

基于 Terra /MODIS 数据的 HJ-1B /CCD1 交叉定标方法研究

徐磊^{①②}, 马灵玲^①, 胡坚^①, 唐伶俐^①

(^① 中国科学院光电研究院, 北京 100190; ^② 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 交叉辐射定标是国际上新近发展起来的一种无场地定标方法, 它的应用弥补了场地定标成本较高、定标参数更新周期较长的不足。对于我国 2008 年发射的环境与灾害监测预报小卫星 CCD 数据而言, 探索交叉辐射定标方法的适用性, 对及时发现传感器辐射性能的变化, 促进 CCD 遥感数据的定量化应用具有重要意义。本研究以辐射定标精度较高的 Terra/MODIS 数据为参考, 分别使用光线匹配法(RM)和辐射传输模型方法(RTM)对 HJ-1B/CCD1 数据进行交叉辐射定标, 并与相同条件下进行的场地定标结果比较。实验结果表明, 使用这两种方法获取的 CCD1 的第 2、3、4 波段的定标结果与场地定标结果差异较小, 只有第 1 波段定标结果与场地定标结果差异相对较大, 这证明了交叉辐射定标方法的有效性。另外, 虽然 RTM 方法考虑了参考传感器和待定标传感器光谱响应和观测几何的差异, 但是由于 RTM 方法会受到所使用的 6S 模型本身的误差以及输入的大气参数、地表参数测量误差的影响, 该方法并不总是优于 RM 方法。

关键词: HJ-1B; CCD; MODIS; RM 方法; RTM 方法; 交叉定标

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.005

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0026-06

Cross-calibration of HJ-1B/CCD1 Against Terra/MODIS

XU Lei^{①②}, MA Ling-ling^①, HU Jian^①, TANG Ling-li^①

(^① Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

^② Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

Abstract: Remote sensor radiometric calibration is a prerequisite for quantitative remote sensing. The accuracy of radiometric calibration has a direct impact on the reliability and accuracy of quantitative application of remote sensing data. The radiometric performance of onboard sensor will decline with the time's going, therefore, the update of calibration coefficients periodically is very important to those precise remote sensing applications. For the lack of onboard calibration instrument and the expensive vicarious calibration, the updates of calibration coefficients to the small satellite constellation for environment and disaster monitoring (HJ satellites) are usually once a year, which is difficult to satisfy the requirements of quantitative remote sensing. With cross calibration method, a dedicated sensor can be calibrated on a certain spectral channel against another sensor which has rather accurate calibration coefficients. Cross calibration method is more economical since stable radiometric site and simultaneous ground measurements are no longer necessary. In this paper, the visible and near infrared spectral bands of HJ-1B/CCD1 are cross calibrated against the corresponding bands of Terra/MODIS. Two types of cross calibration methods, including Ray Matching (RM) method and Radiative Transfer Modeling (RTM) method, are introduced using the HJ-1B/CCD1 and Terra/MODIS images acquired in Dunhuang Gobi desert area in August, 2009. Results were compared between the two cross calibration methods, and the validity of cross calibration was proved. At last, cross calibration uncertainties are analyzed, mainly including discrepancies of observed geometry and spectral difference between the two sensors. The uncertainty of the cross calibration is low except for band 1, which have proved the validity of the cross-calibration methods.

Key words: HJ-1B; CCD; MODIS; RM method; RTM method; cross calibration

收稿日期: 2010-03-18 修订日期: 2010-04-18

作者简介: 徐磊, 中国科学院光电研究院 2007 级硕士研究生, 研究方向为卫星传感器辐射交叉定标技术。

E mail: xulei@aoe.ac.cn.

