

文章编号: 1007-4619(2006)05-0624-06

CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRV IR1 两个传感器的敦煌场地在轨绝对辐射定标及对比分析

郭建宁¹, 闵祥军¹, 傅俏燕¹, 李杏朝¹, 潘志强¹, 冯春¹,
郭毅¹, 黄世存¹, 李启明¹, 汤伟平²

(1. 中国资源卫星应用中心, 北京 100073; 2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 中国资源卫星应用中心于 2005 年 8 月, 利用敦煌场地分别对 CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRV IR1 两个传感器进行在轨绝对辐射定标。本文对此次地面同步测量数据进行了处理分析, 基于反射率法计算出了 CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRV IR1 两个传感器各波段的定标系数。其中, SPOT-4 HRV IR1 的定标结果与法国官方 8 月份提供的定标系数相比, 差异在 6% 内, 满足法方对绝对辐射定标精度的要求。此外, 应用定标系数分别将两个传感器的图像数据反演成地表反射率图像, 对它们进行了对比分析。

关键词: CBERS-02 CCD; SPOT-4 HRV IR1; 绝对辐射定标; 对比分析

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

The In-flight Absolute Calibrations for CBERS-02 CCD and SPOT-4 HRV IR1 Sensors at Dunhuang Test Site and the Comparison based on Their Coefficients

GUO Jian-ning¹, MIN Xiang-jun¹, FU Qiao-yan¹, LI Xing-chao¹, PAN Zhi-qiang¹,
FENG Chun¹, GUO Yi¹, HUANG Shi-cun¹, LI Qi-ming¹, TANG Wei-ping²

(1. China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100073, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Anhui Hefei 230031, China)

Abstract: The In-flight absolute calibrations were performed for CBERS-02 CCD and SPOT-4 HRV IR1 sensors by China Center for Resources Satellite Data and Applications (CRESDA) on August 2005 at Dunhuang test site. The absolute calibration coefficients were obtained for different bands of the two sensors using the method based on reflectance and the data processing and analyses for the simultaneous ground-based measurements. Meanwhile, the relative differences of calibration coefficients were small within and 6% compared with the results provided by France officially in published data August for SPOT-4 HRV IR1 sensor. It satisfied the calibration error requirements by France side. The comparison and analysis were completed by using the coefficients of two sensors respectively to convert their original images to target reflectance images.

Key words: CBERS-02 CCD; SPOT-4 HRV IR1; absolute radiometric calibration; comparison

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国防科工委“资源卫星遥感信息定量化方法研究与检验”(编号: 232014064001)资助, 中国科学院百人计划项目(编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目(编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目(编号: KJSX0401)。

作者简介: 郭建宁(1963—), 男, 研究员, 中心主任。主要从事卫星遥感总体设计及应用研究。

1 引言

自 20 世纪 90 年代以来,中国已经形成了较为完善的卫星遥感技术体系,1999 年成功地发射了中巴地球资源一号卫星 01 星 (CBERS-01),2003 年又成功地发射了 02 星,大大提高了获取遥感数据的能力和遥感应水平。但是,遥感信息定量化应用与国外相比,仍然相差较远。为了进一步提高定量化应用水平,必须进行传感器的在轨绝对辐射定标,它是遥感数据定量化应用的基础。

目前,在轨绝对辐射定标的方法很多,其中精度较高的方法是利用大面积均匀地面进行场地定标^[1-4]。中国国家辐射校正场——敦煌场是国际上公认的地势平坦、地表均一、方向特性较好^[5,6]的利于传感器在轨绝对辐射定标的戈壁场。利用中国敦煌辐射校正场曾成功地对气象卫星、CBERS-01、CBERS-02 星等多颗中国卫星进行过绝对辐射定标。但是,针对国外卫星,开展场地定标相对较少。为了有效监测 CBERS-02 CCD 传感器在轨运行期间的性能变化,及时地获取并更新定标系数,同时也是为了与国外同类卫星数据的对比分析及不同传感器数据间的综合利用,中国资源卫星应用中心联合法国空间中心和巴西空间技术研究院以及福建空间信息工程研究中心、北京师范大学等国内几家单位,在中国国家辐射校正场——敦煌场地,开展了 SPOT-4 HRV IR1 和 CBERS-02 CCD 的在轨绝对辐射定标试验,并进行了对比分析。

