

基于超光谱成像仪 Hyperion 的交叉定标方法

徐文斌 郑小兵 易维宁

(中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 介绍了一种新的交叉定标方法。利用超光谱成像仪 Hyperion 为参考传感器,以 Terra/MODIS 为待定标传感器,选择敦煌场为目标,考虑了交叉定标过程中视场、时相、几何和光谱等要素的匹配,并预测了 MODIS 14 个通道的入瞳辐亮度。将预测值与对应通道的实测值进行了比较。结果表明,13 个通道的差异不超过 7.7%,第 9 通道的差异为 11.9%。交叉定标合成不确定度优于 7.7%。初步验证了这一新方法的原理可行性。

关键词 遥感;交叉定标;超光谱;匹配;不确定度

中图分类号 TP79; TP701

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201333.0528002

Cross-Calibration Method Based on Hyperspectral Imager Hyperion

Xu Wenbin Zheng Xiaobing Yi Weining

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract A new cross-calibration method is proposed. In this method, hyperspectral imager Hyperion is used as reference sensor, Terra and MODIS are used as sensor to be calibrated, and Dunhuang site is selected as target, with matching elements including field, time, geometry and spectrum considered in the process of cross-calibration. At-sensor radiances of fourteen bands of MODIS are predicted, and the predicted values are then compared with the measured values of corresponding bands. The results show that the differences of thirteen bands are no more than 7.7%, and the difference of the ninth bands is 11.9%. The total uncertainties of cross-calibration are superior to 7.7%. The principle feasibility of the new method is validated.

Key words remote sensing; cross-calibration; hyperspectral; matching; uncertainty

OCIS codes 120.0280; 120.5630; 120.6200; 010.1290

1 引 言

卫星传感器在空间运行过程中的衰变是不可避免的,为保障实现传感器预期的科学目标和应用目标,需要在其运行期间开展持续的定标和数据校验^[1]。

目前大多数卫星传感器的在轨辐射定标采用场地定标方法^[2],即在卫星飞越辐射校正场时,同步测量地表和大气辐射参数,利用辐射传输模型获得传感器入瞳辐亮度,进而求得定标系数。场地定标方法应用较早、技术成熟且效果稳定,已发展出反射率基法、辐照度基法和辐亮度基法等多种技术方案^[3]。场地定标方法的组织实施较为复杂,需要多个专业

实验人员协同完成一次试验。由于受到天气条件的限制,场地定标的数据时效性难以保证,定标系数的更新频次低,也无法对历史数据进行定标。

近年来随着卫星遥感器数量的不断增加及其功能的不断细化,场地定标的效费比局限性日益凸显。交叉定标方法作为一种新型、高效率的在轨定标方法得到了发展,其基本思路是:以一个已良好定标的在轨传感器作为参考,通过观测目标、视场、时相、几何和光谱等条件的匹配处理,实现待定标传感器的辐射定标^[3]。交叉定标能够实现高频次且低成本的在轨性能评价和数据产品校验,提供长期稳定的辐射定标系数,并且可以对历史数据进行定标。实现

收稿日期: 2012-12-05; **收到修改稿日期:** 2013-01-18

基金项目: 民用航天“十二五”预先研究项目(D040103)资助课题。

作者简介: 徐文斌(1986—),男,博士研究生,主要从事卫星遥感器高精度定标方面的研究。E-mail: wbxu@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学遥感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzhen@aiofm.ac.cn

交叉定标需要满足的一般条件如下:

1) 视场条件: 理想情况视场应完全相同, 一般满足空间分辨率和扫描幅宽相近即可, 并且视场中都包含观测目标;

2) 时相条件: 理想情况应同时过境同一目标, 一般满足过境时间差异较小即可, 以减少太阳入射角度和大气条件变化的影响;

3) 几何条件: 理想情况应以相同角度观测目标, 一般情况允许观测角度有一定程度的差异, 观测角度的差异会带来双向反射分布函数(BRDF)^[4]影响和大气辐射传输路径的变化, 需要进行相应修正;

4) 光谱条件: 匹配通道理想情况应具有相同的光谱响应函数, 一般选择光谱响应函数相似、通道中心波长相近的两个通道。

参考传感器的选择是实施交叉定标的基础。超光谱传感器因其工作谱段宽和光谱分辨率高的优势, 不仅能为各类环境要素的数据产品开发提供充分的数据来源, 也非常有利于作为多光谱和高光谱遥感器的交叉定标参考, 其应用于交叉定标的潜力值得探索。目前世界上在轨运行的超光谱传感器有 Hyperion 和 SCIAMACHY 等, 其中 Hyperion 是美国 EO-1 卫星上搭载的世界上首颗在轨运行的超光谱传感器^[5], 工作谱段范围 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 共有 220 个通道, 平均光谱分辨率为 10 nm, 空间分辨率为 30 m, 扫描幅宽为 7.5 km, 星上绝对定标精度达到 3.4%^[6]。

