

The Comparison Between HJ Satellite's CCD Sensors Field Calibration and Cross Calibration *

YU Xiaolei, WU Zhaocong *

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A series of calibration coefficients for HJ (Huan Jing) satellite's CCD sensor was calculated by reflectance calibration method, using the measuring spectrum data and atmospheric data which were collected at the test site of Dun-Huang, in August, 2009. At the same time, those calibration coefficients were also gained by cross calibration method, using the Landsat-5 TM data. Comparing those two groups of results and the former calibration coefficients promulgated by China Centre for Resources Satellite Data & Application, it shows the consistency between the coefficients from the cross calibration and DunHuang field calibration varies less than 10%. Compared to the pre-launch calibration; the post-launch calibration has changed about 3.4% ~6.7% in different bands of HJ satellite's CCD sensors.

Key words: HJ (Huan Jing) satellite; radiometric calibration; cross calibration; 6S model

EEACC: 7130 doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.10.013

环境卫星 CCD 传感器场地辐射定标与交叉定标的比较 *

余晓磊, 巫兆聪 *

(武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要: 利用 2009 年 8 月敦煌定标场实测光谱数据和大气参数数据, 采取反射率定标法, 获得环境卫星 CCD 传感器的定标系数。同时, 利用 LANDSAT-5 的 TM 影像对环境卫星 CCD 传感器进行交叉定标。通过对比两组定标结果, 并比较其与中国资源卫星应用中心公布的定标系数之间的差异, 验证定标系数的可靠性。结果表明, 交叉定标与场地定标的差异在 10% 以内, 可以作为实时替代定标的方法, 同时环境卫星 CCD 传感器各波段自运行以来存在 3.4% ~6.7% 的退化。

关键词: 环境卫星; 辐射定标; 交叉定标; 6S 模型

中图分类号: TP732

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)10-1435-05

环境卫星 (HJ-1A/B) 是我国新近发射的减灾防灾卫星星座, 每颗卫星并排搭载两台 CCD 传感器, 每台传感器有三个可见光谱段和一个近红外谱段 (具体参数参见表 1)。为深入其定量化研究, 需要对传感器定期定标, 以提供准确的定标系数。辐射定标就是要建立传感器的每个探测元件输出的数字化信号 (DN) 与它所对应视场中输出辐亮度值之间的定量关系^[1-2]。本文利用 2009 年 8 月份敦煌卫星辐射校正场同步测量的地物光谱反射率数据和大气光学特征参数, 计算 HJ-1A 卫星 CCD2 传感器 4 个波段的定标系数。针对单一地物定标法, 以及环境卫星缺乏传感器冷空间计数值的问题, 使用同期过境的 LANDSAT-5 卫星 TM 影像进行交叉定标。结果表明, 场地绝对辐射定标和交叉定标的平

均差异在 10% 以内, 具有良好的一致性。同时环境卫星 CCD 传感器自发射以来, 各波段有不同程度的退化, 其中蓝光通道的退化最为严重。

1 定标原理与算法

1.1 反射率法定标原理

基于反射率法的场地绝对辐射定标是在卫星传感器过境时同步测量地面目标反射率因子和大气光学特征参数 (如大气气溶胶光学厚度、大气柱状水汽含量等), 然后利用辐射传输模型 (其一般输入数据有分子散射率和气溶胶光学厚度、气溶胶的复折射指数和 Mie 散射指数等) 计算出传感器入瞳处的反射率值^[1,3-4]。该方法相比于辐亮度法、辐照度法, 精度较高, 测量的参数相对较少, 但是必须保证

所需参量都是同步观测时获取^[2],其原理如下:

卫星传感器单通道入瞳处的辐亮度 L_i^{TOA} 与其计数值 DN_i 之间存在的如下关系:

$$L_i^{\text{TOA}} = a_i \cdot DN_i + b_i \quad (1)$$

其中 a_i, b_i 分别表示该通道的增益和偏置。进一步传感器单通道入瞳处的大气顶层表观反射率可以表示为:

$$\rho_i^{\text{TOA}} = \frac{\pi d^2 L_i^{\text{TOA}}}{E_{0,i} \cos \theta_s} \quad (2)$$

