

HJ-1A 星辐射定标及近海水体 大气校正的精度验证*

肖艳芳, 朱琳, 赵文吉

(首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要:以应用 HJ-1A 星数据进行近海水体定量反演为目的, 对 HJ-1A 星 CCD 的星上定标系数的精度进行验证, 并基于 Landsat-5 TM 数据对其进行交叉定标。在此基础上反演近海水体的反射率, 将反演结果与实测水体反射率进行比较发现: 对 HJ-1A 星 CCD 数据进行交叉定标能在一定程度上能提高近海水体反射率反演的精度。结果表明, HJ-1A 星 CCD 影像的星上定标系数不够精确, 在利用该数据进行近海水体的定量反演研究时, 需要利用交叉定标对星上定标参数进行修正。

关键词:交叉定标; 星上定标; 反射率反演; 近海水体; HJ-1A; Landsat-5 TM

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2012)01-0054-09

HJ-1A/B 卫星是 HJ-1 星座的 2 颗光学小卫星, 2008-09-06 在太原卫星发射中心成功发射。2 颗卫星上都搭载 2 台宽覆盖多光谱可见光 CCD 相机。同时, A 星上搭载一台超广谱成像仪, B 星上搭载一台红外相机。CCD 相机共设置 4 个波段, 地面像元分辨率为 30 m, 单台相机幅宽 360 km, 48 h 即可对全球覆盖一次。作为我国首颗环境与灾害监测国际合作卫星, HJ-1 星座在环境与灾害事件的应急观测与快速评估、资源调查与管理、林业与农业生产等领域具有很好的应用前景, 对我国及周边国家的遥感应用起到极大的作用。

卫星发射后, 一些研究者对卫星的应用潜力进行了分析^[1-2], 目前环境一号小卫星的数据已经应用在生态环境监测^[3]、水质监测^[4-5]、大气监测^[6]和农作物病虫害监测^[7]方面, 对于数据星上定标质量的评价主要集中在热红外数据^[8-9]和高光谱数据^[10]上, 关于 CCD 相机星上定标精度的验证鲜有研究。本研究利用 Landsat-5 的 TM 数据对 HJ-1A 星 CCD 相机的星上定标结果进行验证, 并对其进行基于 TM 的交叉定标计算; 利用基于 MODIS 数据的大气校正方法, 反演近海水体的反射率。基于实测的水体反射率, 分析交叉定标对 HJ-1A 星的 CCD 影像反演近海水体反射率的影响。

1 辐射定标

辐射定标主要是指将星上观测到的遥感计数值转换为物理量绝对值的过程^[11]。在大气层外, 太阳的辐照度可以认为是一个常数, 因此可以选择太阳作为基准光源, 通过太阳定标系统对星载成像光谱仪器进行辐射定标, 即星上定标, 如 TM、MODIS 等数据。在这类数据的头文件中都会提供相应的定标系数, HJ-1A 的 CCD 也提供了定标系数, 但定标系数的精确程度是否能够满足近海水体定量反演的要求还有待商讨。对没有提供定标系数或定标系数不精确的卫星影像, 需要用定标精度较高的卫星对其进行交叉定标^[12]。Landsat-5 卫星经过精确的标定和严格的在轨测试, 运行期间为了保持数据的一致性和数据精度而不断更新定标算法。同时, HJ-1A CCD 的波段设置与 Landsat-5 TM 前 4 个波段的设置相似(表 1)。

* 收稿日期: 2010-09-06

资助项目: 国家科技支撑计划重点项目——环北京区域遥感综合监测信息服务系统(2007BAH15B02)

作者简介: 肖艳芳(1985-), 女, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事生态遥感方面研究. E-mail: xiaoyanfang2006@126.com

(张 骞 编辑)

表 1 HJ-1A 星 CCD 和 Landsat-5 TM 对应波段带宽(μm)Table 1 Bandwidth of CCD and Landsat-5 TM(μm)

传感器	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
HJ-1A-CCD2	0.43~0.52	0.52~0.60	0.60~0.69	0.76~0.90
Landsat-5 TM	0.45~0.52	0.52~0.60	0.63~0.69	0.76~0.90

