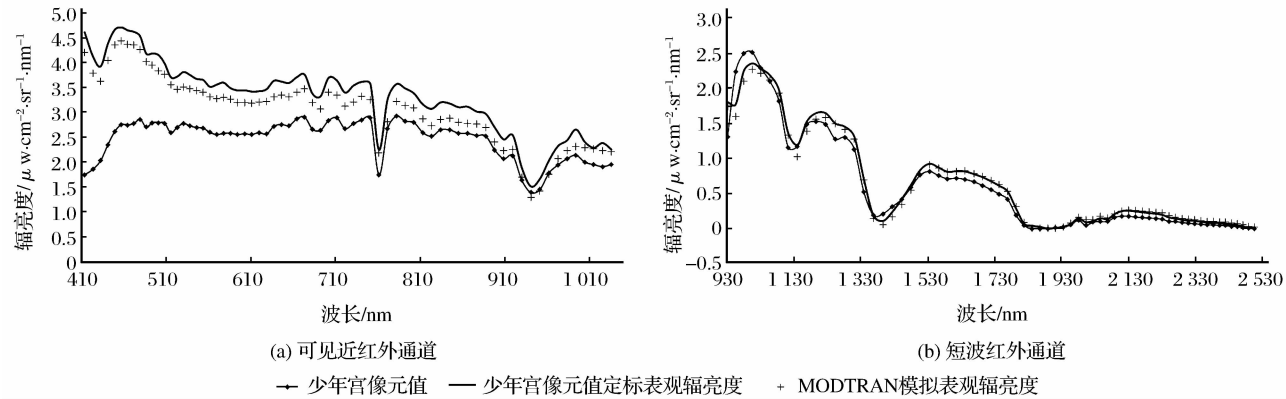


图 5 天宫一号辐亮度像元值、定标表观辐亮度与 MODTRAN 模拟表观辐亮度对比图

Fig. 5 Comparison of three apparent radiances

表 2 定标前后相对误差区间统计

Table 2 Statistics of relative errors before and after calibration

相对误差		<10%	10%~15%	>15%	平均相对误差/%
可见近红外	定标前	21	11	36	18.17
	定标后	56	12	0	8.02
短波红外	定标前	10	11	47	35.63
	定标后	36	11	21	16.39

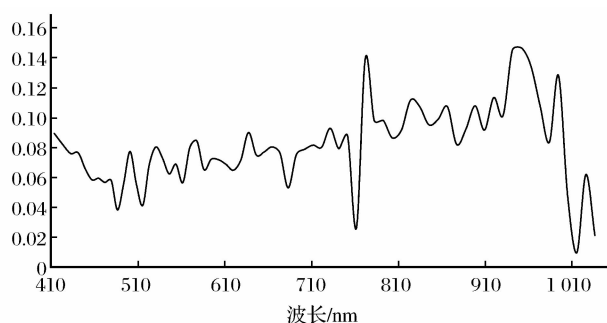
分析定标后图像表观辐亮度同 MODTRAN 模拟表观辐亮度对比图(图 5)及其相对差异曲线(图 6),可以发现,两者曲线具有较好的一致性。可见近红外所有通道的相对误差在 15%以下,且在绝大多数通道,两者的相对误差小于 10%;有 12 个波段大于 10%,且全部分布在 770 nm 以外的气体吸收通道。短波红外各通道由于地面反射亮度低以及受大气影响比较大,此通道内误差比可见近红外通道误差稍大,但也有半数的通道相对误差在 10%以

下,误差较大通道同样主要分布在 1 395、1 840~1 890 nm 之间的水汽吸收通道。

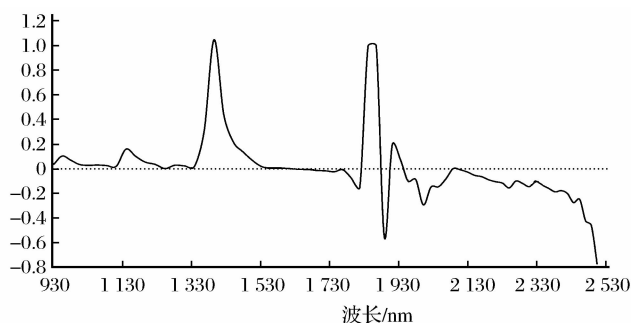
5 结 语

通过反射率基法对天宫一号高光谱成像仪可见近红外和短波红外各通道进行在轨辐射定标,并对定标系数进行检验研究,实现了天宫一号高光谱成像仪的绝对辐射定标,主要结论如下:

(1)通过选择定标场地以及设计地面同步试验,



(a) 可见近红外通道相对误差



(b) 短波红外通道相对误差

图 6 图像定标表观辐亮度与 MODTRAN 模拟表观辐亮度相对误差

Fig. 6 Relative errors of two apparent radiances

利用反射率基法对天宫一号高光谱成像仪进行了在轨辐射定标,得到了各通道的定标修正系数,对实验室和星上定标系数进行了校正,满足了天宫一号影像定量应用的需求,有助于提高天宫一号数据应用水平。