1 引言

2008年9月6日我国发射了环境与灾害监测预报小卫星星座的2颗光学小卫星HJ-1A和HJ-1B,其上搭载的CCD相机有可见光和近红外共4个波段,用于获取地面30m空间分辨率的宽覆盖可见光图像,以在环境与灾害事件的应急观测和快速评估中发挥作用^[1]。遥感数据的应用效果取决于传感器辐射定标系数的准确性,而卫星传感器上天后,各种因素的影响往往会导致传感器的辐射性能发生变化,使得发射前实验室测量的辐射定标系数不再准确。为了保证遥感数据应用效果,应经常性的对HJ-1A和HJ-1B搭载的传感器进行辐射定标。

通常卫星管理机构定期或不定期地在定标场开展在轨场地定标试验,并发布定标系数。场地定标虽精度较高,但需要大量的同步测量数据,每次测量所需的人力,仪器及资金的投入都很高,因此不可能经常进行,如Landsat和SPOT一般每年进行2次场地定标^[2-3],而我国对于CBERS及HJ卫星的场地定标一般每年进行一次^[1]。这种更新频率难以及时反映卫星辐射特性的变化。

交叉辐射定标是一种无场地在轨辐射定标技

术^[4],与场地定标相比,它无需建立地面校正场和进行大量的地面同步测量,大大降低了成本,可以满足定标参数及时更新的需要。但是,由于交叉定标方法中影响定标精度的因素较多,目前国际上还没有一种普遍适用的交叉定标方法。对于我国自主研发的光学卫星HJ星座而言,探索适用的交叉定标方法对于及时发现环境星传感器辐射性能的变化,促进环境星数据的定量化应用具有重要意义。

MODIS具有完善的星上定标系统,星上定标系数的不确定度在2%左右^[5],并且重访周期短,因此可被用作交叉定标中的参考传感器。如李小英等使用MODIS对CBERS-02卫星CCD相机进行了交叉定标实验^[5],获取的定标系数不确定性为4.5%。陈正超等使用SPOT4/HRVIR2、Landsat5/TM和Terra/MODIS3种卫星传感器对“北京一号”多光谱传感器进行交叉定标^[6],交叉定标结果的误差约为8%~9%。童进军利用MODIS交叉定标FY1D/VIRR的可见光近红外波段^[4],定标结果与场地定标结果一致性较好。这些工作为探索使用MODIS数据对HJ卫星CCD数据进行交叉定标方法的研究提供了借鉴。