本文阐述了利用星地同步测量数据,基于反射率法分别计算出了 CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRV IR1 各波段的绝对辐射定标系数。其中,SPOT-4 HRV IR1 定标结果与法国官方发布的结果一致,满足法方绝对辐射定标精度的要求。此外,还应用两个传感器的定标系数,反演地表反射率并进行对比分析。结果表明,对于中高等反射率的地物类型差异较小,而水体的差异较大。同时也说明利用敦煌场地获取的定标系数具有一定的普适性,应用效果较好。

2 CBERS-02 CCD 绝对辐射定标

2.1 基于反射率的场地定标法

根据试验条件和测量获取的数据,采用基于反射率法进行 CBERS-02 CCD 传感器的绝对辐射

定标。反射率法是在卫星传感器过顶期间,地面同步测量目标反射率因子和大气光学参量,然后利用辐射传输模型计算出传感器入瞳处辐射度值,最后得出图像数字计数值与辐射度之间的定量关系^[7,8]。

如果传感器各波段图像数据的偏移量近似为 0 的话,其绝对辐射定标的方程为:

$$DN_i = A_i \times L_i \quad (1)$$

式中, DN 是 CCD 成像图像数字值, L_i 是 CCD 相机入瞳处的等效辐亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)。

2.2 地面同步测量及数据处理

获取场地目标反射率因子和大气光学参量是光学传感器场地在轨绝对辐射定标的前提和基础。由于 CBERS-02 CCD 传感器具有侧摆观测功能,本次试验安排了三次地面同步观测,分别是 2005 年 8 月 19、21 和 24 日。由于天气的原因,本次 CBERS-02 CCD 定标试验,只获取了 2005 年 8 月 24 日一次的敦煌场地地表反射率和大气参量的数据。

2.2.1 地表反射率的获取及处理结果

此次试验中,敦煌场地地表反射率的测量是采用三台 CE313 辐射计。其中,一台 CE313 固定在标定桌上,用于参考板的测量,以 30s 时间间隔测量参考板表面反射辐射度;另外二台用于测试区场地测量,分别沿图测量路线每隔 25m 进行一个点的测量。在卫星过顶的前后半个小时左右均匀测量完整个 400m × 400m 测试区域,共计测量约 270 条反射率光谱数据。

场地测试区的地面反射率因子计算公式如下:

$$\rho_{band_k} = K \times R_p \times \left[\sum_{i=0}^{N_{202}} \frac{V(i)_{202, band_k}}{V(i)_{201, band_k}} \times C_{201/202} + \sum_{i=0}^{N_{206}} \frac{V(i)_{206, band_k}}{V(i)_{201, band_k}} \times C_{201/206} \right] \left(N_{202} + N_{206} \right) \quad (2)$$

式中, K 为 CBERS-02 星波段与 CE313 对应波段的光谱响应匹配因子; R_p 为经过野外大气漫射影响校正的参考板反射率因子; N_{202} 和 N_{206} 分别为 CE313-202 和 CE313-206 仪器在测试区的采样点数; $C_{201/202}$ 和 $C_{201/206}$ 分别为 CE313-201 与 CE313-202 和 CE313-201 与 CE313-206 的标定因子; $V(i)_{202, band_k}$ 和 $V(i)_{206, band_k}$ 分别为这两台仪器测量地面的电压信号; $V(i)_{201, band_k}$ 为测量参考板仪器的电压信号。

