

环境一号卫星 CCD 相机水体信息采集特性分析

黄妙芬^①, 牛生丽^②, 孙中平^③, 吴传庆^③, 赵祖龙^①, 化成君^①

(^① 大连海洋大学, 大连 116023; ^② 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;

^③ 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 利用覆盖我国 4 大海区共 88 景图像数据, 针对 4 波段 CCD 相机 (HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2) 在水体中的信息采集特性进行分析。结果表明: (1) HJ-1A 和 B 星虽不是水色卫星, 但其 CCD 相机在水体中依然有一定的信息, 可作为水色遥感器服务于水环境; (2) HJ-1B/CCD1 在南海海域水体信息采集过程存在明显的太阳耀斑现象, 因而在水色信息提取时太阳耀斑是一个不可忽略的因子; (3) 无论是在一类水体还是在二类水体, 各遥感器的近红外波段皆存在水体信息采集为零的现象, 其中 HJ1B-CCD2 尤为明显。利用近 10 景涵盖了 HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2 数据, 以及同时过境的 EOS/MODIS, 采用基于遥感器入瞳处总辐亮度的交叉定标方法进行交叉辐射定标, 获取适用于水体目标的交叉辐射定标参数。最后根据瑞利散射和气溶胶散射的计算值, 以及获取的交叉定标系数, 反推出 HJ1B-CCD2 可能接受到的灰度值。

关键词: 环境一号卫星 (HJ-1); 水体信息; 区域灰度值; 近红外波段; 交叉定标系数

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2010.04.013

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2010)110-0068-08

Analysis on Characteristics of the Water Information Collected by "HJ-1" Satellite Multispectral CCD Sensors

HUANG Miao-fen^①, NIU Sheng-li^②, SUN Zhong-ping^③, WU Chuan-qing^③, ZHAO Zu-long^①, HUA Cheng-jun^①

(^① Dalian Ocean University, Dalian 116023; ^② National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081;

^③ Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection (SEC, MEP), Beijing 100029)

Abstract: The home-made satellites 'HJ-1A' and 'HJ-1B' were successfully launched in September 2008. Their role is to serve the country's disaster and environmental monitoring. The main sensors on the satellites are 4-band CCD cameras with a wide coverage, hyperspectral imager (HSI) and infrared cameras (IRS). In this paper, the water information characteristics of the 4-band CCD cameras (HJ-1A/CCD1, HJ-1A/CCD2, HJ-1B/CCD1, HJ-1B/CCD2) were analyzed. The results showed that (1) although HJ-1A and B are not water color satellite, but each sensor still has some information about the water, so it can be used as water color remote sensors for water environment study; (2) for HJ-1B/CCD1 during water information collection in the South China Sea exists an obvious phenomenon of solar flares, so in the extraction of water color information that should not be ignored; (3) whether in case 1 or in case 2, this situation happens, the water body information of near-infrared bands of each sensor is zero, especially of HJ1B-CCD2. The four visible and near-infrared spectral bands of HJ-1/CCD1, HJ-1A/CCD2, HJ-1B/CCD1 and HJ-1B/CCD2 were calibrated respectively using cross-calibration methods based on the EOS/MODIS. The latter has the high radiation precision, and simultaneously passed through the South China Sea. The Radiometric Calibration coefficients of water-body targets of "HJ-1" satellite multispectral CCD sensors were obtained and validated. Finally, according to the calculation value of rayleigh scattering and aerosol scattering, HJ1B-CCD2 should be able to receive the gray value; this provides a reference to the sensor data application.

Key words: environmrnt-1 satellite (HJ-1); water body information; regional gray value; near-infrared bands; cross-calibration coefficients

收稿日期: 2009-09-23 **修订日期:** 2009-10-25

基金项目: 十一五“科技支撑项目”基于环境一号等国产卫星的环境遥感监测关键技术及软件研究“(2008BAC34B05-5); 国家自然科学基金项目“水体石油类污染遥感探测机理和识别模型研究(编号:40771196)。”

作者简介: 黄妙芬(1963~), 女, 广东汕头人(汉族), 博士, 教授, 主要从事水色遥感和热红外遥感研究。

E-mail: hmf808@163.com

1 引言

为提高我国灾害与环境监测的水平,我国建立了环境与灾害预报小卫星星座。在“十一五”期间建成的环境与灾害监测预报小卫星星座由2颗光学小卫星和1颗合成孔径雷达小卫星构成,分别称为环境一号A星(HJ-1A)、环境一号B星(HJ-1B)和环境一号C星(HJ-1C)。HJ-1A/1B星于2008年9月6日成功发射,HJ-1A星搭载了CCD相机和超光谱成像仪(HSI),HJ-1B星搭载了CCD相机和红外相机(IRS)。在HJ-1A和HJ-1B卫星上均装载的2台CCD相机设计原理完全相同,以星下点对称放置,平分视场、并行观测,联合完成对地刈幅宽度为700km、地面像元分辨率为30m、4个谱段的推扫成像。卫星的设计寿命是3年,至今已经运行整一年了,其最主要的任务是观测和采集地面灾害与环境遥感信息,表1为HJ-1A和1B星搭载的覆盖多光谱可见光相机技术参数^[2]。