HJ-1B/CCD1相机是在HJ-1B卫星上搭载的两台CCD相机中的一台。图1所示是HJ-1B/CCD1相

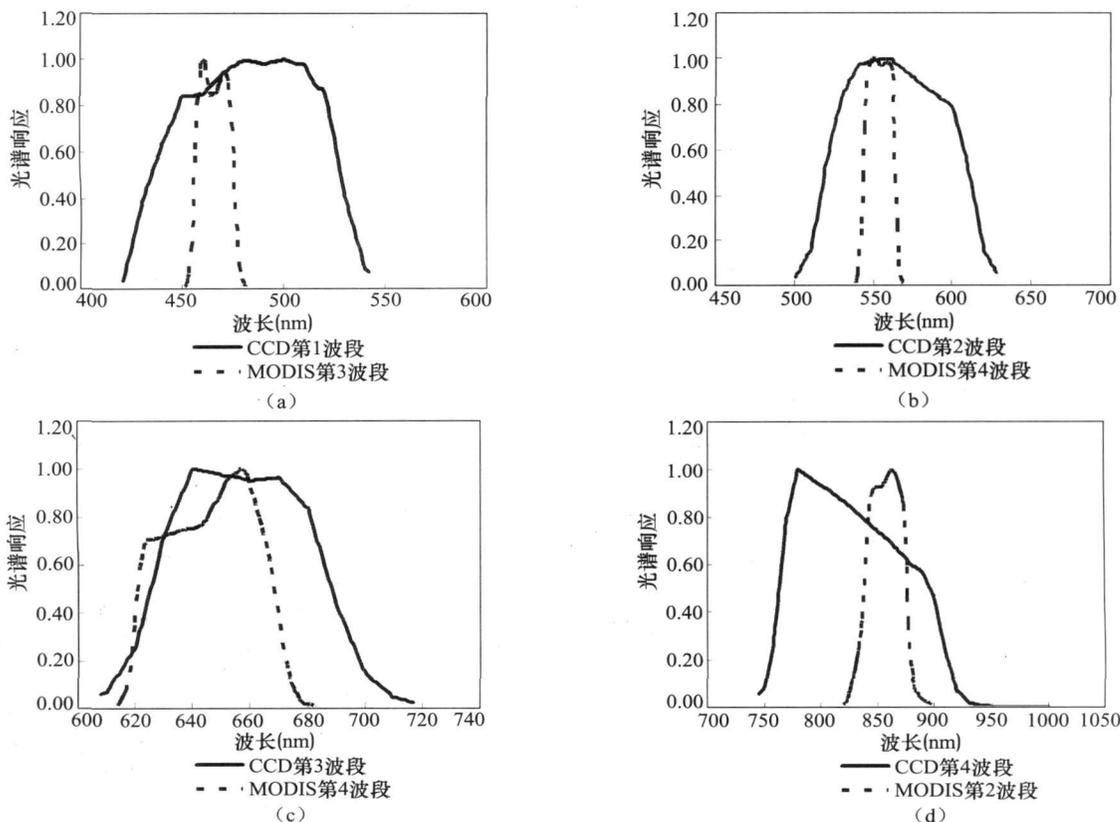


图1 HJ-1B/CCD1与Terra/MODIS对应波段的光谱响应曲线

机 4 个波段的光谱响应曲线及 Terra/ MODIS 对应波段的光谱响应曲线, 可以看出 MODIS 的 1, 2, 3, 4 波段分别和 CCD1 的 3, 4, 1, 2 波段的响应范围部分重合, 因此可以利用 MODIS 的前 4 个波段对 CCD1 的 4 个波段进行交叉定标。

本文将分 4 个部分描述利用 Terra/ MODIS 对 HJ-1B/ CCD1 四个波段进行交叉定标的过程。第一部分简述交叉定标的方法; 第二部分介绍研究区域和所使用的数据; 第三部分介绍数据处理过程及实验结果分析; 最后部分为总结和结论。

2 方法

辐射交叉定标是用定标精度较高的传感器作为参考传感器, 建立参考传感器输出和待定标传感器输出之间的关系, 利用参考传感器的观测值和两个传感器输出之间的关系确定待定标传感器的观测值, 进而确定待定标传感器的定标系数。目前, 普遍使用的交叉定标方法有光线匹配法(RM 方法)^[7-9]和辐射传输模型方法(RTM 方法)^[7, 10-11]。

(1) 光线匹配法(RM 方法)

RM 方法(光线匹配法)是一种简单直接的方法, 它除要求参考传感器和待定标传感器对应波段的波段范围相近外, 还要求两个传感器获取图像的时间相同, 观测角度相同, 地点相同, 当满足这些条件时认为参考传感器的表观反射率与待定标传感器的表观反射率是相同的。由参考传感器的表观辐亮度结合公式(1)可以获得参考传感器的表观反射率。由于两个传感器的表观反射率相等, 也就得到了待定标传感器的表观反射率, 再使用公式(1)可以计算出待定标传感器的表观辐亮度。

$$\rho = \frac{\pi L d^2}{E_s \cos \theta} \quad (1)$$

其中, ρ 为传感器表观反射率, L 为表观辐亮度, d 为日地距离因子, θ 为太阳天顶角, E_s 为大气顶层太阳辐照度。通过比较参考传感器的表观辐亮度和待定标传感器的 DN 值就可以获取定标系数。

假设 CCD1 某波段的偏置 B 不变, CCD1 图像的灰度值为 DN , MODIS 的表观辐亮度为 L_{MODIS} , 根据 RM 交叉定标方法及 HJ-1B/ CCD1 图像 DN 值转换为表观辐亮度 L_{CCD} 的公式:

$$L_{CCD} = \frac{DN}{G} + B \quad (2)$$

可知 CCD1 的增益系数 G 为:

$$G = \frac{DN}{\frac{L_{MODIS} E_{CCD} \cos \theta_{CCD} - B}{E_{MODIS} \cos \theta_{MODIS}}} \quad (3)$$

其中, E_{CCD} 和 E_{MODIS} 为两个传感器波段的大气层顶太阳辐照度, θ_{CCD} 和 θ_{MODIS} 为两个传感器的太阳天顶角。

基于 RM 方法, 使用 MODIS 对 HJ-1B/ CCD1 进行交叉定标的流程如图 2 所示:

