

HY-1A 卫星遥感器水色水温扫描仪在轨交叉定标

潘德炉 何贤强 朱乾坤

(国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012. E-mail: pandelu@mail.hz.zj.cn)

摘要 介绍了 HY-1A 卫星和水色水温扫描仪(COCTS)的主要特性, 然后详细讨论了利用美国海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS)实现 COCTS 水色通道辐射交叉定标的理论和方法. 利用准同步的 SeaWiFS 数据, 模拟得到交叉定标区域 COCTS 接收总辐亮度, 通过它与发射前实验室定标得到的 COCTS 接收总辐亮度比较, 最终确定 COCTS 的交叉定标系数. 结果表明研究中卫星交叉定标得到的 COCTS 接收总辐亮度与现场测量替代定标得到的 COCTS 接收总辐亮度具有很好的一致性. 最后, 通过经交叉定标后 COCTS 数据反演得到的归一化离水辐亮度与准同步 SeaWiFS 数据反演的归一化离水辐亮度进行比较, 验证了该方法的可行性和精度, 结果表明交叉定标方法的精度可以满足水色遥感测量要求.

关键词 交叉定标 COCTS SeaWiFS

与极轨气象卫星FY-1D搭载, 中国于2002年5月成功发射了第一颗海洋水色卫星HY-1A. 在轨道运行后, 为了缩短对地重复观测周期, 卫星最终从 870 km高度变轨到 798 km高度太阳准同步轨道. 卫星上安装有两个遥感器, 主载荷是COCTS, 它有 8 个和 SeaWiFS相似的可见光及近红外通道, 但比SeaWiFS多了 2 个用于探测海表温度的热红外通道, COCTS和SeaWiFS性能比较见表 1^[1,2]. 另一载荷是海岸带成像仪(CZI), 地面分辨率为 250m, 主要用于探测海岸带环境.

辐射测量精度是卫星海洋水色遥感最重要的关键技术之一. 在卫星轨道高度, 真正含水色信息的离水辐射只占遥感器测量总辐射的 5%~10%左右^[3,4], 因此, 遥感器的辐射测量精度就显得极为关键. 通常, 只有满足离水辐亮度测量相对误差小于 5%时, 才有可能保证一类水体叶绿素浓度反演精度达到 30%^[5]. 要达到这个测量精度, 惟一的方法是进行遥感器在轨定标. Gordon^[6]首先发展了水色遥感器的在轨替代定标技术. 有两种途径可以实现水色遥感器的在轨定标, 一种是利用海上准同步测量来进行定标^[6], 另一种是利用在轨的具有高测量精度的卫星遥感器测量结果实现在轨定标, 称之为“交叉定标”. 交叉定标技术已经用于IRS-P37 MOS^[7]和Landsat/ETM^{+18]}. 本文主要讨论利用SeaWiFS数据对COCTS的在轨卫星交叉定标技术.

1 方法

理论上, 当两个不同卫星遥感器在相同的观测

条件下对同一地面目标观测, 则测量到的辐射量应该相同. 利用这一原理, 就可以通过比较两个遥感器测得的辐射量, 用已知同时在轨的高精度的遥感器对一个未知辐射测量精度的遥感器进行辐射定标. SeaWiFS测量离水辐射率精度为 5%(相对误差), 而 COCTS的测量精度要求明显比SeaWiFS低. 所以, COCTS可以用SeaWiFS来定标, 尽管它们的几何观测条件有所差异, 包括观测时的太阳天顶角、遥感器观测天顶角及两者相对方位角. 分别将COCTS和SeaWiFS的观测几何记为 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\varphi)^{\text{COCTS}}$ 和 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\varphi)^{\text{SWF}}$ (θ_0 是太阳天顶角, θ_v 是遥感器观测天顶角, $\Delta\varphi$ 是太阳和遥感器观测相对方位角). 首先用SeaWiFS数据在 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\varphi)^{\text{SWF}}$ 条件下经大气校正, 反演得到水体归一化离水辐亮度, 确定大气气溶胶类型^[9,10]. 然后, 利用由SeaWiFS数据得到的归一化离水辐射率和气溶胶类型, 模拟得到在观察条件 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\varphi)^{\text{COCTS}}$ 下COCTS接收总辐亮度. 最后通过比较COCTS实验室定标得到的接收总辐亮度和模拟得到的接收总辐亮度, 建立两者的相关关系, 从而实现对COCTS在轨交叉定标, 具体的交叉定标原理如图 1 所示.