1.1 星上定标精度验证

选取 2009-06-25 北京延庆盆地的 HJ-1A 星 CCD 数据和同日该地区的 Landsat-5 TM 数据进行定标比对及交叉定标研究。两景影像资料过境时间基本一致,且天空晴朗无云,完全可以用于进行对比分析。

利用式(1)将 HJ-1A 星 CCD 图像的计数值转换为辐亮度值:

$$L = DN/g + L_0 \quad (1)$$

式中, L 为某个波段的光谱辐亮度; DN 为图像计数值; g 和 L_0 为辐射定标参数,可在图像数据的头文件中查找,见表 2。

表 2 HJ-1A 星 CCD 波段 1~4 的星上定标系数

Table 2 Radiance calibration coefficients of HJ-1A band 1~4

波段	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
g	0.636 0	0.591 0	0.814 2	0.876 8
L_0	7.557 5	7.094 4	4.131 9	1.223 2

本次研究使用的 Landsat-5 TM 数据为 1 级产品,1 级产品的 DN 值是由辐射亮度经线性变换得到的,辐亮度的计算公式如下

$$L(\lambda) = G_{\text{rescale}} DN(\lambda) + B_{\text{rescale}} \quad (2)$$

式中, DN 代表 1 级产品的像元值; G_{rescale} 和 B_{rescale} 分别为变换的增益和偏置,见表 3。

表 3 Landsat-5 TM 波段 1~4 的辐射定标系数

Table 3 Radiance calibration coefficients of Landsat-5 TM band 1~4

系数	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
G_{rescale}	0.762 824	1.442 510	1.039 882	0.872 588
B_{rescale}	-1.52	-2.84	-1.17	-1.51

以 Landsat-5 TM 为基准,对两景影像进行精确的几何纠正,精度控制在 0.5 个像元以内,确保 2 种数据的目标基本一致。然后在两景影像对应区域选取建筑物、裸地、水体和植被四类地物,每类地物分别采集 10 个样点,样点各波段的平均值作为此类地物在相应波段的辐亮度值。由表 4 可知,对 HJ-1A 的 CCD 影像进行星上定标得到的辐亮度与 Landsat-5 TM 的辐亮度存在较大差异,这说明 HJ-1A 的 CCD 影像所提供的星上定标系数达不到进行一系列水体定量反演的精度要求。

表 4 HJ-1A 星 CCD 星上定标与 Landsat-5 TM 辐射定标结果比较

Table 4 Comparison between the satellite Radiance calibration of CCD mounted on Satellite HJ-1A and the Radiance calibration of Landsat-5 TM

地物类型		波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	平均相对误差
建筑物	TM	70.72	66.4	58.3	58.4	
	IJJ-1A	78.5	66.65	59.4	67.26	
	相对误差	13%	0.38%	1.89%	15.09%	7.59%
裸地	TM	86.68	93.53	90.45	83.93	
	HJ-1A	84.13	77.65	71.44	79.33	
	相对误差	2.94%	16.98%	21%	5.48%	11.60%
水体	TM	51.51	44.03	26.5	15.16	
	HJ-1A	53.63	40.23	23.68	23.49	
	相对误差	4.12%	8.63%	10.64%	51.55%	18.74%
植被	TM	45.09	37.56	22.02	103.7	
	IJJ-1A	50.47	38.24	21.46	92.92	
	相对误差	11.93%	1.81%	2.54%	10.40%	6.67%

1.2 交叉定标及精度分析

分别在两景影像对应位置选择高、低计数值均匀的两块区域(每块区域多于 50 个像元,均方根差小于 3)^[13-14],应用两点法,建立 Landsat-5 TM 和 HJ-1A 的 CCD 各对应波段 DN 值之间的一元线性回归方程如下

$$DN_{TM1} = 1.801463DN_{CCD1} + 13.39112 \quad (3)$$

$$DN_{TM2} = 1.206272DN_{CCD2} + 6.435024 \quad (4)$$

$$DN_{TM3} = 1.125306DN_{CCD3} + 7.713541 \quad (5)$$

$$DN_{TM4} = 1.28576DN_{CCD4} + 0.437339 \quad (6)$$

利用式(1),(3),(4),(5),(6)可计算得到 HJ-1A CCD 数据 1~4 波段的交叉辐射定标系数,见表 5。

表 5 HJ-1A 星 CCD2 数据 1~4 波段交叉定标系数

Table 5 Coefficients of cross radiance calibration for HJ-1A CCD 1~4 bands

波段	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
g'	0.7277	0.57470	0.85457	0.89131
L'_0	8.6951	6.44259	6.85117	-1.12838