目前, 关于交叉定标国内外已有较多研究报道。国外 Teillet 等^[7,8]利用 Landsat 7/ETM+ 交叉定标 Landsat 5/TM, 讨论了匹配通道光谱差异对光谱匹配因子的影响, 同时提出了基于大面积相同地物图像统计的分析方法; Thome 等^[9]以 Landsat-7/ETM+ 为参考传感器, 预测 EO-1/Hyperion 等 4 颗传感器入瞳辐亮度再与其实测辐亮度进行比较, 结果表明可见近红外波段差异小于 10%, 短波红外波段差异小于 20%; 刘京晶等^[10]利用 Terra/MODIS 交叉定标 FY1D/MVIRS, 构建了 BRDF 模型修正敦煌地表方向性的影响, 定标精度估计优于 5%。综合来看, 国际上交叉定标研究大多采用多光谱传感器, 且大多未

考虑场地的方向反射特性。本文采用超光谱成像仪 Hyperion 交叉定标 Terra/MODIS^[11], 验证这一交叉定标方法的原理可行性, 为交叉定标提供一种新的技术途径。

2 数 据

2.1 场地描述

敦煌辐射校正场位于中国西北内陆, 场区面积大 ($30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$)、气候干旱少雨、太阳辐射强、能见度高且交通方便, 地表具有均匀稳定的光学特性, 一直作为中国卫星传感器业务化的定标和验证场地^[12], 每年 6~9 月有大量的场地定标活动, 现场测量数据丰富, 因此, 选择 Hyperion 与 MODIS 都过境敦煌场的的数据。

2.2 定标数据

根据轨道预报软件的预报结果, 选择两颗传感器 2012 年 7 月 6 日过境敦煌场的的数据作为定标数据, 当天有地表和大气的实测数据, 图 1 为敦煌场区图像, 表 1 为两颗传感器过境时间及照明观测几何条件。两颗传感器过境场地时相差异只有 20 min, 满足这一新的交叉定标方法对于时相差异的要求。由图 1 可知卫星过境时刻天空晴朗无云, 适合做交叉定标。

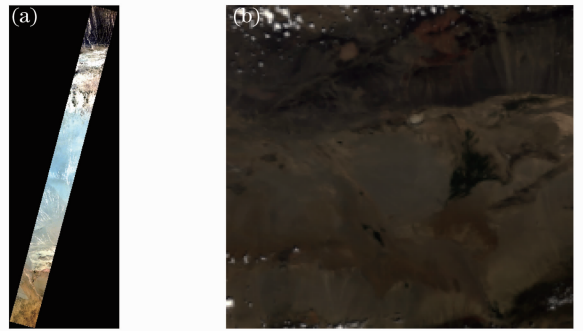


图 1 2012 年 7 月 6 日 Hyperion 与 MODIS 观测敦煌场区图像。(a) Hyperion 的 37、23、11 通道合成图; (b) MODIS 的 1、4、3 通道合成图

Fig. 1 Images of Hyperion and MODIS when they viewed Dunhuang site on 6th July, 2012. (a) Synthesized image of 37th, 23rd, 11st channels of Hyperion; (b) synthesized image of 1st, 4th, 3rd channels of MODIS

表 1 EO-1 与 Terra 过境敦煌场的时间及照明观测几何条件

Table 1 Overpass time and view geometry condations when EO-1 and Terra overpassed Dunhuang site

Satellite	Overpass time	Solar zenith angle / (°)	Solar azimuth angle / (°)	View zenith angle / (°)	View azimuth angle / (°)
EO-1	2012-07-06T12:16	26.2	124.8	23.4	284.8
Terra	2012-07-06T12:36	23.0	134.1	7.0	104.0

3 交叉定标方法

3.1 总体技术流程

以超光谱成像仪 Hyperion 交叉定标 Terra/MODIS 的技术流程如图 2 所示,首先对选取的图像对进行视场匹配,提取 Hyperion 和 MODIS 图像上同一目标的辐亮度值,然后根据 Hyperion 表观 (TOA) 辐亮度谱通过光谱匹配、BRDF 修正预测 MODIS 入瞳辐亮度,最后将实测值与预测值进行比较评估定标结果。这一技术流程需要解决的关键问题有视场匹配、几何匹配 (BRDF 修正) 和光谱匹配。