利用遥感技术对地进行观测,获取地面信息,了解传感器采集的数据特性是后续数据应用中极为关键的环节之一。为此利用覆盖我国4大海区共88景图像数据,针对HJ-1A和1B星上分别搭载的2个CCD相机(HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2)的4个波段在采集水体目标信息的特性进行分析,旨在为水色遥感研究提供参考。

在卫星传感器数据的使用中,传感器的定标参数是至关重要的,它是量化遥感的基础,尤其海洋水色遥感对量化的要求更高^[3]。我国的卫星传感器普遍缺少星上定标装置,HJ-1卫星也不例外。2008年10月该卫星上天不久,相关部门就在中国辐射定标场之一(敦煌)进行了第一次在轨定标实验,获取第一批定标参数。虽然在中国辐射校正场可以组织在轨辐射校正实验,但实验费用昂贵。基于水体目标的交叉定标方法获取定标辐射系数可以弥补这种不足,并为水体提供一种新的获取较精确离水辐亮度的方法。为此利用多时相近10景涵盖了HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2数据,以及同时过境的

表2 冬季4波段CCD在一类水体(南海)区域灰度平均值

传感器	Band1	Band2	Band3	Band4
HJ1A-CCD1	24	13	8	4
HJ1A-CCD2	29	14	10	7
HJ1B-CCD1	27	15	11	4
HJ1B-CCD2	25	8	4	1

EOS/MODIS,采用基于遥感器入瞳处总辐亮度的交叉定标方法,获取适用于水体目标的辐射定标系数。

表1 HJ-1A/1B宽覆盖多光谱可见光相机主要技术指标

项目	性能	
幅宽(km)	360(2台组合 \geq 700km)	
星下点地面像元分辨率(m)	30	
谱段设置(μm)	B1	0.43~0.52
	B2	0.52~0.60
	B3	0.63~0.69
	B4	0.76~0.90
信噪比(S/N)	\geq 48dB	
增益控制	每个谱段设置2档增益控制,各谱段分别可调	
动态范围 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{Sr}\mu\text{m})$]	B1	316/197
	B2	334/195
	B3	246/145
	B4	246/163
中心像元配准精度	\pm 0.3像元	
量化值(bit)	8	
定标精度	相对定标精度5%, 绝对定标精度10%	

2 HJ-1/CCD相机水体区域灰度值分析

HJ-1/CCD相机的重要用途之一就是对我国水环境状况进行监测和预报,因而了解其在水体中获取的信息特性非常重要。利用覆盖我国渤海、黄海、东海和南海4个海区的遥感数据进行水体区域灰度值分析。在这4个海区中,渤海、黄海、东海、南海北部和西部属于二类水体,台湾岛南部海域和三亚南部海域属于一类水体。

在一类水体区域平均灰度值分析中,为保证数据具有可比性,取path/row为448/91或449/92 HJ-1遥感图像,冬季以2月份图像为代表,夏季以8月份图像为代表,统计结果见表2~3。表4~7为各传感器相应波段在二类水体渤海、黄海、东海、南海北部和西部的区域平均灰度值。

表3 夏季4波段CCD在一类水体(南海)区域灰度平均值

传感器	Band1	Band2	Band3	Band4
HJ1A-CCD1	38	25	21	14
HJ1A-CCD2	29	12	6	5
HJ1B-CCD1	35	23	21	13
HJ1B-CCD2	29	10	5	0

表 4 HJ-1A/CCD1 在二类水体区域灰度平均值

区域	Band1	Band2	Band3	Band4
兴凯湖	28	23	24	12
东海	36	26	25	16
台湾海峡	41	27	18	9
辽东湾	39	30	25	11

表 5 HJ-1A/CCD2 在二类水体区域灰度平均值

区域	Band1	Band2	Band3	Band4
广东近岸海域	23	12	5	5
东海	26	13	8	6
渤海	27	17	14	8
北部湾	41	22	18	12

表 6 HJ-1B/CCD1 在二类水体区域灰度平均值

区域	Band1	Band2	Band3	Band4
雷州半岛附近海域	29	16	10	2
广东西部沿海	36	26	18	7
东海	34	24	21	12
辽东湾	46	34	29	16