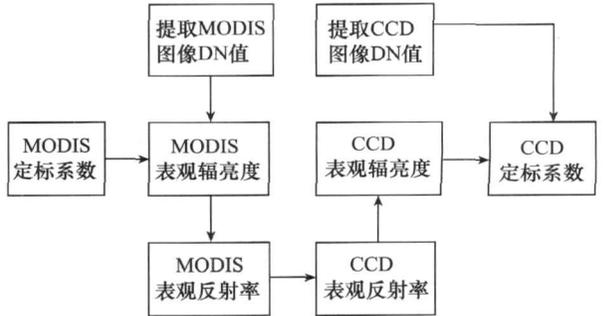


图 2 基于 RM 方法的 HJ-1B/ CCD1 数据交叉定标流程

RM 方法的优点在于方法简单, 影响其定标不确定性的因素少。另外, 由于没有使用到受云量影响很大的辐射传输理论, 因而它并不要求获取图像时天空是晴朗无云的^[7]。但是该方法不能顾及到波段之间的光谱差异, 并且在实际应用中, 很难获取观测几何相近, 成像时间一致的数据, 若使用 RM 方法可能导致不可接受的误差。

(2) RTM 交叉定标方法

RTM 方法(辐射传输模型方法)充分考虑了不同传感器观测几何和光谱响应不同对表观辐亮度的影响, 应用辐射传输模型模拟得出不同条件下 CCD1 和 MODIS 对应波段的模拟表观辐亮度 L_{CCD} 和 L_{MODIS} 。根据辐射传输理论, CCD1 的表观辐亮度的辐射传输模拟值 L_{CCD} 为:

$$L_{CCD} = \frac{\rho_c E_g \tau}{\pi(1 - S \rho_g)} + L_p \quad (4)$$

其中, ρ_c 为与 CCD1 相机波段对应的地表波段等效反射率, E_g 为地面上观测到的太阳辐照度, τ 为大气透过率, ρ_g 为背景平均反射率, L_p 为大气程辐射, S 为半球反照率。同理, MODIS 的表观辐亮度的辐射传输模拟值为:

$$L_{MODIS} = \frac{\rho_M E_g \tau}{\pi(1 - S \rho_g)} + L_p \quad (5)$$

其中, ρ_M 为与 MODIS 波段对应的地表波段等效反射率, E_g 为地面上观测到的太阳辐照度, τ 为大气透过率, ρ_g 为背景平均反射率, L_p 为大气程辐射, S 为半球反照率。

由公式(4)和(5)计算得到的两个传感器表观辐

亮度的辐射传输模拟值 L_{CCD} 和 L_{MODIS} 的比值为

$$K = \frac{L_{CCD}}{L_{MODIS}} \quad (6)$$

K 即为两个传感器辐亮度的光谱匹配因子^[4], 它包含了两个传感器光谱响应及观测几何不同引起的差异。

根据 MODIS 图像与定标系数, 获得 MODIS 实际观测到的表观辐亮度 L'_{MODIS} , 那么 CCD1 观测到的表观辐亮度应为 $L'_{CCD} = K * L'_{MODIS}$ 。假设 CCD1 某波段的偏置为 B , CCD1 图像的灰度值用 DN 表示, 根据 RTM 交叉定标方法及式(2), CCD1 的增益系数 G 为:

$$G = \frac{DN}{K \cdot L'_{MODIS} - B} \quad (7)$$

基于 RTM 方法, 使用 MODIS 对 HJ-1B/CCD1 进行交叉定标的流程如图 3 所示:

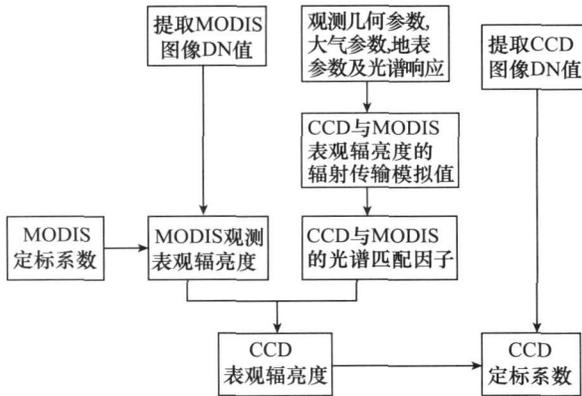


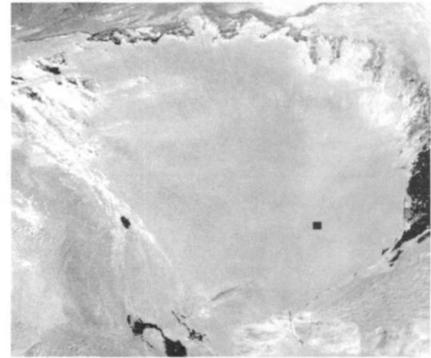
图 3 基于 RTM 方法的 HJ 1B/CCD1 数据交叉定标流程

RTM 交叉定标方法的优点是它不要求两个传感器获取图像的时间和角度完全相同, 时间和角度相近就可以, 同时它也顾及到了波段之间的光谱响应差异。

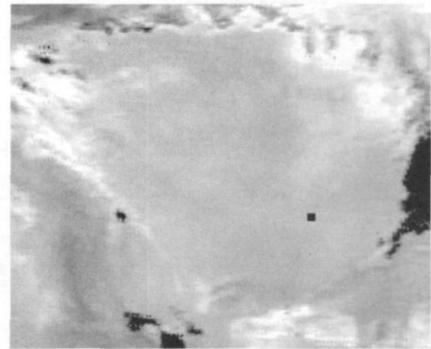
3 数据描述

本研究所使用的数据为 2009 年 8 月 21 日 HJ-1B/CCD1 所获取的敦煌地区 4 个波段的图像和同一天 Terra/MODIS 所获取的敦煌地区第 1、2、3、4 波段的图像。研究区域选取在敦煌市西部的戈壁滩, 敦煌国家辐射校正场就在此处。戈壁滩面积为

20km × 20km, 大部分区域无植被, 物质组成均匀, 表面半胶结, 地势平坦, 具有较高的稳定性和均匀性。图 4(a) 和图 4(b) 是本研究中所使用的 CCD1 的第 3 波段图像和 MODIS 的第 1 波段图像。图 4(a) 和图 4(b) 中右下方的黑色方形区域为数据处理时所选取的参考区域, 区域的左上角经纬度为 (40.097835N, 94.385903E), 右下角经纬度为 (40.084662N, 94.402526E), 包括 2200 个像素。



(a) HJ-1B/CCD1 第 3 波段图像



(b) Terra/MODIS 第 1 波段图像

图 4 2009 年 8 月 21 日 HJ-1B/CCD1 和 Terra/MODIS 观测敦煌地区图像

表 1 为两个传感器的过境时间及观测几何参数, 可见两个传感器的过境时间相差不足一个小时, 满足交叉定标的要求。交叉定标通常要求参考传感器和待定标传感器的观测天顶角都在 30° 以内^[5], 本研究中 MODIS 的观测天顶角大于 30°, 此时最好进行 BRDF 校正, 但考虑到当天没有进行 BRDF 测量, 本研究没有进行 BRDF 校正, 这会对定标精度产生一定影响。

表 1 HJ 1B/CCD1 和 Terra/MODIS 的过境时间及传感器的几何状态

	过境时间(UTM)	太阳天顶角(°)	太阳方位角(°)	观测天顶角(°)	观测方位角(°)
HJ 1B/CCD1	4:52	31.51	335.99	21.78	-76.95
Terra/MODIS	4:00	33.18	139.51	33.36	98.03

4 数据处理与分析

(1) 先将对应波段的 CCD1 图像和 MODIS 图像进行几何配准, 在配准后的 CCD1 图像和 MODIS 图像上分别选取敦煌辐射校正场相同区域作为参考区域(如图 4(a)和图 4(b)中的红色区域所示)。