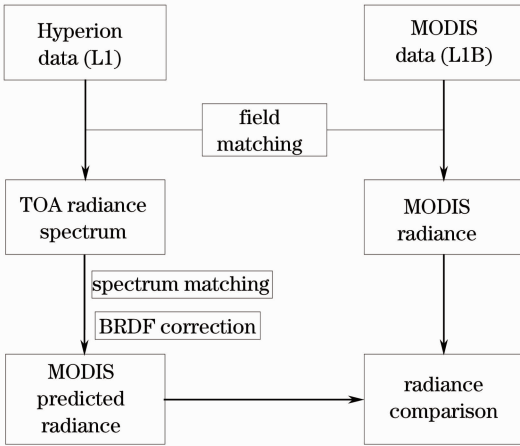


图 2 Hyperion 与 MODIS 交叉定标技术流程图

Fig. 2 Flowchart of the cross-calibration procedure between Hyperion and MODIS

3.2 视场匹配

采用基于图像对之间相同地物的图像统计的分析方法^[7]满足视场匹配的需要,对于选取的交叉定标图像对,首先需要裁剪出敦煌场区图像,再根据两颗传感器扫描幅宽设定匹配区域面积为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,目标中心经纬度为 $(40.13\text{N}, 94.34\text{E})$ 。MODIS 空间分辨率为 1 km ,匹配区域正好对应一个像元大小,但不重合。以中心经纬度所在像元为中心选取 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 矩阵进行统计分析,相对偏差小于 1% 。所以以中心经纬度所在像元值为匹配区域辐射值是合理的。Hyperion 空间分辨率为 30 m ,以 Hyperion 图像上中心经纬度所在像元为中心,选取 $34 \text{ pixel} \times 34 \text{ pixel}$ 像元矩阵满足区域选择要求。视场匹配区域空间均匀性对传感器间的交叉定标特别重要,因为可以最小化匹配不准的影响。变异系数 (CV) 是表观辐亮度的标准偏差 $\sigma(\lambda)$ 与平均值 \bar{L} 的比值, CV 值越小,场区的空间均匀性越好,交叉定标一般要求选用 CV 值小于 3% 的场地^[13]。不同波长 λ 的 CV 值 $V_c(\lambda)$ 表示为

$$V_c(\lambda) = |\sigma(\lambda)/\bar{L}(\lambda)| \times 100\% \quad (1)$$

计算 Hyperion 图像选取区域各通道 CV 值,如图 3 所示。由图 3 可知,这一区域在整个太阳反射波段空间均匀性小于 3% ,满足交叉定标对于场地均匀性的要求。

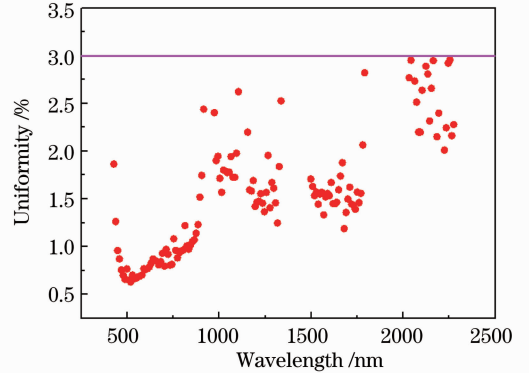


图 3 敦煌匹配区域均匀性评估

Fig. 3 Uniformity evaluation of the matching area of Dunhuang site

3.3 光谱匹配

设 Hyperion 测得的表观辐亮度谱为 $L(\lambda)$, MODIS 第 i 通道相对光谱响应函数为 $R_i(\lambda)$, $\Delta_{i,\text{BRF}}$ 为第 i 通道地表双向性修正因子,则有第 i 通道入瞳处的等效辐亮度 L_i 为

$$L_i = \frac{\int L(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\int R_i(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{1}{\Delta_{i,\text{BRF}}} \quad (2)$$

对于相对光谱响应函数,考虑三种情况:脉冲函数、高斯函数和实际函数,目的是分析不同的光谱响应函数对交叉定标结果的影响,也为在交叉定标其他高光谱载荷的过程中缺乏通道光谱响应函数的情况提供参考。表 2 为脉冲函数、高斯函数和实际函数的说明。

将 Hyperion 所测表观辐亮度谱 $L(\lambda)$ (如图 4 所示) 和不同相对光谱响应函数代入 (2) 式,暂时不考虑 BRDF 影响,设 $\Delta_{i,\text{BRF}} = 1$, 得到表 3 和图 5 所示结果。MODIS 太阳反射谱段有 20 个通道目前可用 14 个,表 3 中 L_M 为 MODIS 实测入瞳辐亮度, L_I 为采用脉冲函数预测的入瞳辐亮度, L_G 为采用高斯函数预测的入瞳辐亮度, L_A 为采用实际函数预测的入瞳辐亮度。由表 3 和图 5 可知光谱响应函数对于光谱匹配结果有显著的影响:

1) 采用脉冲函数结果与实测值的差异最大可达 46% , 差异在 20% 以上的通道为 18、19 通道,这两个通道位于大气水汽吸收带,采用高斯函数和实

表 2 三种光谱响应函数说明

Table 2 Description of three spectra response function

Function	Formula	Band width	Remark
Impulse	1 $\lambda = \lambda_i$ 0 $\lambda \neq \lambda_i$	Individual spot	λ_i is central wavelength
Gaussian	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(\lambda - \lambda_i)^2 / (2\sigma^2)]$	$2\tau_{w_{1/2}}$	$\sigma = \frac{\tau_{w_{1/2}}}{2 \sqrt{2 \ln 2}}$
Actual	—	—	Measured by SPMA ^[14]

表 3 三种光谱响应函数定标结果比较

Table 3 Comparison between calibration results of three spectra response function

Band	Central wavelength /nm	Measured $L_M / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Predicted $L_1 / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Predicted $L_G / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Predicted $L_A / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Difference /%		
						$(L_M - L_1) / L_M$	$(L_M - L_G) / L_M$	$(L_M - L_A) / L_M$
1	657.29	106.3399	99.8271	102.9921	103.0247	6.1	3.2	3.1
2	861.66	69.8895	67.5421	66.1040	66.9712	3.4	5.4	4.2
3	459.81	114.3273	97.9622	101.1135	101.3844	14.3	11.6	11.3
4	549.79	115.6892	109.5403	109.9316	109.9198	5.3	5.0	5.0
5	1244.6	37.3331	32.3412	30.8125	31.9010	13.4	17.5	14.6
6	1627.7	22.1491	20.5224	19.9204	19.9953	7.3	10.1	9.7
7	2102.3	7.8802	8.0216	7.7833	7.8960	-1.8	1.2	-0.2
8	415.64	107.4614	99.1208	107.9535	106.3630	7.8	-0.5	1.0
9	441.72	107.0233	89.6454	89.8050	89.9604	16.2	16.1	15.9
10	488.67	109.0944	102.6306	104.4784	104.0006	5.9	4.2	4.7
11	529.95	113.8647	108.2593	107.5458	107.6453	4.9	5.6	5.5
17	901.83	52.2090	45.2717	45.6835	45.6148	13.3	12.5	12.6
18	935.84	19.2977	14.6088	19.5301	18.4493	24.3	-1.2	4.4
19	939.90	28.8491	15.6383	27.8774	26.3134	45.8	3.4	8.8

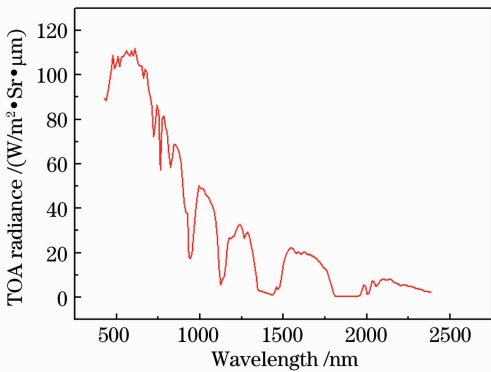


图 4 Hyperion 所测表观辐亮度曲线

Fig. 4 TOA radiance curve measured by Hyperion

际光谱响应函数后,大气吸收波段结果得到修正,所以在大气吸收波段采用脉冲函数不适合;总体来看,在非大气吸收波段,三种光谱响应函数结果相差不大,采用实际函数和高斯函数结果(它们之间的差异非常小)更接近于实测值;但在部分波段,脉冲函数结果甚至更接近于实测值。所以在交叉定标过程中,脉冲函数也有其适用的空间。这一结果也为其

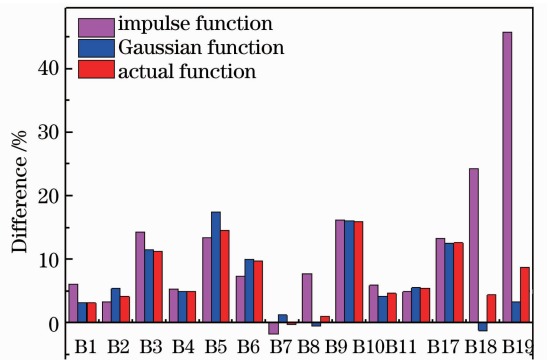


图 5 三种函数预测值与实测值差异

Fig. 5 Differences between predicted radiances of three functions and sensor measurements

他高光谱成像仪交叉定标提供参考;在非大气吸收波段,有实际光谱响应函数优先使用,无实际光谱响应函数采用高斯函数,通道数目多的情况可以考虑采用脉冲函数;在大气吸收波段,有实际光谱响应函数优先使用,无实际光谱响应函数采用高斯函数。

2) MODIS 各通道实测值 L_M 较实际函数预测

值 L_A 偏大,通道 3、5、6、9、17、19 差异在 8%~16% 之间,主要原因可以归结为这些通道受地表 BRDF 影响显著,由敦煌场以往的 BRDF 研究可知敦煌场反射率随着观测角度的变化而变化^[10],而本次交叉定标两颗卫星的观测几何正好处于前向、后向的观测状态,观测角度差异明显,所以需要 BRDF 影响进行修正。