表 7 HJ-1B/CCD2 在二类水体区域灰度平均值

区域	Band1	Band2	Band3	Band4
广东沿海	24	7	2	0
雷州半岛附近海域	56	31	28	7
东海	28	9	3	0
珠江入海口	25	8	1	0

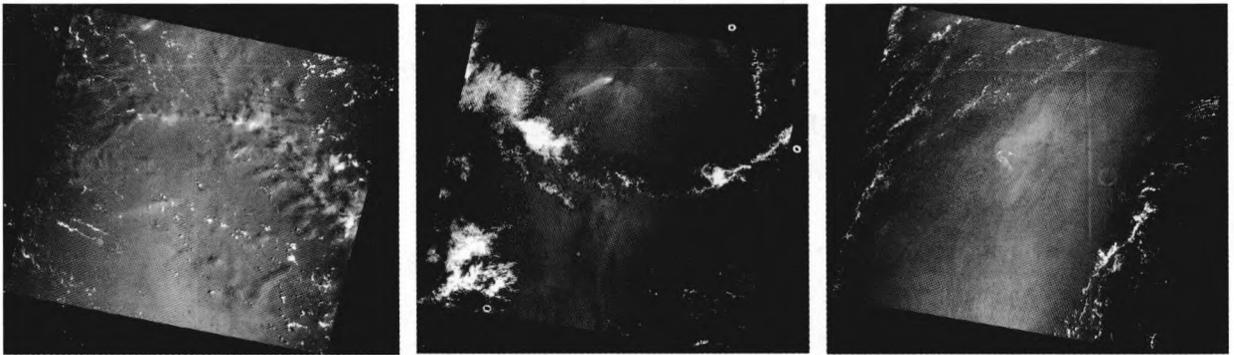


图 1 HJ-1B/CCD1 在南海海域上的太阳耀斑现象

根据表 2~表 7,可得出如下结论:(1)在一类水体,HJ-1A/CCD1 各波段区域灰度平均值冬季和夏季分别为 4~24 和 14~38;HJ-1A/CCD2 为 7~29 和 5~29;HJ-1B/CCD1 为 4~27 和 13~35;HJ-1B/CCD2 为 1~25 和 0~29;冬夏差异不是很大;(2)在二类水体,HJ-1A/CCD1 各波段灰度平均值在 28~39,23~30,18~25,9~16 之间;HJ-1A/CCD2 在 23~41,12~22,5~18,5~12 之间;HJ-1B/CCD1 在 29~46,16~34,10~29,2~16 之间;HJ-1B/CCD2 在 24~56,7~31,1~28,0~7 之间。虽然 HJ-1A 和 B 不是水色卫星,但各遥感器在水体中依然有一定的信息,可作为水色遥感器服务于水环境。

在对图像数据分析过程,发现 HJ-1B/CCD1 在采集水体信息时,存在明显的太阳耀斑现象,见图 1,这可能与环境一号 CCD 相机为非水色遥感器,其观测角度没有针对水体特性而设计有关。因而如果该遥感器要应用于水体的话,数据采集角度是一个

需要考虑的问题。在水体信息提取中,太阳耀斑作为水色信息提取过程的一个噪声,在这种情况下不能忽略而必须考虑如何去除。HJ-1A/CCD1 偶尔也有太阳耀斑现象的出现。

3 HJ-1/CCD 相机近红外波段水体信息特性分析

从表 7 可以看到,HJ-1B/CCD2 近红外波段存在为零的情况。根据海洋遥感信息采集原理,当不考虑大气粒子多次散射效应时,HJ-1/CCD 遥感器接收的水体总辐亮度可由下式表示^[4]:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t_d(\lambda, \theta_v)L_s(\lambda) + t_o(\lambda, \theta_0)L_w(\lambda) + L_b(\lambda) + t_d(\lambda, \theta_v)L_f(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ 为波长(um); $L_t(\lambda)$ 为卫星探测的波长为 λ 的辐亮度($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$); $L_r(\lambda)$ 为空气分子瑞利散射的辐亮度($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$); $L_a(\lambda)$ 为大气气溶胶米氏散射的辐亮度($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$); $L_s(\lambda)$ 为海表面镜面反射($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$)(可能包括

太阳耀斑的影响)(可以忽略); $L_w(\lambda)$ 为离水辐亮度 ($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$), 离水辐射是被表层海水散射的太阳辐射, 不是海洋自发辐射, 因此不用乘以发射比(率); $L_f(\lambda)$ 为海面泡沫或“白帽”辐射(可以忽略) ($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$); $L_b(\lambda)$ 为来自水体底部的反射辐射 ($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$)(因为选择的区域一般是较深水域, 因而此项可以忽略); $t_0(\lambda, \theta_0)$ 为太阳方向的大气漫射透射率(无量纲); θ_0 是太阳天顶角; $t_d(\lambda, \theta_v)$ 是遥感器方向的大气漫射透射率(无量纲); θ_v 是遥感器天顶角。