(2)通过地面同步试验对定标修正系数验证,结果显示,定标修正系数大大提高了图像精度,并且天宫一号影像定标结果与验证数据具有较好的一致性,在绝大多数通道,两者的相对误差小于 10%。相对误差较大的通道主要分布在臭氧、水汽等气体吸收波段。从整体上来看,可见近红外通道比短波红外通道定标结果要好,主要是由于天宫一号过境时间与 MODIS 过境时间有较大差异,用 MODIS 数据反演的大气参数存在较大的误差,而短波红外通道辐亮度对大气水汽柱等参数相对敏感引起的。

(3)由于传感器幅宽以及地面同步试验可选地点等条件所限,本次研究只利用了一个定标场地数据,对天宫一号高光谱传感器进行在轨辐射定标。后续将尽量选择更理想的多个地面定标场,对天宫一号高光谱成像仪进行多点定标,进一步提高辐射定标精度。

致谢:本论文由载人航天工程天宫一号民用试应用项目支持,感谢中国科学院空间科学与应用总体部有效载荷应用中心为本研究提供天宫一号高光谱成像仪数据产品!

参考文献 (References):

- [1] 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.]
- [2] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, *et al.* Reflectance and Radiance based Methods for the In-flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22(1): 11-37.
- [3] Thome K J, Helder D L, Aaron D, *et al.* Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ Absolute Radiometric Calibration Using the Reflectance based Method[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2004, 42(12): 2777-2785.
- [4] Biggar S F, Thome K J, Wisniewski W. Vicarious Radiometric Calibration of EO-1 Sensors by Reference to High-reflectance Ground Targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(6): 1117-1174.
- [5] Thome K J, Arai K, Tsuchida S, *et al.* Vicarious Calibration of Aster via the Reflectance-based Approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3285-3329.
- [6] Biggar S F, Dinguirardm C, Gellmand I, *et al.* Radiometric Calibration of SPOT 2 HRV—A Comparison of Three Methods [J]. The International Society for Optical Engineering, 1991, 1493: 155-162.
- [7] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Radiometric Calibration for HJ-1A Hyper-spectrum Imager and Uncertainty Analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2826-2833. [高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 高光谱成像仪在轨辐射定标及不确定性分析[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2826-2833.]
- [8] Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Radiometric Calibration and Validation of CCD Cameras on HJ-1 Satellite[J]. Remote Sensing Thchnology and Application, 2011, 26(5): 684-688. [巩慧, 田国良, 余涛, 等. HJ-1 星 CCD 相机场地辐射定标与真实性检验研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 684-688.]
- [9] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* HJ-1A HSI On-orbit Radiometric Calibration and Validation Research[J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 40(11): 1312-1321. [高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 环境卫星 HJ_1A 高光谱成像仪在轨辐射定标及真实性检验[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(11): 1312-1321.]
- [10] Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Vicarious Radiometric Calibration and Validation of CBERS-02B CCD Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(1): 1-12. [巩慧, 田国良,