3.4 BRDF 修正

由 Hyperion 和 MODIS 当天过境敦煌场的观测几何条件可以得到两颗传感器观测方位角相差 182°, MODIS 为后向观测,Hyperion 为前向观测,



这种情况需要修正 BRDF 的影响。本文所使用的 BRDF 数据为 2011 年 8 月 24 日敦煌外场试验测得,试验当天天空无云、天气晴朗且能见度高。

3.4.1 BRDF 测量系统

BRDF 测量系统由自动多角度测量架和光谱仪组成,测量架由天顶弧轨道、方位圆轨道、同步齿形带和电机等组成^[15],如图 6 所示。天顶角扫描范围为 $-70^\circ \sim 70^\circ$ (扫描步长为 14°);方位角扫描范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ (扫描步长为 30°);测量时天顶弧平面与太阳主平面平行时开始测量;每轮测量在 15 min 内完成。

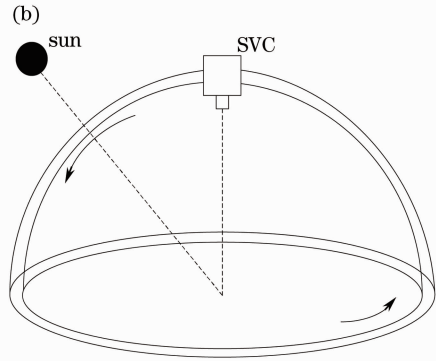


图 6 BRDF 测量系统。(a)实物图;(b)原理图

Fig. 6 BRDF measurement system. (a) Physical diagram; (b) schematic diagram

3.4.2 数据处理与分析

进行 BRDF 修正理论上需要同步的地表 BRDF 测量数据,2012 年 7 月 6 日当天并未进行同步的 BRDF 测量,利用 2011 年 8 月 24 日测量数据前提是需要保证两天地表条件基本相同。将 2011 年 8 月 24 日[Sepectra Vista Corporation (SVC)测]和 2012 年 7 月 6 日[Analytical Spectral Devices Inc. (ASD)测]两天的反射率曲线进行比较,如图 7 所

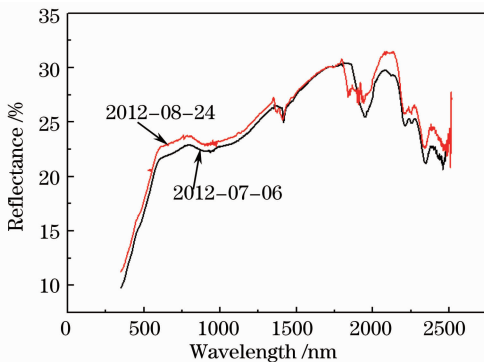


图 7 2011 年 8 月 24 日(SVC)和 2012 年 7 月 6 日(ASD)观测的反射率曲线比较

Fig. 7 Comparison of reflectance observed on 24th August, 2011 (SVC) and 6th July, 2012 (ASD)

示,经计算整个波段反射率平均差异为 3.4%,说明敦煌地表反射率在这两天中的变化不大,地表情况基本一致。

由于地表情况基本相同,应用 2011 年 8 月 24 日的 BRDF 测量模型是可行的,接下来需要考虑太阳照射角度的变化对 BRDF 模型的影响。图 8 为不同时间观测到的反射率曲线,在垂直观测条件下,三条不同观测时间的反射率曲线基本一致,差异小

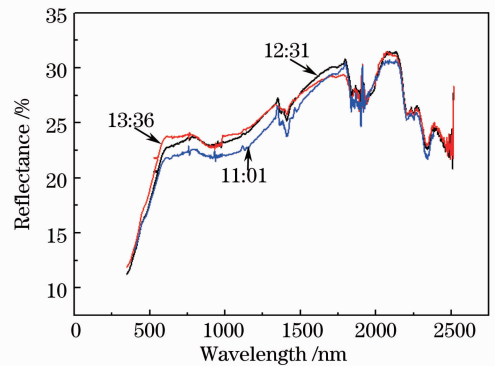


图 8 2011 年 8 月 24 日观测的三轮反射率曲线比较(SVC 垂直观测)

Fig. 8 Comparison of three reflectance curves observed on 24th August, 2011 (SVC vertical observation)

于 3.2%。太阳照明角度的变化在 2 h 内对反射率基本没影响,其他观测条件也有相同的规律,因此在每轮 15 min 的 BRDF 测量过程中可以忽略太阳照射角度的变化对于 BRDF 测量模型的影响。