公式(1)去掉波长的符号及可忽略的项后, 可简

化为

$$L_t = L_r + L_a + t_0 L_w \quad (2)$$

根据公式(2), 在清洁水体, 如果离水辐亮度 (L_w)为零, 至少还有瑞利散射 (L_r)和气溶胶散射 (L_a)的存在, 所以遥感器探测到的总辐亮度从原理上来讲不应为零, 灰度值也就不为零。

对已经获取的涵盖我国 4 大海区(渤海、黄海、东海和南海)共 88 景 HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2 图像, 逐景进行近红外波段为零现象检测, 统计结果见表 8。

表 8 近红外波段水体信息存在零值统计值

遥感器	总景数	近红外为零景数	出现概率	存在灰度值 ≤ 5 景数	出现概率
HJ1A-CCD1	31	11	35%	20	65%
HJ1A-CCD2	20	1	5%	12	60%
HJ1B-CCD1	29	7	24%	13	45%
HJ1B-CCD2	28	27	96%	28	100%

从表 8 可见, 近红外波段水体信息为零现象最严重的是 HJ1B-CCD2, 出现的概率高达 96%, 其次是 HJ1A-CCD1(35%), 再次是 HJ1B-CCD1(24%), HJ1A-CCD2 出现近红外为零的概率最小(5%), 虽然 HJ1A-CCD2 出现零的概率很小, 但从获取数据的整体来看, 其红外和近红外的灰度值整体都是偏低的。另外从全年数据的分布来看, HJ1B-CCD1 2008 年为零情况较多, 2009 年以后明显改善。HJ1A-CCD1 和 HJ1A-CCD2 的近红外波段灰度值在 2009 年 7 月以后也得到了改善。

进一步对 HJ1A/CCD1、HJ1B/CCD1 和 HJ1B/CCD2 图像分析表明, 在我国的各个海区各遥感器的都有近红外波段为零的情况。图 2 和图 3 是用 ENVI 软件按 HJ1B/CCD2 band3(R)、band4(G)、band2(B)波段显示的各海区遥感图像和同一海域 (path/row: 448/91) 在不同时间获取的图像。其中 G 代表的是近红外波段, 从灰度值显示来看, 其近红外波段皆为零。从图 2 和图 3 可见, HJ1B/CCD2 在不同的海域在不同的时间, 其近红外波段为零现象比较突出。

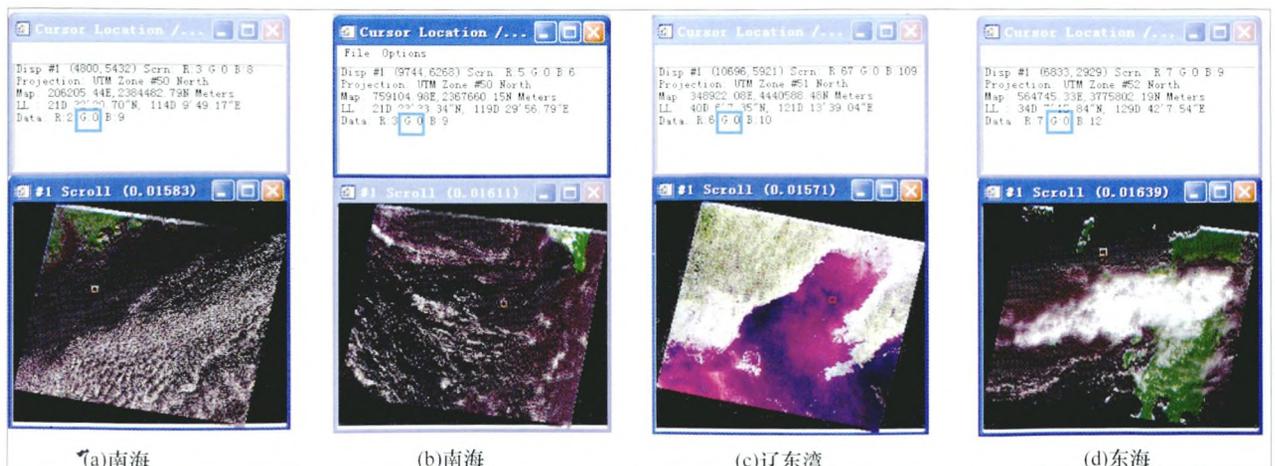


图 2 HJ-1B/CCD2 band3(R)、band4(G)、band 2(B)波段合成图(图像中小红方框是对应灰度值显示位置)