式中 d 表示卫星获取影像时真实的日地距离和日地平均距离之比; θ_s 表示卫星获取影像时的太阳天顶角; $E_{0,i}$ 表示传感器单通道大气层外太阳辐照度, 又称为波段太阳常数。根据大气辐射传输理论, 传感器在大气上层测量的目标反射率 ρ_i^{TOA} 可以表示为:

$$\rho_i^{\text{TOA}} = T_g (\rho_{A+R} + T_{\text{down}} T_{\text{up}} \frac{\rho_i^s}{1 - S \rho_i^s}) \quad (3)$$

其中 T_g 表示大气透射率, ρ_{A+R} 表示大气分子自身含气溶胶层在内的反射率, $T_{\text{down}}, T_{\text{up}}$ 表示有太阳到地表以及地表到传感器的大气透射率, S 表示大气半球反照率, ρ_i^s 表示朗伯体地物目标的反射率因子经过第 i 通道的传感器光谱响应函数积分后得到的地表反射率。如前所述通过大气辐射传输模型(常见的例如 6S、LOWTRAN、MODTRAN)可以通过地表反射率、大气特征参数以及观测几何条件计算得到传感器入瞳处的大气顶层的表观反射率^[5-6]。

1.2 交叉定标原理

根据公式 1、2、3 可知, 为了计算传感器的定标系数, 即单通道的偏置和增益 a_i, b_i 至少需要两组计数值及对应的地物反射率。对于我国先后发射的资源卫星和环境减灾卫星的可见光、近红外通道, 其 CCD 线阵扫描成像式传感器不具备观测冷空间的能力, 也没有星上定标装置, 所以在进行单一地物法场地绝对辐射定标时, 通常认为传感器单通道的偏置值 b_i 已知, 且为发射前实验室检校得到的结果。但事实上, 由于传感器所处的外太空环境复杂以及长期工作后设备老化, 其偏置往往会发生比较大的变化, 美国 NOVAA 系列卫星 AVHRR 传感器的定标结果表明, 其各通道的偏置随时间存在较大的变化^[6-7]。为此本研究使用 LANDSAT-5 卫星 TM 影像对环境卫星 CCD 影像进行交叉定标。

交叉定标是使用较高精度的卫星通道定标较低精度的卫星通道的一种方法, 已经广泛的用于 AVHRR, MODIS 等传感器的辐射定标^[8], 其基本原理如下:

$$\frac{\pi d^2 (a_i \cdot DN_i + b_i)}{E_{0,i} \cos \theta_s} = k \frac{\pi d'^2 (a'_i \cdot DN'_i + b'_i)}{E'_{0,i} \cos \theta'_s} \quad (4)$$

其中 k 表示两种不同传感器之间对应通道间的光谱匹配系数^[9]:

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_s(\lambda) f(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda'_1}^{\lambda'_2} \rho_s(\lambda) f'(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda'_1}^{\lambda'_2} f'(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

式中: $\rho_s(\lambda)$ 为典型地物光谱反射率, $f(\lambda)$ 与 $f'(\lambda)$ 分别为两类不同传感器分波段的光谱响应函数, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 和 $\lambda'_1 \sim \lambda'_2$ 分别为两传感器分波段光谱的起止波长。

对于不同类型的地物而言, 其光谱匹配因子一般不同, 选取两类或两类上的典型地物, 代入式(4)中, 便可建立方程组求解传感器的定标参数^[10]。根据表 1、2 所示环境卫星 CCD 传感器与 LANDSAT-5 卫星 TM 传感器的光谱参数对比可知两类传感器的 1~4 波段设置类似, 且二者的空间分辨率接近(30 m), 量化等级相同(8 bit)。而 TM 传感器经过严格的发射前定标, 长期在轨监测和定期场地绝对定标, 有很高的辐射定标精度, 所以用 TM 影像对环境卫星 CCD 影像进行交叉定标是最佳的选择。

表 1 HJ 卫星 CCD 传感器参数

平台	有效载荷	波段号	光谱范围/ μm	空间分辨率/m	幅宽/km	重访时间/d
HJ-1A/B	CCD 相机	1	0.43-0.52	30	360	4
		2	0.52-0.60		(单台)	
		3	0.63-0.69		700	
		4	0.76-0.90		(二台)	

2 定标数据的采集与处理

敦煌卫星辐射定标场是我国卫星辐射定标的主要场地, 自 1995 年建立以来承担了我国多种类型卫星的场地辐射定标任务。它位于东经 94.4°, 北纬 40.08° 的戈壁上, 整个场区平坦均匀, 基本无植被覆盖, 具有稳定的地表光学特性, 年变化很小, 海拔高度 1 300 m 左右, 大气干洁, 受云雾等影响较小^[11]。