2 基于 MODIS 影像的近岸水体反射率反演

2.1 模型计算

卫星接收的总辐射亮度可表示为^[15]

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + tL_w(\lambda) + tL_f(\lambda) + TL_g(\lambda) + L_b(\lambda) \quad (7)$$

式中, L_r 为大气分子 Rayleigh 散射; L_a 为大气气溶胶散射; L_w 为离水辐亮度; L_f 为海面白帽信号; L_g 为海

面对太阳光的直射反射; L_b 为水底的反射; t 为大气漫射透过率; T 为大气直射透过率; λ 为波段。

在不考虑来自水底反射的影响,同时避开太阳耀斑和白帽的条件下,卫星接收到的总辐亮度可简化为

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + tL_w(\lambda) \quad (8)$$

二类水体大气校正的目的就是要从卫星接收到的总辐亮度中去除大气散射 L_r , 气溶胶散射 L_a , 得到离水辐亮度 L_w 。

2.1.1 大气散射 L_r

根据 Gordon 单次散射,可推导出 Rayleigh 散射^[16-17]:

$$L_r(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0, \lambda) = \frac{F_0'(\lambda)\omega_0\tau_r(\lambda)}{\cos\theta} [P_r(\alpha_-) + \rho P_r(\alpha_+)] \quad (9)$$

式中, $\cos(\alpha_{\pm}) = \pm \cos\theta\cos\theta_0 + \sin\theta\sin\theta_0\cos(\phi - \phi_0)$, θ, ϕ 分别为对应像元到传感器之间连线所构成的向量的天顶角和方位角; θ_0, ϕ_0 分别为对应像元与太阳之间连线所构成的向量的天顶角和方位角; α 为两个向量之间的夹角。在本研究中,以影像头文件中卫星的天顶角和方位角近似代替 θ 和 ϕ , 以太阳的天顶角和方位角近似代替 θ_0 和 ϕ_0 ; ω_0 为瑞利单次散射反照率,在避开水汽和氧气吸收的波段可近似为 1^[18]。

$P_r(\alpha)$ 为瑞利散射相函数,公式如下

$$P_r(\alpha) = (3/16\pi)(1 + \cos^2\alpha) \quad (10)$$

式中, τ_r 为大气瑞利光学厚度: $\tau_r(\lambda) = (P/P_0)\tau_{r0}(\lambda)$; P_0 为标准大气压; P 为实际大气压^[19]。

$$\tau_{r0}(\lambda) = 0.008569\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \quad (11)$$

在本研究中,所使用的瑞利光学厚度应为“波段等效光学厚度”^[18]:

$$\langle \tau_r(\lambda) \rangle = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) F_0'(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0'(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

式中, $S_i(\lambda)$ 为 HJ-1A 星 CCD 数据的波段响应函数; λ_1, λ_2 分别为波谱响应函数中对应波段的最大值和最小值; $F_0'(\lambda)$ 为经过臭氧吸收修订的大气层外太阳辐照度^[20]。

$$F_0'(\lambda) = F_0(\lambda) \exp(-\tau_{oz}(\lambda)(1/\cos\theta_0 + 1/\cos\theta)) \quad (13)$$

$$F_0(\lambda) = \langle F_0(\lambda) \rangle \{1 + 0.0167 \cos[2\pi(D-3)/365]\}$$

式中, $\langle F_0 \rangle$ 为平均日地距离处的大气层外太阳辐照度; D 为从 1 月 1 日算起的相应日期的公历天数; $\tau_{oz}(\lambda)$ 为臭氧层光学厚度,可通过 NASA 网站的实时大气臭氧含量计算得到^[18]。