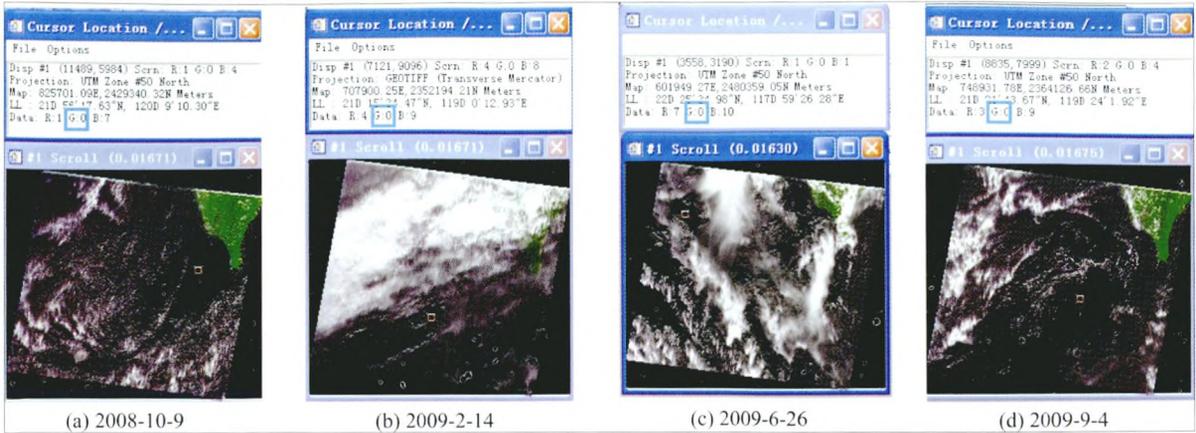


图3 HJ-1B/CCD2 同一海域近红外波段水体信息为零的时间序列图

(band3(R)、band4(G)、band 2(B)波段合成图,图像中小红方框是对应灰度值显示位置)

4 基于水体目标的交叉辐射定标

4.1 定标原理

卫星传感器定标一般需要两个步骤: 传感器发射前定标和传感器在轨定标。传感器发射前定标有两种方法: 一种是在实验室内, 利用标准源对传感器的响应进行定标; 另一种是野外定标, 这是为克服室内定标光源与太阳光谱有较大差异而导致的定标误差的方法。传感器在轨定标又分为: 基于太阳/月亮的星上定标; 在轨外定标(替代定标); 交叉定标。基于太阳的星上定标系统, 是利用直射太阳光照射已知反射率的漫反射板, 传感器的整个光路对漫射板进行观测, 从而实现定标。基于月亮的星上定标系统是利用月亮稳定的表面作为基准对仪器进行定标。在轨外定标(替代定标)是利用地面大面积、均匀的目标, 在精确测量地表特性和大气特性的基础上, 结合辐射传输计算, 得到卫星入瞳处的辐亮度, 从而得到定标系数; 我国的辐射定标场(敦煌和青海湖)基本采用的是这种方法^[5-7]。交叉定标是指利用一个已知高精度的传感器数据校正另外一个传感器, 目前交叉定标方法主要有两种^[8-9]: (1) 基于传感器入瞳处总辐亮度的方法; (2) 基于离水辐亮度的方法。

基于传感器入瞳处总辐亮度的相对辐射定标方法, 就是根据 MODIS 提供的归一化辐亮度值, 将其作为 HJ-1 对应波段的归一化离水辐亮度求出对应的离水辐亮度 L_w , 然后根据卫星过境时传感器和太阳的观测几何、臭氧浓度、气溶胶浓度和大气压, 分别求出瑞利散射 L_r 、气溶胶散射 L_a 和大气漫散射透过率 t_0 , 再根据公式(2)得到模拟的 HJ-1 对应辐亮度值^[6]。其计算流程见图 4。

