

HJ-1 星 CCD 相机场地辐射定标与真实性检验研究

巩 慧¹, 田国良^{2,3}, 余 涛^{2,3}, 顾行发^{2,3}, 高海亮^{2,3},
汪 左^{2,3,4}, 李小英^{2,3}, 李家国^{2,3}

(1. 北京交通大学土木工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;
3. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101; 4. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要:为了满足 HJ-1 星遥感数据定量化应用的需求, 2008 年 10 月中旬, 以敦煌定标实验场为地面目标, 采用反射率基法对 HJ-1A 和 HJ-1B 星的 CCD 相机开展场地绝对辐射定标, 以确定 CCD 相机响应的变化, 并对得到的定标结果进行了误差分析。同时利用非定标同日的敦煌场和贡格尔实验场的 CCD 星地同步数据得到的表观辐亮度作为标准值, 对定标系数进行真实性检验研究。结果表明, 定标系数模拟出的 CCD 表观辐亮度与标准值非常接近, 误差均小于 3%。研究表明: 此次定标实验的结果精度高, 并将两次同步数据的定标系数平均值作为定标系数结果, 为 CCD 相机定量化应用研究奠定了良好基础。

关键词: HJ-1 CCD 相机; 辐射定标; 真实性检验; 定标系数

中图分类号: TP 701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)05-0682-07

引用格式: Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Radiometric Calibration and Validation of CCD Cameras on HJ-1 Satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 682-688. [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): 682-688.]

1 引 言

为了满足灾害和环境监测的需求, 实现自然灾害、生态破坏、环境污染动态监测, 预测灾害和生态环境的发展变化趋势, 为防灾抗灾、紧急救援、灾后救助及恢复重建和环境保护工作提供科学的决策依据, 为提高我国的减灾和环境保护能力提供有力的保障^[1], 2008 年 9 月 6 日, 我国首颗环境与灾害监测预报小卫星星座 HJ-1A 和 HJ-1B 星成功发射。HJ-1A 和 HJ-1B 星上均搭载有两台宽覆盖多光谱的可见光 CCD 相机, 用于获取地面的可见光和近红外图像。每颗星上的两台 CCD 相机以星下点对称放置, 并行观测, 平分视场, 单机扫描幅宽 360 km, 联合对地刈宽为 710 km 左右, 两台相机视场之间大约有 57'10" 的重叠, CCD 相机星下点地面像元分辨率为 30 m, 重复周期为 48 h, 视场角 32°, 宽覆盖多光谱可见光相机在 0.43~0.90 μm 波段范围内设置

4 个宽通道, 波段范围分别是: 0.43~0.52 μm 、0.52~0.60 μm 、0.63~0.69 μm 、0.76~0.90 μm 。由于各种原因, 传感器的性能在发射中及发射后产生变化和衰减, 直接影响卫星遥感定量数据的精度、可靠性和应用水平^[2]。同时, 为了提高 CCD 相机数据在国民经济中的利用率, 迫切需要改善 CCD 相机的数据质量。开展 CCD 相机定标与真实性检验方法研究, 及时发现传感器特性的变化, 是提高 CCD 相机数据利用率和数据质量、促进数据定量化应用的关键环节, 也是实现 CCD 数据和其他不同传感器、不同时相遥感资料融合进行综合应用的基础。由于 CCD 相机无星上定标系统, 因此发射后的定标利用在轨定标进行。场地定标是美国亚利桑那大学提出的利用与卫星同步测量的大气和地面数据进行的在轨定标方法, 是最直接有效的方法, 包括反射率基法、辐亮度法和辐照度法^[3]。20 世纪 80 年代起, 国外学者们利用此方法已对 Landsat、SPOT、Terra、

收稿日期: 2011-01-25; 修订日期: 2011-07-22

基金项目: 国防科工委项目“环境减灾星应用关键技术研究项目”(07K00100KJ)。

作者简介: 巩 慧(1971—), 女, 新疆阜康人, 博士, 讲师, 主要从事定量遥感和地质灾害遥感研究。E-mail: gonghuiyue@sohu.com。

通讯作者: 顾行发(1962—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 研究员, 主要从事定量遥感研究。E-mail: xfgu@irsa.ac.cn。