ρ 为气水表面天空光的反射率,由于清洁水体对近红外波段几乎全部吸收,这些波段的水体信号就是天空光的反射信号,因此可以通过式(14)确定气水表面的反射率^[21]:

$$\rho = L_{sw}(800 \sim 900\text{nm}) / L_{sky}(800 \sim 900\text{nm}) \quad (14)$$

本研究于卫星过境当天在曹妃甸附近海域进行了水体光谱的测量,选取其中最为清洁的水体计算得到 ρ 为 0.029; L_{sw} 为光谱仪测量得到的水体辐亮度; L_{sky} 为光谱仪测量得到的天空光辐亮度。

2.1.2 气溶胶散射 L_a

选取研究区内远离海岸线的清洁水体像元,其近红外波段的离水辐亮度近似为 0,即 $L_w(\lambda_4) \sim 0$,忽略太阳直射反射和白帽的影响,第 4 波段的气溶胶散射为

$$L_a(\lambda_4) = L_t(\lambda_4) - L_r(\lambda_4) \quad (15)$$

其他波段气溶胶散射的计算根据 Wang 和 Gordon 修改的 Angstrom 定律^[22]:

$$\frac{L_a(\lambda_i)/F_0'(\lambda_i)}{L_a(\lambda_4)/F_0'(\lambda_4)} = \epsilon(\lambda_i, \lambda_4) = \exp[c(\lambda_i - \lambda_4)] \quad (16)$$

式中, c 为常数,可利用同一块清洁水体的 HJ-1A 星 CCD 图像近红外波段和对应 MODIS 的近红外波段数据得到^[23-24]。

2.1.3 大气漫射透过率 t

$$t(\theta, \tau) = \exp\{-[0.5\tau_r(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda)]/\cos\theta\}t_a(\theta, \lambda) \quad (17)$$

式中, $\tau_r(\lambda)$ 为瑞利散射光学厚度; $\tau_{oz}(\lambda)$ 为臭氧光学厚度; $t_a(\theta, \lambda)$ 为气溶胶散射透过率, 由于其与气溶胶光学厚度关系不大, 通常都将其作为一个常数, 取值为 1^[22]。

遥感反射率 R_{rs} 可通过式(18)计算:

$$R_{rs}(\lambda) = L_{wn}(\lambda) / \langle F_0(\lambda) \rangle \quad (18)$$

$L_{wn}(\lambda)$ 为归一化离水辐亮度:

$$L_{wn}(\lambda) = L_w(\lambda) / [t_0(\lambda) \cos\theta_0] \quad (19)$$

2.2 数据处理

本研究以位于渤海湾西北的曹妃甸附近海域为研究区, 区域示意图及实测点位置如图 1 所示。本研究的第 1 部分对 2009-06-25 的 HJ-1A 星 CCD 影像分别进行了基于星上定标系数的辐射定标和基于 Landsat-5 TM 的交叉辐射定标, 对上述 2 种辐射定标的结果, 分别利用第 2 部分的基于 MODIS 的近海水体大气校正模型反演水体反射率。