2.1 地表反射率测量

本次定标所需的地面实测数据, 为中国资源卫星应用中心 2009 年 8 月 26 日于甘肃敦煌卫星定标场实地测量所得, 戈壁校正场地表反射率的测量采用 550 m×550 m 的测试区, 每隔 50 m 测量一个点, 在卫星过境一个半小时内利用 ASD FR 型便携式光谱仪共计进行 144 个点的测量, 每个测量点对地物目标测量 5 次, 同时对参考白板测量 2 次。

按照以下公式处理得到定标场地物目标的反射率:

$$\rho(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_s(\lambda)} \cdot \rho_s(\lambda) \quad (6)$$

式中 $\rho_s(\lambda)$ 表示参考白板的反射率, 通常为实验室检校的结果, $V(\lambda)$ 表示地物目标测量值, $V_s(\lambda)$ 表示参考白板测量值, $\rho(\lambda)$ 表示地物目标的反射率。计算测量点的平均反射率如图 1 所示。

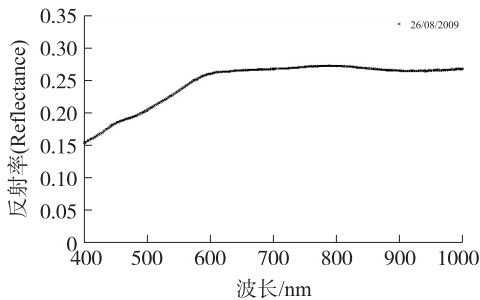


图 1 2009 年 8 月 26 日敦煌定标场反射率

2.2 大气参数测量

在卫星过境时刻, 使用 CE318 太阳光度计同步采集了场地上空的气溶胶光学厚度数据。太阳光度计采用兰立 (LangLey) 法定标^[12]。气溶胶光学厚度的测量按照大气浑浊度观测标准进行, 其结果如图 2 所示。气象数据来自敦煌地区气象站提供的测量结果, 包括环境温湿度、大气压、露点温度等。

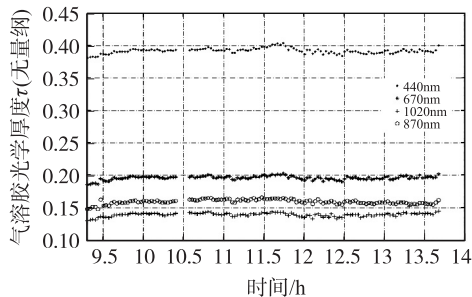


图 2 2009 年 8 月 26 日大气气溶胶特征

由于本文使用的 6S 辐射传输模型需要 550 nm 处的气溶胶光学厚度作为模型的输入参数, 而 CE318 的标准滤光镜没有对应的波段, 所以测量的结果需要按照 Angstrom 公式进行换算:

$$\tau_i = \beta \lambda_i^{-\alpha} \quad (7)$$

式中 τ 为气溶胶光学厚度, λ 为波长, β 为浑浊度系数, α 为 Angstrom 波长指数, 利用测量的任意两个波长的气溶胶光学厚度, 即可计算出 α 与 β , 继而求出 550 nm 处的大气气溶胶光学厚度。

2.3 定标影像数据处理

场地绝对定标采用的影像数据为 2009 年 8 月 26 日过境的 HJ-1A 卫星 CCD2 影像, 以保证与地面实

测严格同步。交叉定标所采用的影像分别为 2009 年 6 月 21 日过境的 HJ-1A 卫星 CCD2 影像和 6 月 22 日过境的 LANDSAT-5 卫星 TM 影像。其中 8 月 26 日的影像利用 1:50 000 的数字地形图进行几何校正, 6 月 21 日的环境卫星影像和 6 月 22 日的 LANDSAT-5 卫星 TM 影像, 进行了相对几何校正, 几何校正的误差控制在 1 个像素范围内, 以保证定位精度。

本文选取敦煌定标场内戈壁滩和敦煌地区的农作物这两类具有明显差别的地物进行交叉定标。地物的光谱反射率来源于中国典型地物波谱数据集中对敦煌地区长期测量的平均值。计算两类传感器对应通道之间的光谱匹配系数 k 所需的光谱响应函数和典型地物光谱反射率如图 3 所示。计算所得的匹配系数如表 2 所列。