Aqua、EO-1、FY 系列和 CBERS 系列卫星的多种传感器成功地进行了高精度场地定标^[4-11]。本次 HJ-1 星 CCD 相机的定标研究在环境减灾应用关键技术研究项目的支持下,利用高精度的反射率基法,以敦煌场为实验场地进行。此次场地定标与 CBERS 系列卫星的 CCD 相机的场地定标比较而言,CBERS 系列卫星的 CCD 相机为垂直观测,而 HJ-1 星 CCD 相机为宽视场观测,需要考虑 BRDF;同时,利用了不同天的数据对定标系数进行了真实性检验。

2 方法和实验

2.1 反射率基法原理

反射率基法是当卫星飞越实验场上空时,在地面进行地表反射比、场地上空大气消光和探空气象的同步观测。然后对这些观测数据进行处理、星—地光谱响应匹配,经辐射传输计算得到卫星传感器各通道入瞳处的表观辐亮度和表观反射率。将表观辐亮度和表观反射率分别与图像对测区测量的平均计数值比较得到卫星相应各通道的定标系数。

对于 CCD 相机通道 i 测量的等效表观辐亮度 L_i 定义为:

$$L_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot L_i(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中: $R(\lambda)$ 为 CCD 相机归一化的光谱响应函数, $L_i(\lambda)$ 为通道 i 在波长 λ 处的表观辐亮度。

对于 CCD 相机,其等效表观辐亮度 L_i 与 CCD 相机探测到的计数值 DC_i 的关系为:

$$L_i = DC_i / a_i + L_0 \quad (2)$$

其中: a_i 为辐亮度增益, L_0 为偏移量。

CCD 相机入瞳处各通道的表观辐亮度用表观反射率 ρ_i^* 可表示为:

$$\rho_i^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{(\pi L_i(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) \cdot (r/r_0)^2)}{E_{0i} \mu_s} \quad (3)$$

其中: θ_i 、 θ_v 、 φ_i 、 φ_v 分别为太阳、卫星天顶角和方位角, L_i 为表观辐亮度, E_{0i} 为大气外界太阳辐照度, (r_0/r) 为平均与实际日—地距离之比, μ_s ($\mu_s = \cos \theta_i$) 为太阳天顶角的余弦。

对于朗伯特特性较好的地面目标,表观反射率 ρ_i^* 可表示为:

$$\rho_i^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \left[\rho_{Ai}(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) + \frac{\tau_i(\mu_s) \cdot \rho \cdot \tau_i(\mu_v)}{(1 - \rho_i s_i)} \right] T_{gi} \quad (4)$$

其中: ρ_{Ai} 为大气本身产生的向上的散射反射率, τ_i

为大气自身透过率, ρ_i 为地表反射率, s_i 为大气球反照率, T_{gi} 为吸收气体透过率。

在太阳垂直入射、平均日—地距离条件下,表观反射率 ρ_i^* 与 CCD 相机图像计数值的关系 DC_i 为:

$$\rho_i^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = DC_i / c_i + \rho_0 \quad (5)$$

其中: c_i 为反射率增益, ρ_0 为偏移量。

2.2 实验

2.2.1 实验场介绍

本次同步实验的主要场地—敦煌实验场于 1996 年底被确定为中国遥感卫星辐射校正场,用于可见光、近红外到短波红外波段的辐射定标^[12]。敦煌辐射校正场处于中纬度干旱大陆气候带内,位于甘肃省敦煌市西面约 20 km 处,四周由沙漠和戈壁包围(如图 1 所示)。敦煌实验场地平坦开阔,面积大约 20 km × 20 km,地表层没有经常性地表径流,基本无植被生长,表层由多种岩石碎屑组成的砾石、砂及少量粘土组成,砾石分布均匀,砂土约占 30% ~ 50%,地表具有很薄的胶结层。在敦煌实验场区南部沿经纬度方向划定 600 m × 600 m 作为本次实验的中心场区,其中心点坐标为 40°5.4'N、94°23.4'E。场区太阳辐射强,光照充足,大气干洁晴朗,能见度较好。



图 1 敦煌实验场

Fig. 1 The Dunhuang test site

2.2.2 地面光谱测量

HJ-1A 和 HJ-1B 的 CCD1 (简称 A1CCD 和 B1CCD) 于 2008 年 10 月中旬经过敦煌场上空,卫星过境日期及观测几何参数见表 1。