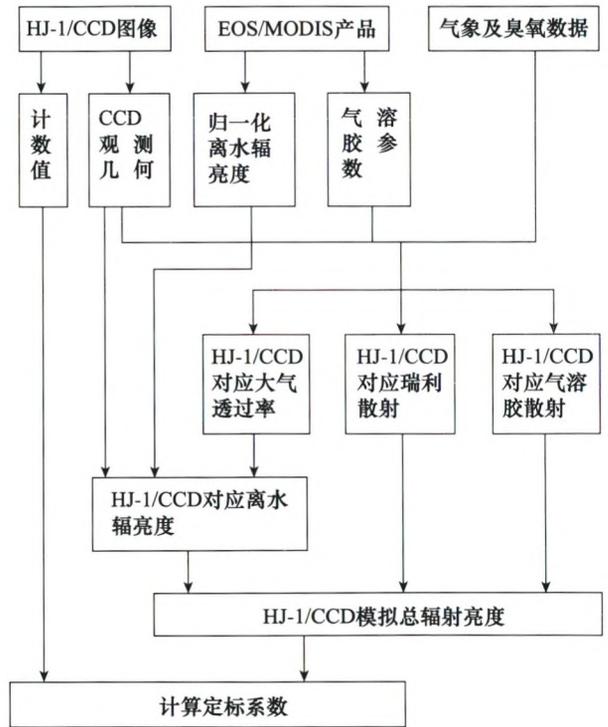


图4 基于传感器入瞳总辐亮度的交叉定标流程图

4.2 定标数据源

相对定标区域的选取一般要求为清洁水体。我国的东海、黄海、渤海主要是二类水体区域, 只有南海包括了二类水体和部分一类水体区域, 因而作交叉定标, 选择南海区域最为理想, 通过分析已经获取的南海和台湾一带的 HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2 图像, 发现在晴空的清洁水体区域, 各波段的灰度值非常低, 鉴于上述原因, 在实际定标时选择次清洁水域作为定标区域。

由于 HJ-1 卫星的回归周期是 31 天, 加上南海

海域大部分时间为云覆盖,因而数据获取以及数据质量受到限制,加上还需有准同步过境的 MODIS 数据,这使得目前对每个遥感器只能各选择 2 景图像进行交叉定标,详细信息见表 9。

表 9 HJ-1/CCD 和 EOS/MODIS 交叉定标数据

遥感器名称	过境日期	定标区域	HJ-1 文件名	EOS/MODIS 文件名
HJ-1A/CCD1	20081228	台湾南部海域	HJ1A-CCD1-448-91-L20000049825	A2008363051000.L2_LAC
HJ-1A/CCD1	20090205	台湾南部海域	HJ1A-CCD1-449-91-20090205-L20000063491	A2009036052000.L2_LAC
HJ-1A/CCD2	20090312	南海海域	HJ1A-CCD2-454-92-20090312-L20000079776	A2009071055000.L2_LAC
HJ-1A/CCD2	20090116	南海海域	HJ1A-CCD2-449-91-20090116-L20000056859	A2009016054500.L2_LAC
HJ-1B/CCD1	20081129	台湾南部海域	HJ1B-CCD1-448-91-L20000037052	A2008334054000.L2_LAC
HJ1B-CCD1	20090611	台湾南部海域	HJ1B-CCD1-448-92-20090611-L20000126651	A2009162053000.L2_LAC
HJ-1B/CCD2	20090417	东海海域	HJ1B-CCD2-448-80-20090421-L20000101506	A2009071055000.L2_LAC
HJ-1B/CCD2	20090526	台湾南部海域	HJ1B-CCD2-448-91-20090526-L20000118938	A2009146053000.L2_LAC

4.3 计算定标系数

在海洋遥感中常用的定标方法是采用定标模型,最简单的定标公式是线性公式,它简单地将遥感器的有效计数值 DN 和遥感器入瞳处的辐射量 L_i 描述为线性关系^[4]:

$$L_i = a * DN \quad (3)$$

这里 a 即为定标参数($DN/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)。根据公式(3)可以获得各遥感器对应波段的定标系数,见表 10。

表 10 HJ-1/CCD 对应波段定标系数

遥感器名称	b1	b2	b3	b4
HJ-1A/CCD1	0.43891	0.45358	0.80456	0.44181
HJ-1A/CCD2	0.50353	0.59179	0.82355	0.47542
HJ-1B/CCD1	0.63335	0.52586	0.45696	1.07027
HJ-1B/CCD2	0.43825	0.55844	0.59491	0.85486

4.4 差值分析

表 11 是利用 2008 年 10 月在敦煌辐射校正场获取的 HJ-1A/1B 星 CCD 绝对辐射定标系数,利用绝对定标系数将 DN 值图像转换为辐亮度图像的公式为^[10]:

$$L_i = DN/a + L_0 \quad (4)$$

式中 L_i 为辐亮度 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, a 为绝对定标系数增益, L_0 为偏移量 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。

将表 10 的交叉定标系数和表 11 的绝对辐射定标系数,应用于 2008 年和 2009 年获取的辽东湾 HJ-1 数据,分别获取 4 个遥感器 HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2 各波段对应的离水辐亮度值,见表 12~表 15。