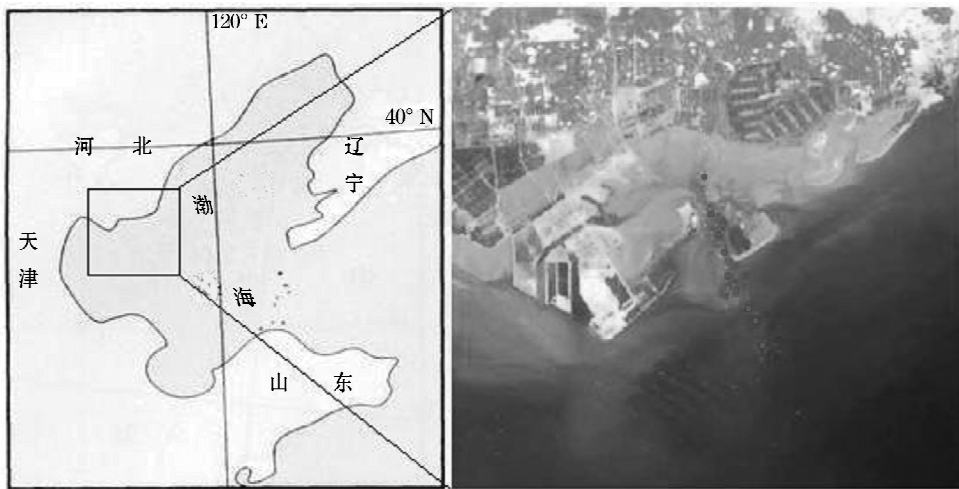


图 1 研究区及采样点示意图

Fig. 1 A sketch map of study area and sampling locations

水体光谱的测量与分析参照唐军武的“水面以上测量法”^[21]。对于未严格定标的光谱仪, 遥感反射率可通过式(20)计算:

$$R_{rs}(\lambda) = [S_{sw}(\lambda) - \rho S_{sky}(\lambda)]r_s / \pi S_p(\lambda) \quad (20)$$

式中, $S_{sw}(\lambda)$, $S_{sky}(\lambda)$, $S_p(\lambda)$ 分别为光谱仪测得的水体、天空光以及白板的信号值; r_s 为标准板的反射率; ρ 为水气界面反射率, 取值 0.029, 实测水体样点的反射率曲线见图 2。

由于光谱响应函数的不同, 对于相同的入射光, 不同传感器在同一波长位置处接收的辐亮度会有较大差异。因此, 为了便于比较, 需要计算实测水体的等效波段反射率(图 3):

$$\langle R_{rs} \rangle = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (R_{rs}) S_i(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) d\lambda \quad (21)$$

式中, $S_i(\lambda)$ 为 HJ-1A 星 CCD 的波段响应函数; λ_1 , λ_2 分别为响应函数对应波段的最大值和最小值。

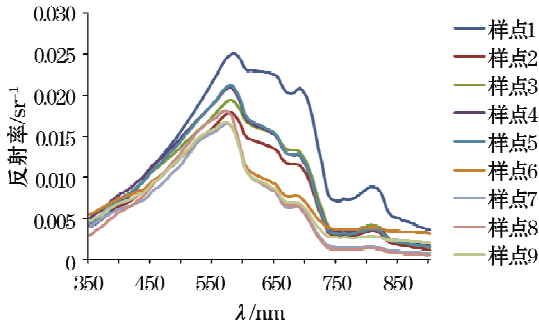


图 2 实测近海水体光谱曲线

Fig. 2 The measured spectral curves of coastal waters

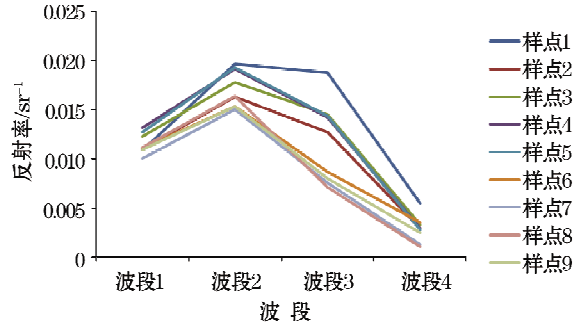


图 3 实测近海水体的等效波段反射率

Fig. 3 The measured reflectivity of equivalent band of coastal waters

2.3 大气校正结果分析

为了验证交叉辐射定标对 HJ-1A 星 CCD 影像近海水体反射率反演的影响,下面结合实测水体反射率对大气校正的结果进行比较和验证。图 4 和图 5 分别与图 3 相比显示,交叉定标结果经大气校正后得到的水体反射率的波段 1 和波段 4 的反射率明显降低,比星上定标结果经大气校正得到的水体反射率更接近于实测的水体反射率;波段 2 和波段 3 的差异不明显。从水体反射率曲线上看,交叉定标得到的反射率曲线更接近实测的反射率曲线。表 6 给出了每个样点的星上定标反射率和交叉定标反射率与实测反射率的相对误差,其中,对 HJ-1A 星 CCD 影像进行交叉定标后,反演得到的波段 1 的反射率比进行星上定标得到的结果相对误差降低了 10%,波段 4 的反射率相对误差则降低了 120%左右,波段 2 和波段 3 没有较大变化。可见,HJ-1A 星 CCD 影像的星上定标参数对于反演近海水体反射率是相对不稳定的,在进行近海水体一系列定量反演时,对其进行交叉辐射定标是必要的。