地表光谱特性数据采用 FR ASD 野外光谱仪和 SVC HR-1024 光谱仪进行。为了在短时间内完成地面数据的测量,实验之前在敦煌场区进行了采样点位的选择。将 600 m × 600 m 的实验区域以经纬度方向为行列布置好采样点位,用不同颜色的小旗做标志,采样点行、列方向各隔 50 m,共有 13 × 13

个采样点,即 169 个采样点。光谱测量时,敦煌实验场区的两个采样点位置之间选择 9 个子点,先在第一个采样点位上测量两次白板,再连续测量两个采样点间的 9 个子点的地面光谱,每个子点测量 2 次,完成一组测量后,到第二个采样点位进行下一组测

量,每一组测量所需时间约为 1.4 min。整个同步测区共获取 156 组测量数据,共约 1 500 条地面光谱数据。为了减小太阳天顶角和大气状况变化的影响,所有测量在卫星过境前后 1 h 完成。同时利用 GPS 对采样点进行精确定位。

表 1 HJ 星过境日期及观测几何
Table 1 The time of CCD overpass and its view parameters

日期	过境传感器	太阳天顶角/°	太阳方位角/°	观测天顶角/°	观测方位角/°
10 月 14 日	B1CCD	49.59	164.56	1.58	-71.06
10 月 20 日	A1CCD	51.44	167.04	11.80	-77.90
10 月 22 日	B1CCD	52.08	167.58	14.11	-77.32

2.2.3 大气光学特性测量

地表光谱同步观测当天,利用自动跟踪太阳光度计 CE318 在场地西侧 30 m 左右的地方进行大气气溶胶光学厚度测量,测量时间从 7:00~14:00,采用等间隔时间自动测量太阳直射辐射强度。由于敦煌场属于干燥的沙漠气候,水汽含量少,利用 1999~2006 年以来敦煌场卫星过境时刻 25 个探空样本进行模拟计算,分析得知利用常规探空数据替代实时探空观测对大气顶辐射量产生的误差可忽略,对 CCD 相机的第 4 波段影响较大。通过对不同时间敦煌探空观测水汽含量的误差范围分析得出,对 CCD 相机的第 4 波段影响约为 1%。卫星过境时未能实时观测水汽含量,因此采用早上的无线电气象探空观测结果进行水汽含量计算。臭氧含量来自 NASA TOMS 数据。

3 数据处理结果分析

3.1 地面光谱测量数据处理

数据处理时,首先对两个采样点之间的 9 个子点的 18 条光谱数据进行平均,得到这个采样点的地表光谱平均值。将在前后两个采样点处测量的参考板的 4 条光谱数据进行平均得到采样点的参考板平均值,用地表光谱平均值与参考板平均值之比得到采样点的相对反射比。要得到地表的绝对反射比,还需要考虑测量时刻参考板的光谱反射比,对参考板随太阳天顶角变化的反射率因子进行插值,得到测量时刻参考板的光谱反射比。敦煌场 ASD 同步观测所使用的一块参考板只在出厂时做过方向反射校正,但实验前后未进行方向反射比的重新校正。另一块新参考板有最新的双向反射率因子数据。为了提高数据的准确性,对不同的仪器和参考板进行多次相互比对,以新参考板作为标准,将待修正参考板的测量值与标准参考板的测量值的比值作为修正

因子,对待修正的参考板进行修正。这样利用式(6)即可计算出该采样点的地表绝对反射比 $\rho_g(\lambda)$:

$$\rho_g(\lambda) = \frac{v_g(\lambda)}{v_{p1}(\lambda)} \cdot k(\lambda) \cdot \rho_{p2}(\lambda)$$
 (6)

其中: $\rho_{p2}(\lambda)$ 为标准参考板测量时刻的光谱反射比因子, $v_g(\lambda)$ 为待修正的参考板在该采样点测得的地表平均值, $v_{p1}(\lambda)$ 为待修正的参考板在该采样点测得的参考板平均值, $k(\lambda)$ 为修正因子。再对所有采样点的绝对反射比进行平均得到实验场地的平均光谱反射比 $\overline{\rho_g(\lambda)}$:

$$\overline{\rho_g(\lambda)} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{g,i}(\lambda)}{n}$$
 (7)

其中: $\rho_{g,i}(\lambda)$ 为第 i 个采样点的绝对反射比, n 为采样点数。

同步观测期间对目标测量数据处理后得到的地表反射比光谱曲线(波段范围 400~1 000 nm)如图 2 所示。从图中可以看出,场地的反射比在可见光、近红外波段均呈现缓慢、平稳上升的特点,而且不同日期的测量值误差很小,说明场地反射比在可见光近红外波段范围内具有较好的光谱均匀性和稳定性。