根据测量场地两台仪器的不同采样点的时间对参考板的测量数据进行内插,得到场地仪器采样时

刻的标准参考板的值,然后用测量地表的信号与测量标准参考板信号之比,再乘以标定系数,计算出场地的反射比。

由于 CE313 波段式辐射计滤光片的响应与 CBERS-02 CCD 各个波段的光谱响应不完全一致。因此,需要将 CE313 仪器与 CBERS-02 星各个波段进行波段光谱响应匹配计算。匹配过程将 CE313 辐射计与连续光谱仪同时进行地面反射比测量,然后通过连续光谱仪测得的反射比分别与卫星光谱响应和 CE313 辐射计的光谱响应进行卷积运算,计算出星、地仪器各波段光谱响应的匹配因子。计算公式如下:

$$K = \frac{\int f(\lambda) R_{\text{传感器}}(\lambda) d\lambda}{\int R_{\text{传感器}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int f(\lambda) R_{\text{CE313}}(\lambda) d\lambda}{\int R_{\text{CE313}}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

式中, K 为不同传感器与 CE313 对应波段的光谱响应匹配因子; $f(\lambda)$ 为 ASD FR 光谱仪测量的连续反射光谱曲线; $R_{\text{传感器}}(\lambda)$ 和 $R_{\text{CE313}}(\lambda)$ 分别为传感器和 CE313 对应波段的光谱响应函数。

利用上述公式计算出敦煌场地测试区的地面反射率因子,结果见表 1。

2.2.2 大气光学厚度测量

此次试验光学厚度的测量是采用 CE317 手动太阳辐射计,从日出到当地中午一个完整测量周期内,以一定时间间隔进行测量。测量数据的处理采

用 Langley-Bouguer 法,最终计算出 550nm 波长上气溶胶光学厚度值为 0.11795,相对应的能见度约为 52km。

表 1 2005 年 8 月 24 日 CE313 波段式辐射计测量的敦煌场地测试区反射率因子

(n : 采样点数; ρ : 反射率因子; σ : 标准偏差; C_v : 相对变化)
Table 1 The ground reflectance factors of Dunhuang site from measurements on August 24, 2005
(n : sample number; ρ : reflectance factor; σ : standard deviation; C_v : relative variation)

波段	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
n	264	264	264	264
$\rho/\%$	15.0799	19.1648	20.9792	22.4064
$\sigma/\%$	0.3757	0.4594	0.5383	0.5619
$C_v/\%$	2.4914	2.3971	2.5659	2.5078

2.3 CBERS-02 CCD 敦煌场地的定标系数

将敦煌场地测试区的地表反射率及大气光学厚度等参量输入 6S 辐射传输模型^[9],计算出各个波段辐射度,再与 CBERS-02 星 CCD 图像上的测试区各波段平均灰度值进行比较,即得出 CBERS-02 星 CCD 相机各个波段的绝对辐射标定系数,结果见表 2。

表 2 2005 年 8 月 24 日 CBERS-02 CCD 敦煌场地定标结果

Table 2 The calibration results of CBERS-02 CCD on August 24, 2005 at Dunhuang test site

参 量	CCD 波段 1 (490.48 nm)	CCD 波段 2 (581.73 nm)	CCD 波段 3 (662.41 nm)	CCD 波段 4 (830.29 nm)
入瞳处辐射度 $L/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	91.949	88.754	81.334	57.600
测区平均 DN 值	94.600	160.610	90.108	131.230
标准偏差	0.792	0.914	0.789	0.669
定标系数 $DN/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	1.0288	1.8096	1.1079	2.2783

3 SPOT-4 HRV IR1 绝对辐射定标

3.1 地面同步测量及数据处理

在 SPOT-4 HRV IR1 的敦煌场地绝对辐射定标的过程中,通过与法国宇航中心 (CNES) 的合作,安排了 4 次地面同步观测试验,因天气的原因,只成功地获取了两次地面同步测量数据。其地表反射率和大气光学厚度的测量方法及数据处理与 CBERS-02