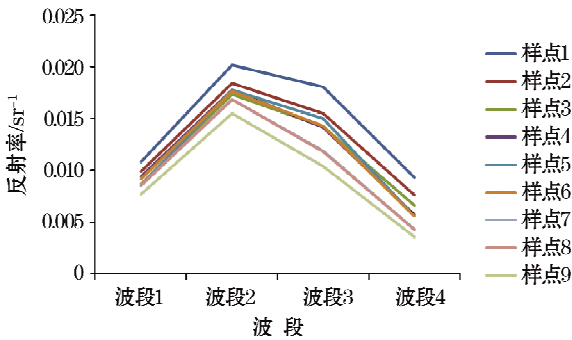


图 4 样点交叉定标反射率

Fig. 4 An example of the reflectivity resulting from the cross radiance calibration

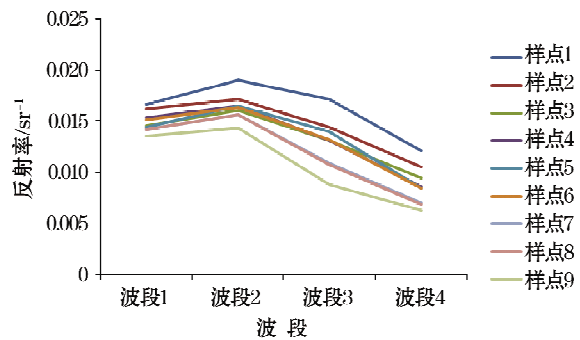


图 5 样点星上定标反射率

Fig. 5 An example of the reflectivity resulting from the satellite radiance Calibration

表 6 HJ-1A 星 CCD 星上定标反射率、交叉定标反射率与实测反射率的结果比较

Table 6 Comparison among the reflectivities resulting from satellite radiance calibration of CCD, cross radiance calibration and in-situ measurements

项 目	样点 1	样点 2	样点 3	样点 4	样点 5	样点 6	样点 7	样点 8	样点 9	
波 段 1	实测值	0.01084	0.01099	0.01228	0.01320	0.01276	0.01107	0.01002	0.01115	0.01095
	机上定标	0.01669	0.01621	0.01454	0.01538	0.01442	0.01514	0.01419	0.01419	0.01359
	交叉定标	0.01085	0.00990	0.00870	0.00945	0.00859	0.00924	0.00859	0.00859	0.00773
机上定标与实测值的平均相对误差为 31.0%，交叉定标与实测值的平均相对误差为 20.4%										
波 段 2	实测值	0.01963	0.01631	0.01776	0.01915	0.01932	0.01533	0.01506	0.01639	0.01534
	机上定标	0.01903	0.01719	0.01606	0.01649	0.01649	0.01634	0.01564	0.01564	0.01437
	交叉定标	0.02023	0.01843	0.01738	0.01783	0.01783	0.01768	0.01693	0.01693	0.01558
机上定标与实测值的平均相对误差为 7.6%，交叉定标与实测值的平均相对误差为 7.3%										
波 段 3	实测值	0.01876	0.01275	0.01447	0.01425	0.01441	0.00867	0.00758	0.00713	0.00800
	机上定标	0.01717	0.01442	0.01310	0.01310	0.01398	0.01321	0.01092	0.01079	0.00813
	交叉定标	0.01813	0.01553	0.01423	0.01423	0.01510	0.01434	0.01196	0.01185	0.01044
机上定标与实测值的平均相对误差为 22.2%，交叉定标与实测值的平均相对误差为 27.9%										
波 段 4	实测值	0.00550	0.00291	0.00332	0.00292	0.00276	0.00356	0.00126	0.00108	0.00250
	机上定标	0.01211	0.01056	0.00944	0.00859	0.00845	0.00845	0.00704	0.00690	0.00634
	交叉定标	0.00936	0.00764	0.00664	0.00578	0.00564	0.00564	0.00435	0.00435	0.00363
机上定标与实测值的平均相对误差为 250.6%，交叉定标与实测值的平均相对误差为 131.7%										