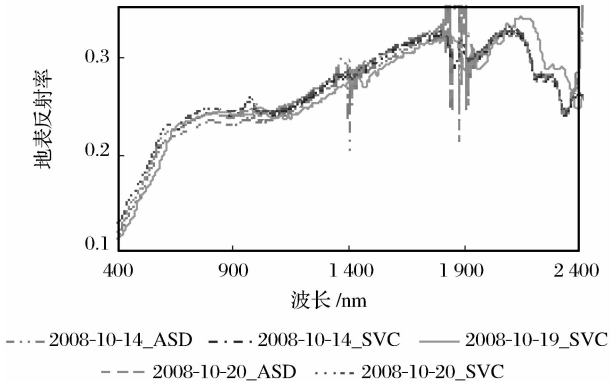


图 2 地表反射比光谱曲线

Fig. 2 Surface reflectance results of the test site

最后,将场地的平均光谱反射比与 CCD 相机各波段的光谱响应函数进行卷积运算,即可得到 CCD 相机各波段相应的等效反射率 ρ_i :

$$\rho_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{\rho_g(\lambda)} \cdot R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda}$$

(8)

其中: ρ_i 为 CCD 相机波段 i 的等效地表反射率, $R_i(\lambda)$ 为 CCD 相机波段 i 的光谱响应函数。

由于 HJ-1 星 CCD 相机具有宽视场特点,图像数据存在倾斜观测,为了提高定标精度,当观测角大于 10° 时考虑场地地表反射率的方向特性。2008 年 10 月的敦煌实验中,没有测量敦煌场地的反射方向特性。为此,使用国家气象局提供的 2000 年敦煌场测量得到的 BRDF 修正因子。将 2008 年 10 月垂直观测的地表反射率与 2000 年的 BRDF 修正因子相结合,利用核驱动模型^[13] 确定传感器观测天顶角方向的反射率:

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{geo}} k_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{vol}} k_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$$

(9)

其中: θ_i 为太阳天顶角, θ_v 为观测天顶角, φ 为太阳与传感器的相对方位角, R 为二向反射率, k_{geo} 为几何光学核, k_{vol} 为体散射核,都是光线入射角和观测角

的函数。 f_{iso} 、 f_{geo} 和 f_{vol} 是常系数,分别表示各向均匀散射、几何光学散射、体散射所占比例。

3.2 大气光学特性数据处理

利用 Langley 法对 CE318 测量的直射太阳辐照度数据计算得到气溶胶光学厚度。假定气溶胶粒子谱分布满足龙格(Junge)分布,利用 440 nm 和 870 nm 两个通道的气溶胶光学厚度(τ_{ak})计算得到 Angstrom 系数 α 和 β (式 10),由此可以导出 550 nm 波长处的气溶胶光学厚度。

$$\tau_{\text{ak}} = \beta \lambda^{-\alpha}$$

(10)

Angstrom 系数 α 反映了观测期间大气中气溶胶粒子组成的变化, α 大表明小粒子含量较多, α 小表明大粒子含量较多。 β 反映了气溶胶浓度的大小, β 越小表明能见度越好,大气越清洁,天气也越晴朗。得到的大气气溶胶光学厚度、Angstrom 系数 α 和 β 如图 3 所示,可以看出,自 9 : 00 ~ 13 : 00 期间气溶胶含量变化很小,表明大气状况很稳定,观测当天实验场区大气稳定,以大粒子气溶胶为主,浓度较低,大气清洁、能见度很好,同时 β 曲线的变化趋势与气溶胶光学厚度的变化趋势非常吻合,表现出大气浑浊度较小的特点。