星相同,不再赘述。地表反射率的计算结果见表 3。

根据大气测量数据经计算获取的 2005 年 8 月 15 和 19 日两天的大气光学厚度分别为 0.09617 和 0.36952。

3.2 SPOT-4 HRV IR1 敦煌场地的定标系数

利用 SPOT-4 HRV IR1 传感器 4 个波段 (B1, B2, B3, SW IR) 的光谱响应数据,可由 6S 模型计算出传感器入瞳处的表观辐射度。

表 3 SPOT-4 HRV IR1 过敦煌场地 CE313 波段式辐射计测量的测试区反射率因子

Table 3 The ground reflectance factors of Dunhuang site from measurements by using CE313 for SPOT-4 HRV IR1

通道	通道 4 (B1)	通道 5 (B2)	通道 6 (B3)	通道 1 (SW IR)
2005年 8月 15日				
n	64	64	64	64
ρ / %	19.3319	22.1399	24.0651	32.972
σ / %	0.7832	1.0323	1.1072	1.2719
Cv / %	4.0513	4.6626	4.6009	3.8575
2005年 8月 19日				
n	96	96	96	96
ρ / %	19.9088	22.6484	24.1592	32.175
σ / %	0.5679	0.6679	0.5732	1.17
Cv / %	2.8525	2.949	2.3726	3.6364

对于 SPOT-4 HRV IR1 传感器, 其电子增益是可调的, 其辐射标定方程的形式可表达为:

$$DN_k = A_k G_{mk} L_k \quad (4)$$

式中, K 为波段, DN 是数字计数值, L_k 是传感器入瞳处辐射率, G_{mk} 是波段的电子增益, m 是增益序号, SPOT-4 HRV IR1 ($1 \leq m \leq 6$)。此次 SPOT-4 HRV IR1 敦煌场地定标过程中, 由 CNES 提供的 2005 年 8 月 15 日和 19 日两天的 SPOT-4 HRV IR1 图像数据头文件

表 5 SPOT-4 HRV IR1 敦煌场地定标系数及比较 [DN / (W · m⁻² · sr⁻¹ · μm⁻¹)]

Table 5 The comparison of the calibration for SPOT-4 HRV IR1 at Dunhuang with the coefficients provided by France

	B1	B2	B3	SW IR
法国官方 8 月份提供系数	0.657	0.842	0.881	6.178
2005 年 8 月 15 日 (CE313)	0.6934	0.89467	0.88908	5.9222
相对差异 / %	5.5403	6.2553	0.91714	-4.1405
2005 年 8 月 19 日	0.68356	0.88405	0.89056	5.8785
相对差异 / %	4.0426	4.9941	1.0851	-4.8478

从表 5 可知, 此次 SPOT-4 HRV IR1 的敦煌场地定标系数与法国官方在 8 月份提供的系数非常一致。其中 8 月 19 日利用 ASD 测量的结果与各波段的差异均在 5% 之内, 表明此次 SPOT-4 HRV IR1 敦煌场地定标结果是可靠的。同时, 也反映了敦煌场地的地表特性较好, 定标精度较高。

中, 读取的 SPOT-4 HRV IR1 (B1, B2, B3, SW IR) 波段的增益序号分别为 4, 4, 4, 2。

同时根据 CNES 提供的 SPOT-4 HRV IR 电子增益查找表 (表 4), 查找出 SPOT-4 HRV IR1 (B1, B2, B3, SW IR) 波段的增益分别为 2.25, 2.247, 2.248, 1.00。

表 4 SPOT-4 HRV IR1 电子增益序号与增益对照表
Table 4 SPOT-4 HRV IR1 analog gains (G_{mk})

增益序号	M	B1	B2	B3	SW IR
1	0.6670	0.6670	0.6670	0.6690	0.6670
2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3	1.5030	1.5030	1.5020	1.4990	1.5050
4	2.2500	2.2500	2.2470	2.2480	2.2680
5	3.3850	3.3850	3.3790	3.3680	3.4070
6	5.0580	5.0580	5.0450	5.0450	5.1280