首先, 利用SeaWiFS数据的大气校正算法^[11], 计算 865 nm波段气溶胶单次散射反射率 $[\rho_{\text{as}}(865)]^{\text{SWF}}$ 和SeaWiFS各波段归一化离水辐亮度 $[L_{\text{wn}}]^{\text{SWF}}$. 进而根据 $[\rho_{\text{as}}(865)]^{\text{SWF}}$ 和 $[L_{\text{wn}}]^{\text{SWF}}$ 反推模拟得到COCTS观察条件 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\varphi)^{\text{COCTS}}$ 下的总辐亮度, 模拟算法具体如下:

表 1 HY-1A 和 SeaSTAR 及它们遥感器的主要性能

卫星	HY-1A(中国)		SeaSTAR (美国)
高度/km	798		705
轨道周期/min	100.8		99
轨道倾角/(°)	98.8		98.2
发射日期	2002-05		1997-08
过境时间	上午 08:53~10:10		中午 11:40~12:20
遥感器	COCTS		SeaWiFS
覆盖周期(天)	3		1
视场角/(°)	90.0		116.6
像元数/行	1024		1285
量化(bit/pixel)	10		10
空间分辨率/km	1.1		1.1
行覆盖/km	1400		2800
数据传输率(Mb/s)	2.6616		0.677
通道	波长范围/nm		波长范围/nm
	CH1 402~422	CH1 420~500	CH1 402~422
	CH2 433~453	CH2 520~600	CH2 433~453
	CH3 480~500	CH3 610~690	CH3 480~500
	CH4 510~530	CH4 760~890	CH4 500~520
	CH5 555~575		CH5 545~565
	CH6 660~680		CH6 660~680
	CH7 730~770		CH7 745~785
	CH8 845~885		CH8 845~885
	CH9 10300~11400		
	CH10 11400~12500		