3 结 语

本研究基于 Landsat-5 TM 数据对 HJ-1A 星 CCD 的定标参数进行验证,认为在利用 HJ-1A 星 CCD 数据进行高精度水体反演时直接使用星上定标系数会存在较大误差,需要对星上定标参数进行修正,基于 Landsat-5 TM 数据对 HJ-1A 星 CCD 数据进行交叉定标在一定程度上提高了水体反射率反演的精度。由于辐射定标是进行定量遥感需要解决的首要问题,因此本研究为今后利用 HJ-1A 星 CCD 数据进行近海水体悬浮泥沙等的定量反演提供了基础。

参考文献(References):

- [1] LI C R, TANG L L, HU J, et al. Potential applications of HJ-1 optical satellites [J]. Science & Technology Review, 2008, 26 (13): 56-59. 李传荣, 唐伶俐, 胡坚, 等. HJ-1 光学卫星应用潜力[J]. 科技导报, 2008, 26 (13): 56-59.
- [2] WANG Q, WU C Q, LI Q. Environment satellite 1 and its application in environmental monitoring[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 1: 104-118. 王桥, 吴传庆, 厉青. 环境一号卫星及其在环境监测中的应用[J]. 遥感学报, 2010, 1: 104-118.
- [3] LIU X M, WANG Q, SUN Z P, et al. Assessment of ecosystem health of nature reserve based on HJ-1 remote sensing imagery [J]. China Environmental Science, 2011, 31(5): 863-870. 刘晓曼, 王桥, 孙中平, 等. 基于环境一号卫星的自然保护区生态系统健康评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 863-870.
- [4] XIA R, LI Y M, WU C Q, et al. Spatial distribution and variation of concentration of suspended solids in Taihu Lake based on HJ-1 satellite data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2): 197-203. 夏骥, 李云梅, 吴传庆, 等. 基于 HJ-1 号卫星数据的太湖悬浮物浓度空间分布和变异研究[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 197-203.
- [5] KUANG D, HAN X Z, LIU X, et al. Quantitative estimation of Taihu chlorophyll-a concentration using HJ-1A and 1 B CCD imagery [J]. China Environmental Science, 2010, 30(9): 1268-1273. 旷达, 韩秀珍, 刘翔, 等. 基于环境一号卫星的太湖叶绿素 a 浓度提取[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1268-1273.