利用地面铺设的黑色靶标, 在 SPOT-4 HRV IR1 的图像上定位出地面测试区的位置, 测试区的大小为 400m × 400m, 然后计算出这一测试区的平均灰度值和标准偏差。最后, 将利用地面同步测量的敦煌场地地表反射率和大气光学特性参量输入 6S 辐射传输模型, 计算出 SPOT-4 HRV IR1 传感器入瞳处的辐射度值, 再利用定标方程计算出其定标系数 A_k , 并与法国官方提供的定标系数进行比较, 结果见表 5。

4 CBERS-02 CCD 与 SPOT-4 HRV IR1 的对比分析

分别应用 SPOT-4 HRV IR1 法国官方提供的定标系数和 CBERS-02 CCD 敦煌场地定标结果, 将

2005年 8月 24日的 SPOT-4 HRV IR1与 CBERS-02 CCD图像进行大气订正后,反演成反射率图像进行对比分析。同时,以 SPOT-4 HRV IR1反演反射率为准,对 CBERS-02 CCD的定标结果进行检验。

4.1 反演反射率算法

传感器入瞳处辐射率 L 可以简单地表示为:

$$L(\lambda) = X \cdot \rho(\lambda) / \pi + L_p(\lambda) \quad (5)$$

式中, $X = [E_s \cos(\theta_s) \cdot T_d + E_d] T_u$, E_s 是大气外太阳辐照度, θ_s 是太阳天顶角, T_d 是向下方向的大气总透过率, E_d 是地面总辐照度, T_u 是向上方向的大气总透过率。将 $\rho=0\%$ 和 $\rho=100\%$ 分别代入得,

$$L_p = L_{\rho=0\%} \quad (6)$$

$$L_{\text{amb}} = L_{\rho=100\%} = X / \pi + L_{\rho=0\%} \quad (7)$$

由式(5), (6)和(7)可得出反演图像反射率表达式为:

$$\rho(\lambda) = \frac{L(\lambda) - L_p(\lambda)}{L_{\text{amb}}(\lambda) - L_p(\lambda)} = \frac{L(\lambda) - L_{\rho=0\%}(\lambda)}{L_{\rho=100\%}(\lambda) - L_{\rho=0\%}(\lambda)} \quad (8)$$

4.2 反射率反演过程

(1) 分别将 SPOT-4 HRV IR1和 CBERS-02 CCD传感器过顶时刻的太阳天顶角和方位角,以及两个传感器的观测天顶角和方位角,输入 6S辐射传输模型,计算出反射率分别为 0% 和 100% 的地面目标在两个传感器入瞳处的辐射度 $L_{\rho=0\%}(\lambda)$ 和 $L_{\rho=100\%}(\lambda)$ 。

(2) 分别利用 SPOT-4 HRV IR1和 CBERS-02 CCD定标系数,将灰度值转换为传感器入瞳处的辐射度,代入式(8),分别计算两个传感器的反射率图像。

(3) 分别在 SPOT-4 HRV IR1和 CBERS-02 CCD的几个不同定标系数计算出的反射率图像上,在相对应的位置选择几种地物的平均反射率,每种地物分别以 SPOT-4 HRV IR1的反演反射率为准,计算出 CBERS-02 CCD定标系数反演的反射率与 SPOT反演反射率的相对差异,通过几种地物的相对差异比较,检验 CBERS-02 CCD定标系数的适用性。其结果见表 6。

表 6 基于两个传感器定标系数反演反射率图像的不同地物类型的比较

Table 6 The comparison of different type targets for the target reflectance image based on the calibration of coefficients two sensors