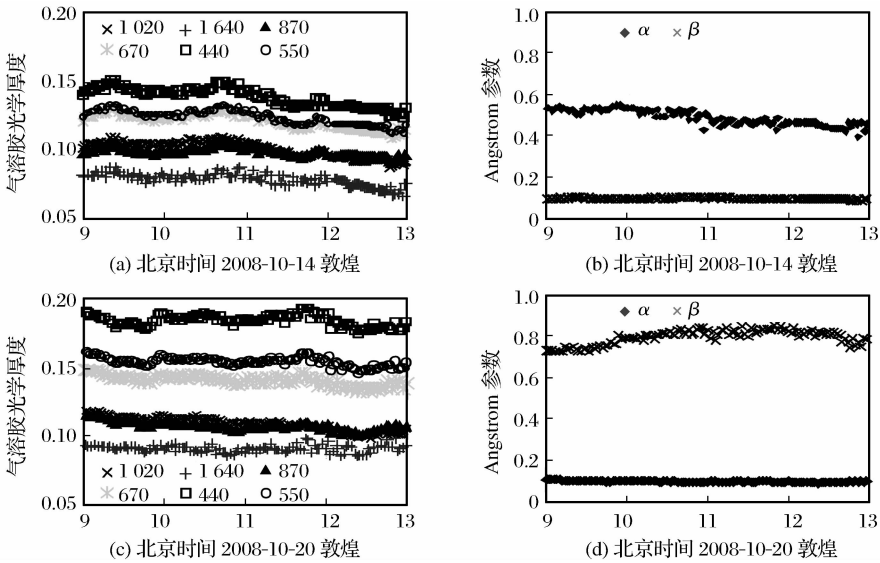


图 3 同步观测当天气溶胶光学厚度和 Angstrom 系数

Fig. 3 Aerosol optical thickness and Angstrom coefficients

3.3 定标系数计算与分析

在上述工作的基础上,首先将得到的 CCD 相机通道的地面方向反射率、大气气溶胶光学厚度、水汽含量、臭氧含量以及太阳和卫星几何观测条件等参数输入到 6S 辐射传输模型,获得 CCD 相机各通道的表观辐亮度。大气参数如表 2 所示。其次利用

表 2 大气参数

Table 2 Atmospheric characteristic preferences			
大气参数	2008. 10. 14	2008. 10. 20	2008. 10. 22
水汽含量	0.622	0.860	0.717
臭氧含量	0.291	0.295	0.290
550 nm 气溶胶光学厚度	0.120	0.150	0.225

GPS 数据进行星—地测区配准,在 CCD 相机图像上提取出与地面测区对应区域的 DN 值,将区域内所有像元的 DN 值进行平均,得到该区域的平均计数值。利用得到的表观辐亮度和图像平均计数值,根据式(2)得到 CCD 相机各通道辐亮度的定标系数,如表 3 所示。

由于探测目标和辐射传输过程中大气的影响,卫星传感器定标存在一定的不确定性。在反射率基法辐射定标中,定标的不确定性主要来源于地表光谱测量、大气参数测量、辐射传输模型和卫星遥感图

像等因素^[3]。对定标结果进行不确定性分析,在各种因素相互独立、同等精度观测的情况下,以每一个误差来源因素的平均值计算得到的定标结果作为定标系数真值,每一个因素的误差范围得到的定标结果与定标系数真值之间的差值占真值的百分比作为这个误差因素产生的不确定度大小,用每一个误差因素得到的不确定性的平方和的根作为辐射定标系数总的不确定度,计算得到定标系数总的不确定度为 5%,其中地表反射率误差是定标系数不确定性的最大误差来源。

表 3 利用敦煌场得到的 CCD 相机辐亮度的定标系数
Table 3 Radiance coefficients of CCD cameras obtained from the Dunhuang test site

传感器和日期	数值	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
A1CCD10 月 20 日	定标系数	0.5647	0.5350	0.6910	0.7407
	偏移量	9.3183	9.1758	7.5072	4.1484
B1CCD10 月 14 日增益 1	定标系数	0.5269	0.5291	0.7145	0.7312
	偏移量	1.6146	4.0052	6.2193	2.8302
B1CCD10 月 22 日增益 2	定标系数	0.8901	0.9164	1.2543	1.3001
	偏移量	3.0089	4.4487	3.2144	2.5609

表 4 利用敦煌场得到的 CCD 相机反射率的定标系数
Table 4 Reflectance coefficients of CCD cameras obtained from the Dunhuang test site

传感器和日期	数值	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
A1CCD10 月 20 日	定标系数	214.05	192.64	210.32	154.19
	偏移量	0.0246	0.0255	0.0247	0.0199
B1CCD10 月 14 日增益 1	定标系数	206.60	199.85	230.01	159.42
	偏移量	0.0041	0.0106	0.0193	0.0130
B1CCD10 月 22 日增益 2	定标系数	330.19	329.59	385.87	272.72
	偏移量	0.0081	0.0125	0.0106	0.0124