处理 BRDF 数据,得到 MODIS 各个波段处 BRDF 分布图,由于测量区域良好的对称性,因此只给出半圈分布,如图 9 所示。由图 9 可知,在太阳反射谱段范围内,敦煌场 BRDF 分布在 MODIS 的 459、657、861 nm 波段处具有后向反射率显著大于前向反射率的特点,分别如图 9(a)~(c) 所示。在

MODIS 的 549、935、1244 nm 波段处前向和后向差异并不显著,但有着相同的分布形状,分别如图 9(d)~(f) 所示。MODIS 其他 8 个通道有着相似分布。在此基础上,对 14 个波段都要进行 BRDF 修正,但通过表 3 可知,通道 1、2、4、7、8、10、11、18 定标结果小于 6%,部分通道预测值甚至与实测值一致。对于交叉定标来说,这一定标精度已经很高,不需要再进行 BRDF 修正,只对差异在 8% 以上的 6 个通道进行 BRDF 修正。

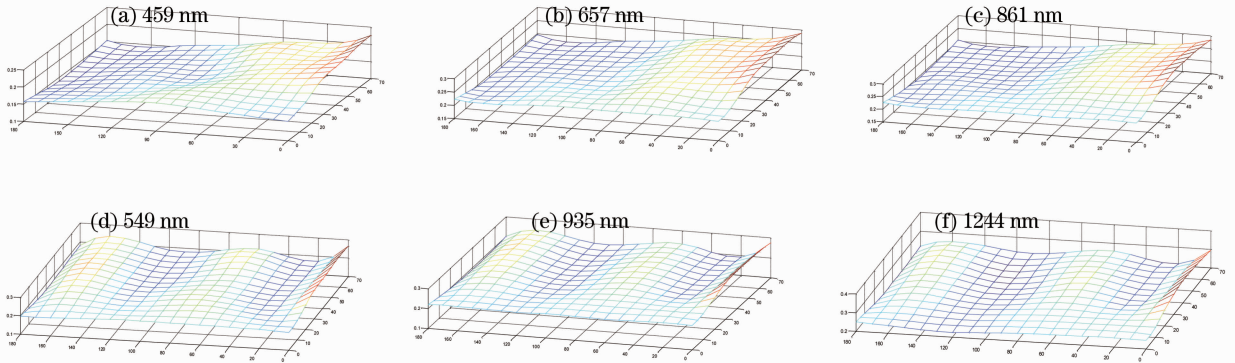


图 9 敦煌场 BRDF 分布

Fig. 9 BRDF distribution of Dunhuang site

采用二维三次样条插值算法获得 6 个通道 MODIS 和 Hyperion 观测方向的地表波段内反射率,再将反射率数据和当天测量的大气参数代入 6S 辐射传输模型^[16] 计算两个方向大气层顶表观辐亮度,利用获得的 Hyperion 观测方向表观辐亮度 $L_{\text{Band-H}}$ 除以 MODIS 观测方向表观辐亮度 $L_{\text{Band-M}}$ 得到 6 个通道 BRDF 修正因子 Δ_{BRF} ,如表 4 所示。将 MODIS 实际函数预测的辐亮度 L_{Λ} 除以 BRDF 修

正因子 Δ_{BRF} 得到 BRDF 修正值 L_{BRF} ,结果如表 5 和图 10 所示。经过 BRDF 修正,6 个通道的差异都得到较大程度的修正,全部差异都减少至 12% 以内, B5、B6 差异甚至减少到 3% 以内,修正取得了良好的效果。14 个通道最终差异结果如图 11 所示,11 个通道差异优于 6%, B3 差异为 -6.1%, B9 差异为 11.9%, B17 差异为 7.7%。

表 4 BRDF 修正因子

Table 4 Correction factors of BRDF

Band	$\rho_{\text{Band-M}}$	$\rho_{\text{Band-H}}$	$L_{\text{Band-M}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	$L_{\text{Band-H}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	Δ_{BRF}
3	0.1792	0.1589	128.922	107.732	0.8356
5	0.1742	0.1526	120.940	100.753	0.8331
6	0.2773	0.2655	18.196	16.754	0.9207
9	0.2277	0.2279	28.710	27.380	0.9536
17	0.2105	0.2132	45.949	43.495	0.9465
19	0.2103	0.2189	34.360	33.181	0.9656

3.5 不确定度分析

依据国际通行的不确定度评估规范^[17],考察了整个交叉定标技术流程中不确定度影响因素的来

源,不确定度影响因素分析如下:

1) Hyperion 绝对定标精度

Hyperion 有完善的星上定标系统,星上绝对定

标精度达到 3.4%^[6]。

2) 时相匹配

表 5 BRDF 修正结果

Table 5 Correction results of BRDF

Band	Central wavelength /nm	Measured $L_M / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Predicted $L_A / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Predicted $L_{BRF} / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	Difference /%	
					$(L_M - L_A) / L_M$	$(L_M - L_{BRF}) / L_M$
3	459.81	114.3273	101.3844	121.3313	11.3	-6.1
5	1244.6	37.3331	31.9010	38.2919	14.6	-2.6
6	1627.7	22.1491	19.9953	21.7175	9.7	1.9
9	441.72	107.0233	89.9604	94.3376	15.9	11.9
17	901.83	52.2090	45.6148	48.1931	12.6	7.7
19	939.90	28.8491	26.3134	27.2508	8.8	5.5