(2) 使用 MODIS 图像参考区域的 DN 值, 结合 MODIS 的定标系数可以获得 MODIS 的表观辐亮度。

(3) 基于 RM 方法, 根据公式(3)使用 MODIS 表观辐亮度和 CCD1 对应波段图像 DN 值均值来计

算 CCD1 的定标系数。

(4) 基于 RTM 方法, 首先, 应用 6S 大气辐射传输模型结合图像获取时的大气、几何参数模拟 CCD1 和 MODIS 对应波段表观辐亮度的辐射传输模拟值, 将对应波段模拟计算的表观辐亮度辐射传输模拟值的比值作为该波段的光谱匹配因子。6S 输入参数中的地表反射率和气溶胶光学厚度由 2009 年 8 月 21 日的敦煌辐射校正场实地测量数据获取。光谱响应曲线使用 HJ-1B/CCD1 的响应曲线插值获得。表 2 为 HJ-1B/CCD1 与 Terra/MODIS 的光谱匹配因子计算结果。

表 2 HJ-1B/CCD1 与 Terra/MODIS 的光谱匹配因子计算结果

6S 模拟计算 CCD1 各波段表观辐亮度辐射传输模拟值($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	1 波段	2 波段	3 波段	4 波段
	110.81	105.43	95.26	65.17
6S 模拟计算 MODIS 各波段表观辐亮度辐射传输模拟值($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	3 波段	4 波段	1 波段	2 波段
	116.25	105.42	95.89	61.48
光谱匹配因子	0.953	1.0	0.993	1.06

需要注意的是, 表 2 中的光谱匹配因子不仅仅是 CCD1 与 MODIS 对应波段之间的光谱差异的反映, 它还包括了两个传感器观测几何的差异。获得光谱匹配因子后, 结合 MODIS 对应波段的表观辐亮度, 基于式(7)计算得到 CCD1 各波段交叉定标

系数。

分别使用 RM 方法和 RTM 方法对 HJ-1B/CCD1 进行交叉定标, 结果显示在表 3 中。为了便于比较这两种方法的效果, 该表列出了同一天敦煌辐射校正场场地定标结果作参考^[1]。

表 3 交叉定标结果

CCD1 波段	1		2		3		4	
	RM 方法	RTM 方法						
交叉定标结果	0.6461	0.6468	0.7401	0.7375	1.0471	1.0536	1.0157	1.0665
场地定标结果	0.7726		0.8092		1.1170		1.1337	
差异	16.3%	16.2%	8.5%	8.8%	6.3%	5.7%	10.0%	5.9%

从上表所示的定标结果可以看出, 除了第 1 波段, RM 与 RTM 方法的交叉定标结果与场地定标结果的差异都在 10% 以内, 这证明了两种交叉辐射定标方法的有效性。使用 6S 辐射传输模型模拟传感器表观反射率, 通过对比 CCD1 各波段输入到 6S 中的地表反射率和辐射传输模拟获得的表观反射率, 发现 CCD1 第 1 波段的表观反射率(0.2153)明显比输入到 6S 模型中的地表反射率(0.177)大, 相同的规律也出现在 MODIS 第 3 波段, 而在两个传感器的其余波段并没有这种明显的现象。这可能是由于 CCD1 的第 1 波段为波长最短的蓝波段(0.43 μm -0.52 μm), 而大气对波长较短的光的散射作用较强, 这增强了蓝波段在大气顶部的能量, 使

得大气变化对 CCD1 第 1 波段和 MODIS 第 3 波段在大气顶部接收到的能量的影响大于对其余波段的影响。考虑到两个传感器的成像时间相差 52 分钟, 大气状况可能产生了一定的变化, 所以给 CCD1 第 1 波段的交叉定标带来了较大的不确定性。

RM 方法与 RTM 方法的不确定性来源不尽相同。除了用于参考的场地定标系数本身的不确定性外, 应用 RM 方法进行交叉辐射定标过程的误差来源主要有 MODIS 定标系数的不确定性、大气状况的变化。另外, 两个传感器的光谱响应和观测几何不同, 这使得两个传感器的表观反射率实际上并不相同。对于 RTM 方法而言, 虽然使用光谱匹配因子校正了由于两个传感器的光谱响应和观测几何差