4 定标系数真实性检验

利用反射率基法得到的 HJ-1A 和 HJ-1B CCD 定标系数的精度和准确度需要利用距离定标时间最近的其他天地面实测数据进行真实性检验和评价。2008 年 10 月 1 日 HJ-1A 星 CCD1 在内蒙贡格尔实验场上空以 15.26°过境,2008 年 10 月 18 日 HJ-1B 星 CCD1 在敦煌场上空以 7.96°过境,过境时刻均在实验场进行星地地表和大气同步观测。同时为了提高贡格尔实验场地表反射率的准确性,又于 2008 年 9 月 30 日进行了多角度观测,得到了贡格尔场地的 BRDF 数据。利用同步观测的地表反射率和场地的 BRDF 数据,通过式(9)计算得到地表方向反射率。

将地表方向反射率、几何参数和大气参数代入 6S 辐射传输模型,模拟得到 CCD 相机实验场的等效表观辐亮度,并以此等效表观辐亮度作为标准值。利用 CCD 图像上实验场的平均 DN 值和计算得到的反射率基法定标系数,根据式(2)计算得到 CCD 图像的表观辐亮度。将定标系数模拟得到的表观辐亮度与标准值对比,进行真实性检验,真实性检验结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,CCD 相机的反射率基法定标系数计算得到的表观辐亮度和标准值非常接近,误差均小于 3%,说明此次反射率基法的定标精度较高,具有较高的可信度。为了提高定标系数的准确度,采用 CCD1 两次同步观测的结果作为最终的定标系数,结果见表 7。

表 6 定标系数模拟得到的 CCD 表观辐亮度与标准值比较结果

Table 6 Comparison between the apparent reflectance of CCD simulated from calibration coefficient and standard value

日期和传感器	数据	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
2008 年 9 月 28 日 A1CCD	模拟的辐亮度值	46.78	40.65	37.12	44.14
	标准值	46.71	40.38	38.19	44.15
	相对差异/%	0.15	0.68	−2.81	−0.02
2008 年 10 月 18 日 B1CCD	模拟的辐亮度值	72.21	72.17	65.35	48.54
	标准值	72.50	71.19	65.88	47.88
	相对差异/%	−0.40	1.38	−0.80	1.39

表 7 辐亮度的最终定标系数

Table 7 Final calibration coefficients of CCD cameras

传感器和日期	数值	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
A1CCD	定标系数	0.5652	0.5373	0.6789	0.7406
	偏移量	9.3183	9.1758	7.5072	4.1484
B1CCD 增益 1	定标系数	0.5258	0.5330	0.7113	0.7366
	偏移量	1.6146	4.0052	6.2193	2.8302

5 结 语

通过反射率基法于 2008 年 10 月中旬在敦煌场定标实验场进行星地同步观测,对 HJ-1A 和 HJ-1B 星上 4 个 CCD 相机进行场地在轨绝对辐射定标,并对结果进行分析。同时以非定标当日的敦煌和贡格尔的星地同步观测数据得到的表观辐亮度为标准值,对反射率基法得到的 CCD 定标系数进行真实性检验。结果表明,定标系数得到的 CCD 表观辐亮度和标准值很接近,相互之间的误差均小于 3%。由此表明:此次场地同步观测计算得到的定标系数具有较高的定标精度,结果可信度高。最后以两次同步观测得到的定标结果的平均值作为最终定标系数结果,为后续 HJ-1 星 CCD 相机的定量化遥感应用研究奠定了良好基础。

致谢:野外地面测量数据的获取是在中国卫星资源应用中心、国家减灾委、环保部环境卫星中心、东方红卫星有限公司、中国科学院遥感应用研究所和中国科学院对地观测与数字地球中心等多家单位齐心协力、共同努力下完成的,在此向一起参与野外实验的各位同志表示感谢!感谢中国资源卫星应用中心的陈卫荣、蒋欣格及相关人员在 HJ 星 CCD 数据获取方面提供的热心帮助!

参考文献 (References):

[1] Fang Zhiyong,Fan Yida. Prospect of the Small Satellite Constellation System for Environmental Monitoring and Hazards

for Disaster Reduction Application[C]//2005 Science and Technology Forum of Remote Sensing and Memoir for 2005 Annual Confenrence of China Association of Remote Sensing Application. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005:23-26. [方志勇,范一大. 环境与灾害监测预报小卫星星座在减灾领域应用展望[C]//2005 遥感科技论坛暨中国遥感应用协会 2005 年年会论文集,北京:中国宇航出版社,2005: 23-26.]