地物类型	相对差异	B2	B3	B4
戈壁	SPOT-4 HRV IR1反演反射率	0.177056	0.209609	0.217900
	敦煌场地定标结果反演的 CBERS CCD 反射率	0.180826	0.200592	0.219719
	相对差异	2.1293	-4.3018	0.83479
水体	SPOT-4 HRV IR1反演反射率	0.048894	0.036117	0.030816
	敦煌场地定标结果反演的 CBERS CCD 反射率	0.084152	0.091385	0.361886
	相对差异	30.507	100.54	107.07
棉花地	SPOT-4 HRV IR1反演反射率	0.084623	0.090333	0.394999
	敦煌场地定标结果反演的 CBERS CCD 反射率	0.087651	0.100004	0.380730
	相对差异	3.5782	10.706	-3.6124
干河床	SPOT-4 HRV IR1反演反射率	0.274517	0.329105	0.372130
	敦煌场地定标结果反演的 CBERS CCD 反射率	0.266635	0.309051	0.370812
	相对差异	-2.8712	-6.0935	-0.35418
中等沙地 (反射率)	SPOT-4 HRV IR1反演反射率	0.206130	0.278021	0.311550
	敦煌场地定标结果反演的 CBERS CCD 反射率	0.206019	0.246124	0.286251
	相对差异	0.05389	31.173	8.1204

从表 6 的对比分析结果可以看出, 分别应用 CBERS-02 CCD 和 SPOT 定标系数反演的反射率图像中, 在相同位置上选取的几种不同反射率地物类型主要包括敦煌戈壁、农作物棉花、辣椒、水体、干河床的相对差别来看, 除了暗目标水体外, 其他几种地物类型的相对差异都较小, 最大的差异约 11% 左右; 而水体差异却达到约 108%。表明, 敦煌场地的定标系数对于暗目标 (如水体) 等地物类型不太适应, 而对中高等反射率的地物类型较适用。

5 结 论

此次敦煌场地定标试验, 利用反射率法分别获取了 SPOT-4 HRV IR1 和 CBERS-02 CCD 两个传感器的定标系数, 其中 CBERS-02 CCD B1 到 B4 四个波段的绝对辐射定标系数, 分别为 (单位: $[DN / (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})]$): 1.0288, 1.8096, 1.1079, 2.2783。此外, 应用 CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRV IR1 的定标系数反演成反射率图像, 选取不同地物类型进行对比分析, 得出的结论是: 敦煌场地的 CBERS-02 CCD 的定标系数对于中高等反射率的地物具有较好的适用性, 可以应用定标系数开展定量化应用及进一步的生物参量反演。但是, 适用于暗目标 (如水体) 的定标系数还需要开展深入的研究工作。

参 考 文 献 (References)

[1] Biggar S F. In-flight Calibration Methods Satellite Sensor

Absolute Radiometric calibration [D]. University of Arizona 1990.

- [2] Slater P N, Bigar S F, Hohn 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] Santer R, Gu X, Guyot G, et al. SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France) [J]. Remote Sensing of Environments 1992, 41: 227-237.
- [4] Thome K J. Absolute Radiometric Calibration of Landsat 7 ETM+ Using the Reflectance-based Method [J]. Remote Sensing of Environments 2001, 78: 27-38.
- [5] Team for the Validation of Calibration Test Site of China Remote Sensing The Investigation Report of Calibration Test Site for China Remote Sensing [R]. 1994. [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考察报告汇编 [R]. 1994.]
- [6] Team for the Validation of Calibration Test Site of China Remote Sensing The Technic Scheme of Calibration Test Site for China Remote Sensing [R]. 1994. [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]. 1994.]
- [7] Wang Z M, Min X J, Gu Y Q, et al. In-Flight Absolute Radiometric Calibration of the First of China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS-1) Sensor [A]. Discussion Collection on the Application and Research of CBERS-1 Data [C]. 2003.
- [8] Hu B, Lucht W, Stahler A H. Interrelationship of Atmospheric Correction of Reflectances and Surface BRDF Retrieval: A Sensitivity Study [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1999, 37: 724-738.
- [9] Vermote E, Tanré D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). 6S User Guide Version 2 [Z]. 1997.