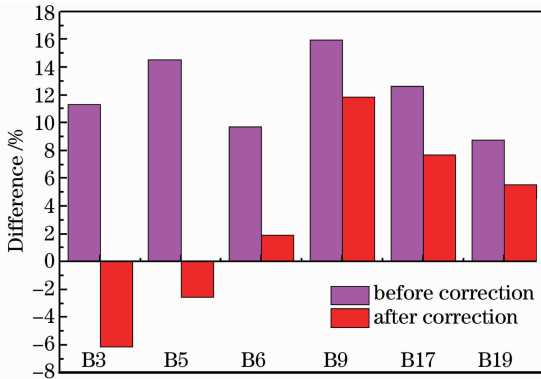


图 10 BRDF 修正前后比较

Fig. 10 Comparison between before and after BRDF correction

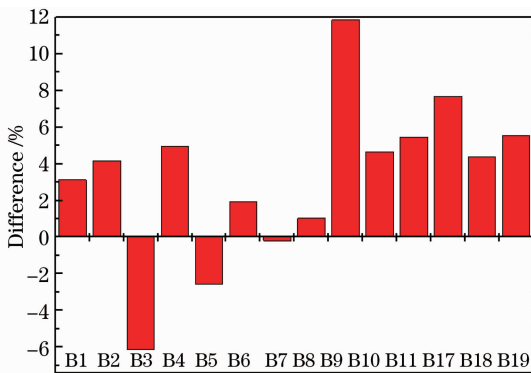


图 11 MODIS 14 个通道最终差异

Fig. 11 Ultima differences of MODIS 14 bands

两颗卫星过境时相差异会带来太阳入射角度、气溶胶光学厚度、气溶胶类型(粒子谱分布、组成和折射指数)和水气臭氧含量等条件的变化。太阳入射角度的变化在 BRDF 修正环节已考虑,由于 Hyperion 和 MODIS 过境时间仅差 20 min,大气总体条件的变化将会是非常小的,当天 CE318 在 12:10~12:50 时间段测得的 550 nm 气溶胶光学厚度数据变化范围为 0.228~0.231,可以反映这一时间段大气是稳定的。以气溶胶光学厚度变化所带来的 Hyperion 观测方向表观辐亮度的变化来评估时

相差异的不确定度贡献,两个时刻 550 nm 气溶胶光学厚度值分别为 0.229(12:16)和 0.230(12:36),需要的其他参数与 Hyperion 过境时条件一致,代入 6S 辐射传输模型分别计算表观辐亮度,差异在 1% 以内,所以时相差异不确定度贡献不超过 1%。

3) 视场匹配

以中心经纬度为中心选取的共同区域只有 1 km²,在 MODIS 图像上选取对应像元,但这一像元并不与选取区域完全重合,以中心经纬度所在像元为中心选取 3 pixel×3 pixel 矩阵进行统计分析,相对偏差小于 1%,Hyperion 图像上选取的区域略大于 1 km²(34 pixel×34 pixel 像元矩阵),这一区域的相对标准偏差(均匀性)经计算小于 3%,在两幅图像上提取目标区域辐射值时都会引入一定的误差,综合以上两个指标得到合成不确定度贡献为 3.2%。

4) 光谱匹配

光谱匹配需要对 Hyperion 所测表观辐亮度谱按光谱响应函数对应波长进行 3 次样条插值,插值结果再与光谱响应函数进行卷积求得 MODIS 通道入瞳辐亮度。以上过程中,插值算法引入的误差是通过比较 Hyperion 实测辐亮度值与算法预测辐亮度值得到,比较结果表明两者间的最大差异小于 1%。以此为根据,插值算法不确定度贡献不超过 1%,MODIS 相对光谱响应函数由光谱测量系统(SPMA)^[14]在实验室测得,测量不确定度贡献不超过 1%,光谱匹配合成不确定度贡献不超过 1.42%。

5) BRDF 修正

BRDF 修正带来的不确定度源包括四个方面:使用非同步 BRDF 数据、大气地表参数的测量、插值算法和 6S 大气辐射传输模型。由于 2012 年 7 月 6 日当天并未进行同步的 BRDF 数据采集,利用了 2011 年 8 月 24 日测量的 BRDF 数据,尽管经过分析得到两天进行测量的地表情况基本一致,15 min