[2] Kaufman Y J,Holben B N. Calibration of the AVHRR Visible and Near-IR Bands by Atmospheric Scattering, Ocean Glint,and Desert Reflection[J]. International Journal of Remote Sensing,1993,14:21-52.

[3] Slater P N,Biggar S F,Holm R G,*et al.* Reflectance- and Radiance-based Methods for the Inflight Absolute Calibration of Multispectral Sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1987,22:11-37.

[4] Biggar S F,Dinguirard M,Geilman D I,*et al.* Radiometric Calibration of SPOT 2 HRV-A Comparison of Three Methods [J]. SPIE,1991,1493:155-162.

[5] Biggar S F,Thome K J,Wisniewski W. Vicarious Radiometric Calibration of EO-1 Sensors by Reference to High-Reflectance Ground Targets[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(6):1174-1179.

[6] Slater P N,Biggar S R,Palmer J M,*et al.* Unified Approach to Pre- and Inflight Satellite Sensor Absolute Radiometric Calibration[J]. SPIE,1995,2583:130-141.

[7] Thome K J,Smith N,Scott K. Vicarious Calibration of MODIS Using Railroad Valley Playa[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Sensing,2001:1209-1211.

[8] Thome K J,Arai K,Tsuchida S,*et al.* Vicarious Calibration of ASTER via the Reflectance-based Approach[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (10): 3285-3295.

[9] Fu Qiaoyan, Min Xiangjun, Li Xinchao, *et al.* Inflight Absolute Calibration of the CBERS-02 CCD Sensor at the Dunhuang Test Site[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4): 433-439. [傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 等. 敦煌场地 CBERS-02 CCD 相机在轨绝对辐射定标研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(4): 433-439.]

[10] Zhang Yuxiang, Zhang Guangshun, Huang Yibin, *et al.* Inflight 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 传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.]

[11] Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Vicarious Radiometric Calibration and Validation of CBERS02B CCD Data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(1): 1-12. [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): 1-12.]

[12] Qiu Kangmu. *Constructions, Scientific Fruits and Applied Foreground of Chinese Satellite Radiometric Calibration Sites* [C]//*Corpus for Research Papers of Chinese Remote Sensing Satellites Radiometric Calibration Sites Contribution*. Beijing: Ocean Press, 2001: 1-8. [邱康睦. 中国遥感卫星辐射校正场建设和科研成果及其应用前景[C]//中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编, 北京: 海洋出版社, 2001: 1-8.]

[13] Li Xiaowen, Gao Feng, Liu Qiang, *et al.* Validation of A New GO Kernel and Inversion of Land Surface Albedo Kernel-Driven Model (1) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4 (Sup.): 1-7. [李小文, 高峰, 刘强, 等. 新几何光学核的验证以及用核驱动模型反演地表反照率(之一)[J]. *遥感学报*, 2000, 4(增刊): 1-7.]

Radiometric Calibration and Validation of
CCD Cameras on HJ-1 Satellite

Gong Hui¹, Tian Guoliang^{2,3}, Yu Tao^{2,3}, Gu Xingfa^{2,3}, Gao Hailiang^{2,3},
Wang Zuo^{2,3,4}, Li Xiaoying^{2,3}, Li Jianguo^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;

4. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: To meet demand of quantitative application for HJ-1 satellite data, a vicarious calibration experiment for CCD cameras onboard HJ-1A and HJ-1B satellites was proposed in the middle of October 2008. The reflectance-based method was used. The radiometric response change of each CCD camera was ascertained and error analysis of the calibration coefficients was developed. Meantime, regarding apparent radiances obtained from CCD data of the synchro measurements at Dunhuang test site and Gongger test site as the standard values, which were not at the same day as the calibration experiment, validation research of the calibration coefficients was performed. It showed that the apparent radiances obtained by calibration coefficients were fairly consistent with the standard values and the errors were all less than 3%. It was proved that the calibration result has high accuracy. And then an average value of calibration coefficients from both synchro data was determined as the last result. The result laid the good foundation for quantitative application of CCD cameras.

Key words: CCD camera onboard HJ-1; Radiometric calibration; Validation; Calibration coefficient