异引起的不确定性,但RTM方法中要使用到大气辐射传输模型,6S模型本身的误差以及6S输入参数的误差也会影响RTM方法的定标精度。输入参数的误差主要包括传感器光谱响应的测量误差,气溶胶光学厚度的测量和计算误差。另外,RTM交叉定标方法中,没有进行BRDF校正也是定标误差的一个来源。

由表3所示的两种方法定标结果与场地定标结果的差异比较可见,RTM方法的计算结果在CCD1的1、3、4波段都比RM方法更接近于场地定标结果,可见由于RTM方法考虑了两个传感器的观测几何和光谱响应不同带来的影响,有效地提高了定标精度。而在第2波段RM方法的定标结果与场地定标结果更接近,说明由于RTM方法会受到所使用的6S模型本身的误差以及输入的大气参数、地表参数测量误差的影响,该方法并不总是优于RM方法。

5 结束语

本文利用具有较高辐射定标精度的Terra/MODIS数据,分别基于RM和RTM两种方法,对HJ1B/CCD1的4个波段进行交叉辐射定标,获取了4个波段的两组定标系数,并以同时间的场地定

标结果为参考对获取的两组定标系数进行了验证和不确定性分析。结果表明,RM方法不考虑大气的影 响,简单明了,但是不能顾及到波段之间的光谱差异,如果波段之间的光谱差异过大(如CCD1第1波段与MODIS的第3波段光谱差异较大),将可能导致较大的误差。而RTM方法虽然考虑了传感器间观测几何和光谱响应的差异,但其使用的大气辐射传输模型和模型的各项输入参数会引入新的误差,这种误差的影响使得RTM的定标结果并不总是优于RM方法。另外,两种方法对CCD1第1波段的定标结果误差都较大,这可能是因为CCD1第1波段受大气状况的影响较大,而本研究中两个传感器的过境时间相差为52分钟,期间的大气状态变化会给第1波段的交叉定标带来较大误差。考虑到RM和RTM两种方法中的误差来源,以及场地定标结果本身的不确定性,使用两种方法对2、3、4波段的交叉定标结果是可以接受的。因此,总的来说,使用同时相Terra/MODIS数据对HJ1B/CCD1相机进行交叉辐射定标可以成为场地定标的一种可行的替代及验证思路。

致谢:感谢中国资源卫星应用中心提供了HJ1B/CCD1的图像和场地定标结果。

参考文献

- [1] CRESDA. <http://www.cresda.com/>.
- [2] Thome K J. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance based method[J]. Remote Sensing of Environment, 2001(78): 27- 38.
- [3] Santer R, Gu X F, Guyot G, et al. SPOT calibration at the La Crau test site[J]. Remote Sensing of Environment, 1992(41): 227- 237.
- [4] 童进军, 丘康睦, 李小文, 等. 利用EOS/MODIS交叉定标FY1D/VIRR可见光近红外通道[J]. 遥感学报, 2009, 9(4).
- [5] 李小英, 顾行发, 闵祥军, 等. 利用MODIS对CBERS-02卫星CCD相机进行辐射交叉定标[J]. 中国科学, 2005(35): 41- 58.
- [6] 陈正超, 刘翔, 李俊生, 等. 北京一号小卫星多光谱传感器交叉定标[J]. 宇航学报, 2008, 29(2).
- [7] JANG, G. M. . Cross calibration of MSG/SEVIRI infrared channels with Terra MODIS channels[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008: 1- 17.
- [8] Doelling, D. R. , Nguyen, L. , Minnis, P. (2004a). Calibration comparisons between SEVIRI, MODIS, and GOES data [C]// Proc. 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Prague, Czech Republic 2004: 17- 20.
- [9] Teillet, P. M. , Barker, J. L. , Markham, B. L. , Irish, R. R. , Fedosejevs, G. , Storey, J. C. 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): 39- 54.
- [10] Asem, A. , Deschamps, P. Y. , Ho, D. Calibration of METEOSAT infrared radiometer using split window channels of NOAA AVHRR [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1987, 4(4): 553- 562.
- [11] Vermote, E. F. , Saleous, N. Z. Calibration of NOAA 16 AVHRR over a desert site using MODIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2006(105): 214- 220.