的测量时间内太阳照射角度的变化对 BRDF 测量模型影响可以忽略,但这一过程不可避免会引入一定的误差,以两天地表反射率的平均差异(图 7)来评估其不确定贡献,不确定度贡献为 3.4%。地表反射率的测量仪器为 SVC, SVC 在实验室采用“标准灯+参考板^[18]”系统进行辐亮度响应度定标,其辐亮度响应度测量不确定度在整个太阳反射通道不超过 3.59%。大气光学厚度测量仪器为 CE318, CE318 采用 Langley 法定标^[19],测量不确定度不超过 3%,插值算法不确定度贡献评估方式与光谱匹配中相同,不超过 1%,6S 模型不确定度贡献为 0.6%^[16]。综合以上结果得到 BRDF 修正合成不确定度贡献不超过 5.9%。

以上各个影响因素相互独立,将各不确定度成分平方和再开方获得这一交叉定标方法的合成不确定度,其合成不确定度优于 7.7%。

4 结 论

介绍了一种新的基于超光谱成像仪 Hyperion 的交叉定标方法,考虑了交叉定标过程中视场、时相、几何和光谱要素的匹配,将 Hyperion 预测的 MODIS 14 个通道的入瞳辐亮度与其实测入瞳辐亮度进行比较。结果表明:11 个通道差异优于 6%,B3 差异为 -6.1%,B9 差异为 11.9%,B17 差异为 7.7%。定标不确定度优于 7.7%,初步验证了这一交叉定标方法的原理可行性。这一新的技术途径,为高光谱载荷在轨定标方法提供了一定的补充。在此基础上,通过改进交叉定标过程,如提高大气和地表参数测量精度以获得更准确的 BRDF 匹配因子,将进一步提高这一交叉定标方法的定标精度。

致谢 感谢国家卫星气象中心提供敦煌场 BRDF 数据。

参 考 文 献

- 1 Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua *et al.*. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. *J. Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 616~623
乔延利, 郑小兵, 王先华等. 卫星光学传感器全过程辐射定标 [J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 616~623
- 2 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*, 2009, **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*, 2009, **29**(1): 41~46
- 3 P. N. Slater, S. F. Biggar, K. J. Thome *et al.*. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors [J]. *J. Atmospheric and*

- Oceanic Technology*, 1996, **13**(2): 349~359
- 4 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1425~1430
魏庆农, 刘建国, 江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1425~1430
- 5 M. Folkman, J. Pearlman, L. Liao *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization and calibration [C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 352~363
- 6 S. Ungar, L. Ong. EO-1 Lessons Learned Hyperion Calibration Strategy [R]. Pasadena: HyspIRI Science Workshop-2, 2009. 1~60
- 7 P. M. Teillet, J. L. Barker, B. L. Markham *et al.*. Radiometric cross-calibration of the landsat-7 ETM+ and landsat-5 TM sensors based on tandem data sets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**(1-2): 39~54
- 8 P. M. Teillet, G. Fedosejevs, K. J. Thome *et al.*. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **110**(3): 393~409
- 9 K. J. Thome, S. F. Biggar, W. Wisniewski. Cross comparison of EO-1 sensors and other earth resources sensors to landsat-7 ETM+ using railroad valley playa [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(6): 1180~1188
- 10 J. J. Liu, Z. Li, Y. L. Qiao *et al.*. A new method for cross-calibration of two satellite sensors [J]. *International J. Remote Sensing*, 2004, **25**(23): 5267~5281
- 11 X. X. Xiong, J. Q. Sun, W. Barnes *et al.*. Multiyear on-orbit calibration and performance of terra MODIS reflective solar bands [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(4): 879~889
- 12 P. M. Teillet, J. A. Barsi, G. Chander *et al.*. Prime candidate earth targets for the post-launch radiometric calibration of space-based optical imaging instruments [C]. *SPIE*, 2007, **6677**: 66770S
- 13 A. Angal, G. Chander, X. X. Xiong *et al.*. Characterization of the Sonoran desert as a radiometric calibration target for Earth observing sensors [J]. *J. Applied Remote Sensing*, 2011, **5**(1): 059502
- 14 X. Xiong, N. Che, W. L. Barnes. Terra MODIS on-orbit spectral characterization and performance [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(8): 2198~2206
- 15 Li Xin, Zheng Xiaobing, Xun Lina *et al.*. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 66~70
李新, 郑小兵, 寻丽娜等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量 [J]. *光电工程*, 2008, **35**(1): 66~70
- 16 E. Vermote, D. Tanre, J. L. Deuze *et al.*. Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum-Vector(6SV) [R]. Lille: Laboratoire d'Optique Atmospherique, Universite des Sciences et Technologies de Lille, 2006. 1~55
- 17 B. N. Taylor, C. E. Kuyatt. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results [S]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1994
- 18 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612008
杨小虎, 王淑荣, 黄煜等. 基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612008
- 19 Wang Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
王先华, 乔延利, Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91