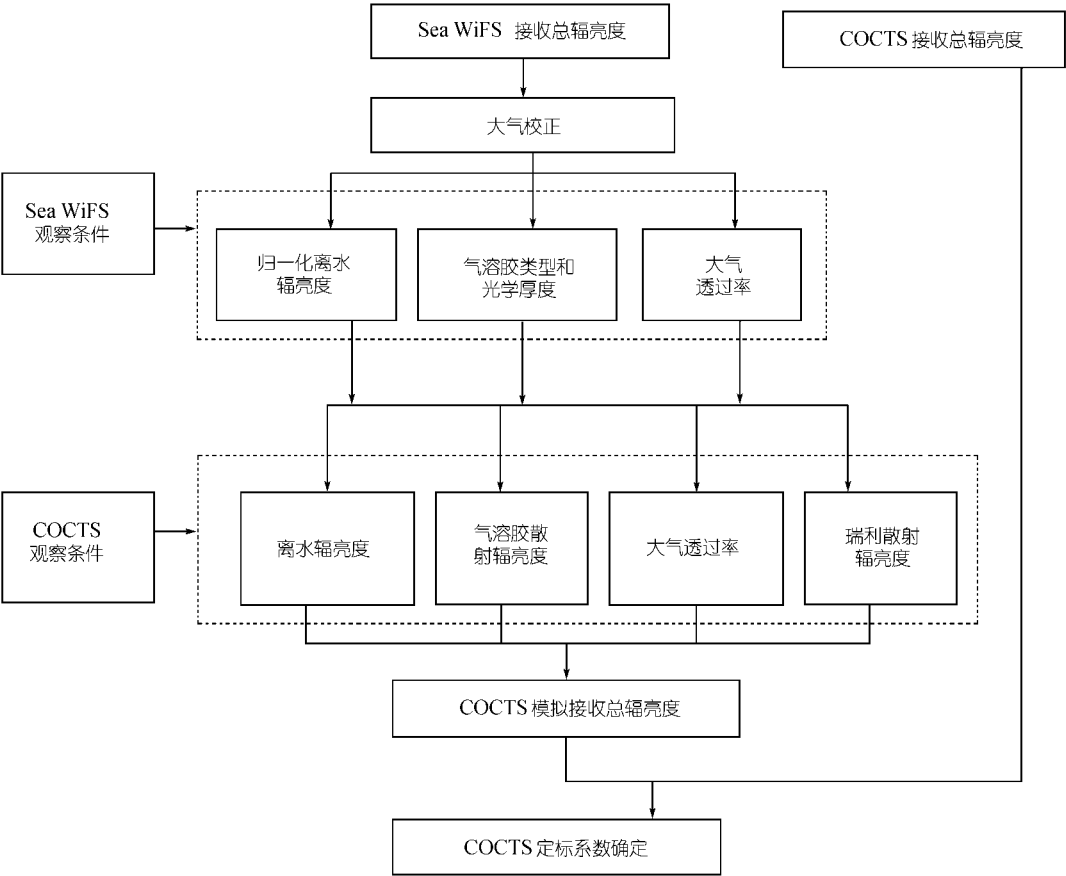


图 1 利用 SeaWiFS 对 COCTS 在轨交叉定标原理图

计算臭氧层向下透过率 $[t_{oz_sol}]^{COCTS}$ 和向上透过率 $[t_{oz_sen}]^{COCTS}$ ^[12].

计算瑞利散射反射率 $[\rho_r]^{COCTS}$.

计算气溶胶多次散射反射率 $[\rho_a]^{COCTS}$. 根据气溶胶单次散射计算式^[11]:

$$\rho_{as} = (\tau_a \varpi_a P_a) / (4 \cos \theta_0 \cos \theta_v), \quad (1)$$

计算 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)^{COCTS}$ 观察条件下的 865 nm 波段气溶胶单次散射反射率 $[\rho_{as}(865)]^{COCTS}$, 计算式为:

$$[\rho_{as}(865)]^{COCTS} = \frac{[\rho_{as}(865)]^{SWF} P_a(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)^{COCTS} [\cos \theta_0 \cos \theta_v]^{SWF}}{P_a(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)^{SWF} [\cos \theta_0 \cos \theta_v]^{COCTS}}, \quad (2)$$

式中, 由于准同步观察, 可以认为 COCTS 观测时气溶胶类型和光学厚度与 SeaWiFS 观测时相同. SeaWiFS 其他波段在 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)^{COCTS}$ 观察几何条件下的气溶胶单次散射反射率可以通过 $[\rho_{as}(865)]^{COCTS}$ 计算得到, 进而计算得到相应的气溶胶多次散射反射率 $[\rho_a]^{COCTS}$ ^[11].

计算 $(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)^{COCTS}$ 观察几何条件下的大气向下透过率 $[t_{sol}]^{COCTS}$ 和向上透过率 $[t_{sen}]^{COCTS}$ ^[11].

根据归一化离水辐射率的关系式^[13]:

$$L_{wn} = L_w / (t_{sol} \cdot t_{oz_sol} \cdot \cos(\theta_0)). \quad (3)$$

$(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)^{COCTS}$ 观察几何条件下的离水辐亮度 $[L_w]^{COCTS}$ 可以由下式计算:

$$[L_w]^{COCTS} = [L_{wn}]^{SWF} \times [t_{sol}]^{COCTS} \times [t_{oz_sol}]^{COCTS} \times \cos(\theta_0). \quad (4)$$

进行臭氧吸收和传感器带宽效应修正:

$$\begin{cases} [\rho_r^*]^{COCTS} = \\ [\rho_r]^{COCTS} [t_{oz_sol}]^{COCTS} [t_{oz_sen}]^{COCTS} \beta_r, \\ [\rho_a^*]^{COCTS} = \\ [\rho_a]^{COCTS} [t_{oz_sol}]^{COCTS} [t_{oz_sen}]^{COCTS} \beta_a, \\ [L_w^*]^{COCTS} = \\ [L_w]^{COCTS} [t_{oz_sen}]^{COCTS} \beta_w, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\beta_r, \beta_a, \beta_w$ 分别是 $[\rho_r]^{COCTS}, [\rho_a]^{COCTS}, [L_w]^{COCTS}$ 的带宽效应修正系数, 这是因为我们将整个波段响应的反射率作为波段中心的反射率. 系数 β 的定义与 Hu^[8]相同.