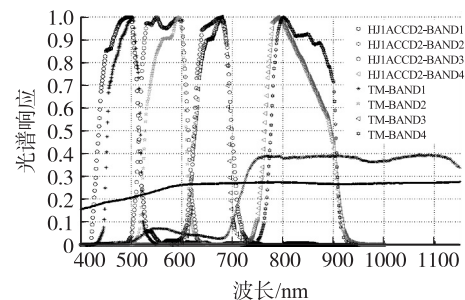


图 3 HJ-1A-CCD2 和 Landsat-TM5 光谱响应函数

表 2 HJ-1A-CCD2 与 Landsat-TM5 匹配通道及匹配因子

HJ-1A-CCD1 通道	中心波长/nm	Landsat-TM5 通道	中心波长/nm	中心波长差绝对值/nm	匹配因子	
					k_1 植被	k_2 戈壁
1	481.55	1	486.26	4.71	1.0114	0.9872
2	564.67	2	570.4	5.73	0.9481	0.9850
3	662.53	3	660.3	2.23	1.1908	1.0003
4	826.84	4	837.96	11.12	0.9994	1.0020

3 辐射定标系数计算与结果分析

场地绝对辐射定标和交叉辐射定标的工作流程分别如图 4 和图 5 所示。本次绝对辐射定标的结果和 08 年中国资源卫星应用中心公布的发射前定标

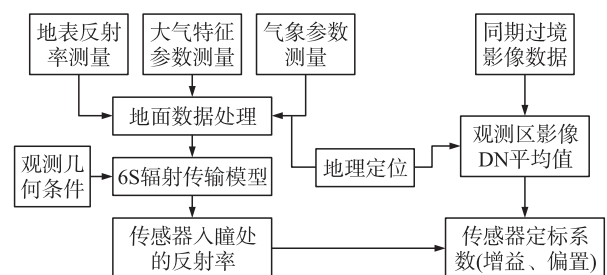


图 4 绝对辐射定标工作流程

系数,以及相对辐射定标的结果如表 3 所示。

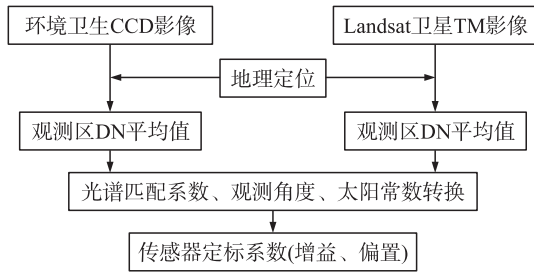


图 5 交叉辐射定标工作流程

表 3 HJ-1A-CCD2 传感器定标结果对比

波段	08 年发射前标定系数		绝对定标结果		交叉定标结果		绝对定标系数差异
	增益	偏置	增益	偏置	增益	偏置	
1	1.5723	7.7757	1.6374	7.7757	1.7096	-3.5748	6.7%
2	1.6920	7.0944	1.7528	7.0944	1.7203	-1.0631	3.4%
3	1.2282	4.1320	1.3006	4.1320	1.3061	-2.4647	4.8%
4	1.1405	1.2232	1.1139	1.2232	1.1386	-1.9874	1.8%

3.1 场地定标与发射前定标系数的比较

对比场地绝对辐射定标结果和发射前传感器的定标系数可知,自发射以来,HJ-1A 卫星 CCD2 传感器的各波段都存在不同程度的退化,其中以第一波段(蓝光通道)的退化最为严重,达 6.7%。而第四波段(近红外波段)的变化相对较小,为 1.8%,第二(绿光)和第三(红光)波段的绝对定标系数变化居中,分别为 3.4% 和 4.8%。表明卫星发射升空和在轨运行以来,传感器的性能相对实验室检定而言,发生了较大的变化,这主要是由于传感器随运载火箭发射升空时的复杂状态和传感器长期在轨工作造成的性能退化。