- [6] WANG Z T, WANG Z F, LI Q, et al. Monitoring of PM₁₀ from HJ-1 CCD data[J]. China Environmental Science, 2011, 31(2): 202-206. 王中挺, 王子峰, 厉青, 等. 环境一号卫星在监测大气 PM₁₀中的应用[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 202-206.
- [7] FENG L, WU W, CHEN X L, et al. Diseases and insect pests area monitoring for winter wheat based on HJ-1 CCD imagery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 213-219. 冯炼, 吴炜, 陈晓玲, 等. 基于 HJ 卫星 CCD 数据的冬小麦病虫害面积监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 213-219.
- [8] LI J G, GU X F, LI X Y, et al. Validation of IJ-1B thermal band on-board calibration and its sensitivity analysis[J]. Remote Sensing Information, 2011, 1: 3-8. 李家国, 顾行发, 李小英, 等. IJ-1B 热红外通道星上定标精度检验与敏感性分析[J]. 遥感信息, 2011, 1: 3-8.
- [9] HAN Q J, MIN X J, FU Q Y. Research of onboard calibration and cross-calibration of thermal infrared channel of HJ-1B[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(4): 42-48. 韩启金, 闵祥军, 傅俏燕. “环境一号”热红外通道星上定标与交叉定标研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(4): 42-48.
- [10] GUO X J, WANG Y C, WANG A H, et al. A strip noise removal method of hyperspectral data IJ-1A[J]. Remote Sensing Information 2011, 1: 54-58. 郭兴杰, 王阳春, 汪爱华, 等. IJ-1A 高光谱数据的条带噪声去除方法研究[J]. 遥感信息, 2011, 1: 54-58
- [11] ADEL A M S, REINLDO A V. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1987, 5(2): 128-137.
- [12] TURIN G L, CLAPP F D, JOHNSON T L, et al. A statistical model of urban multipath propagation [J]. IEEE Trans. Veh. Techno., 1972, (21): 1-9.
- [13] YANG Z D, GU S Y, QIU H, et al. CBERS-1's CCD image quality evaluating and cross calibrating study [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(2): 113-120. 杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源卫星一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 113-120.
- [14] PENG G X, HE Y H, LI J, et al. Study on CBERS's CCD image cross calibration and atmospheric correction [J]. J. Infrared Millim Waves, 2007, 26(1): 22-25. 彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴资源地球 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): 22-25.
- [15] GORDON H R, WANG M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS; a preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 1994, 33(3): 443-42.
- [16] GORDON H R. Radiative transfer in the atmosphere for correction of ocean color remote sensing[M]//BARALE V, SCHLITTENHARDT P M. Ocean Color: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience. London: Kluwer Academic Publishers, 1993: 33-77.
- [17] GORDON H R, CASTANO D J. Coastal zone color scanner atmospheric correction algorithm: Multiple scattering effects [J]. Applied Optics, 1987, 26(11): 2111-2122.
- [18] TANG J W, MA C F, NIU S L, et al. The study on quantitative retrieval of water composition based on CBERS-02 CCD camera data [J]. Science in China Ser. E: Information Sciences(Suppl. 1), 2005, 35: 156-170. 唐军武, 马超飞, 牛生丽, 等. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料量化反演水体成分初探. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2005, 35(增刊 1): 156-170.
- [19] GORDON H R, CLARK D K. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner image [J]. Applied Optics, 1981, 20(24): 4175-4180.
- [20] NECKEL H, LABS D. The solar radiation between 3,300 and 12,500 [J]. Solar Physics, 1984, 90: 205-258.
- [21] TANG J W, TIAN G L, WANG X Y, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37-44. 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.
- [22] WANG M H, GORDON H R. A simple moderate accurate atmospheric correction algorithm for SeaWiFS. Remote Sensing of Environment, 1994, 50: 231-239.
- [23] LI J S, ZHANG B, CHEN Z C, et al. The study on atmospheric correction of CBERS image by using MODIS[J]. Science in China: Ser. E Technological Sciences, 2006, 36(Suppl. 1): 141-150. 李俊生, 张兵, 陈正超, 等. MODIS 数据辅助中巴资源卫星图像大气校正研究. 中国科学: E 辑, 2006, 36(增刊 1): 141-150.
- [24] GONG S Q. The study on water constituents retrieval of Taihu Lake based on a semi-empirical model [D]. Nanjing: School of Geography Science in Nanjing Normal University, 2007. 龚绍琦. 基于半分析模型的太湖水体组分浓度反演研究[D]. 南京: 南京师范大学地理科学学院, 2007.

Precision Verifications of Radiance Calibration and Coastal Water Atmospheric Correction for Satellite HJ-1A

XIAO Yan-fang, ZHU Lin, ZHAO Wen-ji

(Key Lab of Three Dimension Information Acquisition and Application, Capital Normal University,
Beijing 100048, China)

Abstract: For the purpose of quantitative inversion in coastal waters by using the CCD data of Satellite HJ-1A, the precision of radiance calibration coefficients of the CCD mounted on Satellite HJ-1A was validated and a cross radiance calibration was performed based on the data from Landsat-5 TM. And then, an inversion was made of the reflectivity of coastal waters on the basis of all these data. By comparing the results from the inversion and those from the measurements, it has been found that the cross radiance calibration for the CCT data of Satellite HJ-1A can, to a certain extent, improve the precision of the inversion of the reflectivity of coastal waters. These results indicate that the onboard radiance calibration coefficients of the CCD images on Satellite HJ-1A are not precise so enough that the cross radiance calibration should be also applied when the CCD data from Satellite HJ-1A are used to carry out the quantitative inversion in the coastal waters.

Key words: cross radiance calibration; onboard radiance calibration; reflectivity inversion; coastal waters; HJ-1A; Landsat-5 TM

Received: September 6, 2010