- 余涛,等. CBERS-02B 卫星 CCD 相机在轨辐射定标与真实性检验[J]. 遥感学报, 2010, 14(1): 1-12.]
- [11] Zhang Yong, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Radiometric Cross-calibration of CBERS-02 IRMSS Thermal Channel[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(4): 261-266. [张勇, 顾行发, 余涛, 等. 中巴地球资源卫星热红外通道的交叉辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(4): 261-266.]
- [12] Zhang Yuxiang, Zhang Guangshun, Huang Yifin, *et al.* In-flight Vicarious Radiometric Calibration for VIS-NIR Channels of FY-1C Satellite Sensor at Dunhuang Site[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(6): 740-747. [张玉香, 张广顺, 黄意珍, 等. FY-1C 遥感器可见近红外各通道在轨辐射定标[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 740-747.]
- [13] Li Yuan, Zhang Yong, Liu Jingjing, *et al.* Calibration of the Visible and Near-infrared Channels of the FY-2C/ FY-2D GEO Meteorological Satellite at Radiometric Site[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 29(1): 41-46. [李元, 张勇, 刘京晶, 等. 风云二号静止气象卫星可见光通道辐射校正场定标方法研究[J]. 光学学报, 2008, 29(1): 41-46.]
- [14] Huang Miaofen, Xing Xufeng, Song Qingjun, *et al.* Radiometric Calibration Coefficients for "Beijing-1" Small Satellite Multispectral CCD Sensors by Reflectance-based Method[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 509-514. [黄妙芬, 邢旭峰, 宋庆君, 等. 反射率基法获取北京一号小卫星多光谱 CCD 辐射定标系数[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 509-514.]
- [15] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* HJ1A/HSI Radiometric Calibration and Spectrum Response Function Sensitivity Analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(11): 3149-3155. [高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 环境卫星 HJ1A 高光谱成像仪在轨辐射定标及光谱响应函数敏感性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 3149-3155.]
- [16] Gu Mingli. Methods for the In-flight Absolute Radiation Calibration of Space-borne Remote Sensing[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2000, 21(1): 16-23. [顾名澧. 星载遥感器在飞行时的绝对辐射定标方法[J]. 航天返回与遥感, 2000, 21(1): 16-23.]
- [17] Thome K J. Absolute Radiometric Calibration of Landsat 7 ETM+ Using the Reflectance-based Method[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(1/2): 27-38.
- [18] Hu Xiuqing, Zhang Yuxiang, Qiu Kangmu. In-Flight Radiometric Calibration for VIR Channels of FY-1C Satellite Sensor by Using Irradiance based Method [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(6): 458-464. [胡秀清, 张玉香, 邱康睦. 采用辐照度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标[J]. 遥感学报, 2003, 7(6): 458-464.]
- [19] Jiang Xiulan, Liu Yuguang, Liu Yahao, *et al.* Five Channel Hand-held Sunphotometer[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2007, (3): 54-58. [蒋秀兰, 刘玉光, 刘亚豪, 等. 手持式五波段太阳光度计[J]. 气象水文海洋仪器, 2007, (3): 54-58.]
- [20] He Liming, Wang Hua, Yan Guangjian, *et al.* Analysis and Application for the Empirical Relative between Aerosol Optical Depth and Horizontal Meteorological Range[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(5): 372-378. [何立明, 王华, 阎广建, 等. 气溶胶光学厚度与水平气象视距相互转换的经验公式及其应用[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 372-378.]
- [21] Wu Beiyang, Li Wei, Chen Hongbin, *et al.* Practical Algorithm on Atmospheric Radiative Transfer [M]. Beijing: Petrological Press, 1998: 21-65. [吴北婴, 李卫, 陈洪滨, 等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 21-65.]
- [22] Liu Yonghong, Quan Weijun, Xia Xiang'ao, *et al.* Net Surface Solar Radiation in the Clear Sky based on Modtran Model and Satellite Data[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(6): 1410-1415. [刘勇洪, 权维俊, 夏祥鳌, 等. 基于 MODTRAN 模式与卫星资料的晴空净太阳辐射模拟[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1410-1415.]

Radiometric Calibration and Validation of TG-1 Hyper-spectral Imager

Li Zhenwang^{1,2}, Liu Liangyun¹, Zhang Hao¹, Zhang Jiuxing³, Li Xuzhi³

(1. Key Laboratory of Digital Earth Sciences and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Technology and Engineering Center for Space(Utilization),
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: TG-1, the first Chinese space laboratory module launched on 29 September 2011, has accumulated large numbers of high-resolution image data by the hyper-spectral imager. However, these images still can't be applied to quantitative analysis because of the huge spectral and radiance difference between

ground and onboard conditions. So a radiometric calibration is very necessary to correct these laboratory and on-board radiance calibration parameters for better quantitative application. This paper aims to calibrate TG-1 hyper-spectral imager using reflectance-based calibration method through performing ground calibration experiments on 3 February and 6 March 2011. Firstly, this study used the ground experiment data on 6 March to obtain each channel's calibration correction coefficients, which were different a lot from laboratory and on-board ones, relative error in all channels are bigger than 10 percent. Then, the calibration experiment data on 3 February 2011 were used to validate the result. Results show that calibration correction coefficients improved the image accuracy, the calibration and validation experiments' results are in good agreement. In most channels, the relative errors are less than 10 percent, except that bigger error appears in absorption channels. Therefore, this calibration experiment renewed the calibration coefficients, and improved the quantitative level of the TG radiance products.

Key words: Radiometric Calibration; Correction coefficients; Reflectance-based method; MODTRAN; TG-1; Hyper-spectral imager; Validation

第二届高分辨率对地观测学术年会

- 一、会议背景及主题
- 高分辨率对地观测学术年会(China High Resolution Earth Observation Conference)是一个开放的学术交流平台。旨在交流思想观点,分享研究成果,营造学术氛围,进一步开拓思路,发现人才,推动理论创新和技术进步,促进产学研合作与交流,支持我国高分辨率对地观测事业持续健康发展。
- 年会主题:精确感知、创新应用。
- 二、会议时间地点
- 年会将于 2013 年 12 月在北京召开。
- 三、会议征文方向
1. 天基对地观测技术
2. 临近空间对地观测技术
3. 航空对地观测技术
4. 地面系统与应用技术
- 四、征文要求
1. 论文评选规则、模板、提交方式详见会议网站(WWW. CHREOS. ORG),会议不接受其它方式投稿;
2. 论文摘要提交截止时间:2013 年 10 月 20 日;全文提交截止时间:2013 年 10 月 30 日。