3.2 交叉辐射定标的验证

为验证交叉辐射定标的结果,通过选取 2009 年 6 月 21 日 HJ-1A 卫星 CCD2 影像上的四类典型地物目标(水体、城区、植被、干河床),分别用绝对定标系数和交叉定标系数按照式 1 求出地物在对应波段的辐亮度,并计算其相对偏差,结果如表 4 所示。比较发现,交叉定标和场地绝对定标结果,对于城区和植被,其符合性较好,平均偏差在 5% 以内;对于水体和干河床,其最大偏差分别达到了 6.62% 和 8.38%。这主要是由于,对城区而言,其光谱反射率曲线的特征在传感器的四个通道上都变化都比较平缓,而植被的光谱反射率曲线在蓝光波段较低而在近红外和绿光波段上相对较高;对于干净的内陆水体,其光谱反射率曲线在蓝光波段上的瑞丽散射占总信号的 80%^[13];而干河床在所有波段上的反射

率都相对较大。所以才会带来其绝对定标和交叉定标的部分差异。但就整体而言,交叉定标和绝对定标的结果偏差在 10% 以内。这表明,交叉辐射定标可以作为替代定标的手段,进行传感器的长期在轨状态监测。

表 4 HJ-1A-CCD2 传感器交叉定标结果验证

波段		水体	城区	植被	干河床
		W/(m ² ·μm·sr)			
1	绝对定标	29.91	75.34	28.32	98.62
	交叉定标	31.89	77.05	27.47	99.94
2	绝对定标	25.74	77.06	54.94	109.93
	交叉定标	24.86	76.49	56.30	109.67
3	绝对定标	23.69	59.91	31.74	102.37
	交叉定标	24.83	60.18	30.98	104.89
4	绝对定标	9.07	72.83	109.49	76.69
	交叉定标	9.83	71.79	111.05	74.41
统计结果	最大偏差	6.62%	3.42%	4.81%	8.38%
	最小偏差	1.34%	0.24%	0.27%	1.43%
	平均偏差	3.01%	2.24%	3.21%	4.37%

4 结束语

通过对环境卫星 CCD 传感器的绝对辐射定标和交叉定标的比较,分析传感器性能的变化,验证了交叉定标与绝对定标的一致性。对于监测在轨运行的星载传感器而言,还需要做进一步的真实性检验和长期的定标实验,以了解其运行状况,促进国产资源卫星影像的定量化应用。

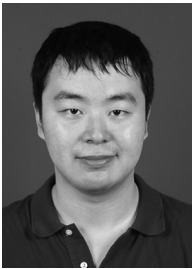
致谢

感谢中国资源卫星应用中心提供的敦煌定标场实地测量数据和环境卫星影像数据,对 2009 年 8 月参与敦煌定标实验的相关人员和单位一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 巩慧,田国良,余涛,等. CBERS02B 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):7-12.
- [2] 童庆禧,张兵,郑兰芬,等. 高光谱遥感[M]. 北京:高等教育出版社出版社,2006,32-35,68-74.
- [3] 傅俏燕,闵祥军,李杏朝,等. 敦煌场地 CBERS-02CCD 传感器绝对辐射定标研究[J]. 遥感学报,2010,10(4):433-439.
- [4] 李小燕,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 E 辑,2005,35(增刊):41-58.
- [5] Kastner C J, Slater P N. In-Flight Radiometric Calibration of Advance Remote Systems[J]. SPIE,1982,356:158-165.

- [6] 顾明澧. 星载传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.
- [7] Black S E, Helder D L, Schiller S J. Irradiance-Based Cross-Calibration of Landsat-5 and Landsat-7 Thematic Mapper Sensors [J]. IJRS, 2003, 24(2): 287-304.
- [8] 陈正超, 刘翔, 李俊生, 等. 北京一号卫星多光谱传感器交叉定标[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 638-645.
- [9] 唐军武, 顾行发, 牛生丽, 等. 基于水体目标的对 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标[J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(增刊): 59-69.
- [10] 彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 29-34.
- [11] 中国遥感卫星辐射校正场专题论证组. 中国遥感卫星辐射校正场技术方案[R]. 北京: 中国资源卫星应用中心, 1994, 7-8.
- [12] 中华人民共和国气象行业标准: QXT69-2007, 大气浑浊度观测-太阳光度计方法[S].
- [13] 孙凌, 张杰, 郭茂华. 针对 HY-1A CCD 数据处理的瑞利查找表[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 306-311.



余晓磊(1986-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事定量遥感, 生态遥感与碳循环遥感方面研究, yxl1919@163.com;



巫兆聪(1968-), 男, 福建连城人, 工学博士, 博士生导师。主要研究方向为高分辨率遥感图像处理与应用、遥感数据智能处理, zcwoo@whu.edu.cn。