表 11 HJ-1A/B 星 CCD 绝对辐射定标系数

卫星	遥感器	参数	定标系数			
			Band1	Band2	Band3	Band4
HJ-1A	CCD1	$a (DN/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	0.5763	0.5410	0.6824	0.7209
		$L_0 (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	9.3183	9.1758	7.5072	4.1484
	CCD2	$a (DN/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	0.6360	0.5910	0.8142	0.8768
		$L_0 (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	7.5575	7.0944	4.1319	1.2232
HJ-1B	CCD1	$a (DN/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	0.5329	0.52895	0.68495	0.72245
		$L_0 (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	1.6146	4.0052	6.2193	2.8302
	CCD2	$a (DN/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	0.5782	0.5087	0.6825	0.6468
		$L_0 (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	3.4608	5.8769	8.0069	8.8583

表 12 HJ-1A/CCD1 两组系数反演的离水辐亮度

波段	B1	B2	B3	B4
灰度值	22	15	16	12
定标系数计算的离水辐亮度	9.65602	6.8037	12.87296	5.30172
绝对辐射定标系数计算的离水辐亮度	47.49286	36.90223	30.95386	20.79426

表 13 HJ-1A/CCD2 两组系数反演的离水辐亮度

波段	B1	B2	B3	B4
灰度值	23	13	12	6
交叉定标系数计算的离水辐亮度	11.58119	7.69327	9.8826	2.85252
绝对辐射定标系数计算的离水辐亮度	43.72102	29.09102	18.87029	8.066266

表 14 HJ-1B/CCD1 两组系数反演的离水辐亮度

波段	B1	B2	B3	B4
灰度值	24	19	15	3
交叉定标系数计算的离水辐亮度	15.2004	9.99134	6.8544	3.21081
绝对辐射定标系数计算的离水辐亮度	46.65119	39.92542	28.11871	6.982737

表 15 HJ-1B/CCD2 两组系数获取的离水辐亮度

波段	B1	B2	B3	B4
灰度值	26	14	15	3
交叉定标系数计算的离水辐亮度	11.3945	7.81816	8.92365	2.56458
绝对辐射定标系数计算的离水辐亮度	48.42794	33.39803	29.98492	13.49652

2008年5月在辽东湾现场测定的40个光谱数据表明,对应HJ-1/CCD相机4个波段的离水辐亮度总体来看,此区域的离水辐亮度介于4~35Wm⁻²um⁻¹sr⁻¹。平均而言,对应HJ-1/CCD相机4个波段的离水辐亮度分别为:b1:8~25Wm⁻²um⁻¹sr⁻¹; b2:10~29Wm⁻²um⁻¹sr⁻¹; b3:10~26Wm⁻²um⁻¹sr⁻¹; b4:6~15Wm⁻²um⁻¹sr⁻¹。另外从表12~15还可看到,采用绝对辐射定标系数计算的离水辐亮度,其值远远高于交叉辐射定标系数获取的离水辐亮度值,而且高于实测值。

4.5 定标系数的应用

由前面的分析可知,各CCD的第四波段(近红外波段)不同程度存在水体信息采集为零的现象,即总辐亮度为零的现象。根据公式(2)可知,如果离水辐亮度(L_w)为零,至少还有瑞利散射(L_r)和气溶胶散射(L_a)的存在,所以总辐亮度不应为零,即传感器接受的灰度值不为零。那么瑞利散射(L_r)和气溶胶散射(L_a)分别是多少呢?

瑞利散射L_r的单次散射计算式为^[11]:

$$L_r(\theta_v, \varphi_v, \theta_0, \varphi_0) = (F_0' \omega_0 \tau_r) / \cos \theta_v (Pr(\alpha-) + [\rho(\theta_v) + \rho(\theta_0)] Pr(\alpha+)) \quad (5)$$

其中,τ_r是大气分子散射光学厚度;+表示从大气到海面,再向扫描方向传输;-表示从大气直接到扫描仪的方向;Pr(α-)为大气的后向散射函数;Pr(α+)为大气的向前散射函数;ρ(θ_v)和ρ(θ₀)分别为针对卫星天顶角和太阳天顶角的水表反射率;[ρ(θ) + ρ(θ₀)] Pr(α+)表示大气向前散射到达海面,经反射再向扫描仪散射的贡献;在避开水汽H₂O和氧气O₂吸收的波段,有ω₀=1。

L_a的多次散射计算式为^[12]:

$$L_a(\theta_v, \varphi_v, \theta_0, \varphi_0) = (F_0' \omega_a \tau_a) / \cos \theta (Pa(\alpha-) + [\rho(\theta_v) + \rho(\theta_0)] Pa(\alpha+)) \quad (6)$$

式中,ω_a气溶胶单次散射反照率,在强烈吸收情况除外,ω_a=1;τ_a为气溶胶光学厚度,在本研究中通过MODIS 869nm波段的值计算得出(MODIS与CCD2过境时刻相差10分钟);ρ(θ_v)和ρ(θ₀)分别为针对卫星和太阳天顶角的水表反射率。

利用公式(5)和(6),针对四景HJ-1B/CCD2图像,分别计算了卫星过境时的瑞利散射(L_r)和

气溶胶散射(L_a),同时假定离水辐亮度为零,根据公式(2)计算出遥感器能接受到的水体总辐亮度 L_t ,进一步利用 HJ-1B/CCD2 基于水体目标获取的交叉定标系数 0.85486(见表 11),计算了 HJ-1B/CCD2 能获取的灰度值,计算结果见表 16。由

表 16 HJ-1B/CCD2 各物理量的计算值

文件名	像元的实际灰度值	计算的瑞利散射(L_r) ($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$)	气溶胶散射(L_a) ($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$)	水体总辐亮度 L_t ($Wm^{-2}um^{-1}sr^{-1}$)	估算的像元灰度值
449-91-20090118-L20000057877	0	0.142526	22.90126	23.04379	27
448-92-20090321-L20000083519	0	0.167996	9.230765	9.398761	11
449-91-20090530-L20000120829	0	0.176355	11.93841	12.11477	14
449-92-20090630-L20000136000	0	0.17273	5.811084	5.983814	7

5 结束语

HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2、HJ-1B/CCD1、HJ-1B/CCD2 近红外波段在水体信息采集中都存在不同程度为零的现象,其中 HJ-1B/CCD2 最为凸显,HJ-1A/CCD1、HJ-1A/CCD2 和 HJ-1B/CCD1 在 2009 年 6 月以后这种近红外水体信息为零的现象逐渐得到改善。究其原因有待进一步探讨。

HJ-1B/CCD1 在南海海域水体信息采集过程中存在明显的太阳耀斑现象,HJ-1A/CCD1 偶尔也有太阳耀斑现象的出现,这可能与环境一号 CCD 相机为非水色遥感器,其观测角度没有针对水体特性而设计有关,因而在水体信息提取中,不可忽略太阳耀

斑的影响。建议在海洋上空瑞利散射变化不大,但气溶胶散射变化较大,显然遥感器接受到的灰度值应该不为零,根据瑞利散射和气溶胶散射反推其值,应该在 7~27 之间,这与前面的区域灰度平均值基本一致的。

斑的影响。建议在水体相关应用领域中,使用环境一号 CCD 相机数据时先对数据质量进行检测。

本文的交叉定标系数为水体辐亮度的获取提供了一种新的方法。通过对敦煌场获取的定标数据,与本文获取的定标系数反演得到的离水辐亮度值进行对比,用陆地场定标系数获取辐亮度值,其值普遍高于交叉定标系数定标获取的离水辐亮度精度,因而在水质定量遥感研究中,直接使用陆地定标场获取的定标系数必须慎重。

根据所计算的瑞利散射和气溶胶散射,以及获取的交叉定标系数,反推出 HJ1B/CCD2 可能接受到得灰度值在 7~27 之间,与区域灰度平均值基本一致,这为寻找波段 4 采集的水体信息为零的原因提供了参考。

参考文献

- [1] 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,2010,14(1):113-121.
- [2] 国家环境保护部环境卫星中心筹备办公室.“环境一号”A/B 卫星数据接收情况介绍[R]. 2008.
- [3] 黄妙芬,邢旭峰,宋庆君,等. 反射率基法获取北京一号小卫星多光谱 CCD 辐射定标系数[J]. 资源科学,2009,31(3):509-514.
- [4] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005. 69-74,182-183.
- [5] 牛生丽. HY-1 COCTS 与 SeaWiFS 的交叉定标[D]. 国家海洋环境预报中心,2004.
- [6] 唐军武,顾行发,牛生丽,等. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标[J]. 中国科学, E 辑,2005(增刊):59-69.
- [7] Tang J W. The system calibration and validation of HY-1 COCTS ocean color sensor[C]//SPIE. 2002:4892.
- [8] 蒋兴伟,牛生丽,唐军武,等. SeaWiFS 与 HY-1 卫星 COCT 系统交叉辐射校正[J]. 遥感学报,2005,9(0):681-687.
- [9] 潘德炉,何贤强,朱乾坤. HY-1A 卫星传感器水色水温扫描仪在轨交叉定标[J]. 科学通报,2004,49(21):2239-2244.
- [10] <ftp://219.142.87.39/>
- [11] Tang J W. The syatem calibration and validation of HY-1 COCTS ocean colorsensor[C]//SPIE. 2002:4892.
- [12] Gordon H R, Castano D J. Aerosol analysis with the Coastal Zone Color Scanner: A simple method for including multiple scattering effects[J]. Applied Optics, 1989, 28(7):1320-1326.