利用样条插值和 SeaWiFS 各波段中心波长处的 $[\rho_r^*]^{COCTS}, [\rho_a^*]^{COCTS}, [L_w^*]^{COCTS}, [t_{sen}(\lambda_i)]^{COCTS}$ 值, 得到在 400—900 nm 之间以 0.5 nm 为光谱分辨率的 $[\rho_r^*(\lambda)], [\rho_a^*(\lambda)], [L_w^*(\lambda)], [t_{sen}(\lambda)]$ 值. 因为 COCTS 波段带宽较小, 因此, 利用插值方法可以满足精度要求.

最后, 根据下式模拟出 COCTS 接收总辐亮度^[11]:

$$\langle L_t \rangle = \langle L_r \rangle + \langle L_a \rangle + \langle tL_w \rangle, \quad (6)$$

其中, $\langle L_r \rangle, \langle L_a \rangle, \langle tL_w \rangle$ 分别为^[6]:

$$\begin{cases} \langle L_r \rangle = \int ([\rho_r^*(\lambda)] \times F_0(\lambda) \times \cos(\theta_0) / \pi) \times S(\lambda) d\lambda / \int S(\lambda) d\lambda, \\ \langle L_a \rangle = \int ([\rho_a^*(\lambda)] \times F_0(\lambda) \times \cos(\theta_0) / \pi) \times S(\lambda) d\lambda / \int S(\lambda) d\lambda, \\ \langle tL_w \rangle = \int [L_w^*(\lambda)] \times [t_{sen}(\lambda)] \times S(\lambda) d\lambda / \int S(\lambda) d\lambda, \end{cases} \quad (7)$$

式中, F_0 是大气层外的太阳辐照度, S 是 COCTS 的波段响应函数.

2 定标数据和步骤

由以上卫星交叉定标的方法可知, 合理选择 COCTS 和 SeaWiFS 准同步观察区域是一个十分重要的问题, 选择区域的原则如下: (1) 无云和低气溶胶浓度覆盖, 且水体光学特性相对均匀的海区; (2) 在 COCTS 和 SeaWiFS 观察期间该区域的大气气溶胶相对稳定; (3) 定标区域最好位于星下点周围区域; (4) COCTS 和 SeaWiFS 观察时间间隔在 3 h 以内; (5) 选择的区域尽可能多, 至少 2 个, 或者有 2 天以上同一区域数据. 依据以上原则, 本文选择了 3 个交叉定标区, 每个区的大小为 11×11 个象元, 见表 2.

表 2 利用 SeaWiFS 对 COCTS 在轨辐射定标的区域

定标区 序号	SeaWiFS 观察时间	COCTS 观察时间	中心经度	中心纬度
1	2002-06-21 T:12:00	2002-06-21 T:9:00	110.80°E	20.40°N
2	2002-06-21 T:12:00	2002-06-21 T:9:00	110.75°E	17.80°N
3	2002-06-21 T:12:00	2002-06-21 T:9:00	109.50°E	16.85°N

按照上一节讨论的方法, 对由 SeaWiFS 数据模拟得到的 COCTS 接受总辐亮度与实验室定标得到的 COCTS 接收总辐亮度 L_t 进行了比较, 结果见图 2.

由图 2 可知, 在兰、绿波段 L_t 明显小于 $\langle L_t \rangle$, 但其他波段两者一致性较好. 于是可以通过 3 个定标区的 L_t 和 $\langle L_t \rangle$, 得到以下线性回归方程:

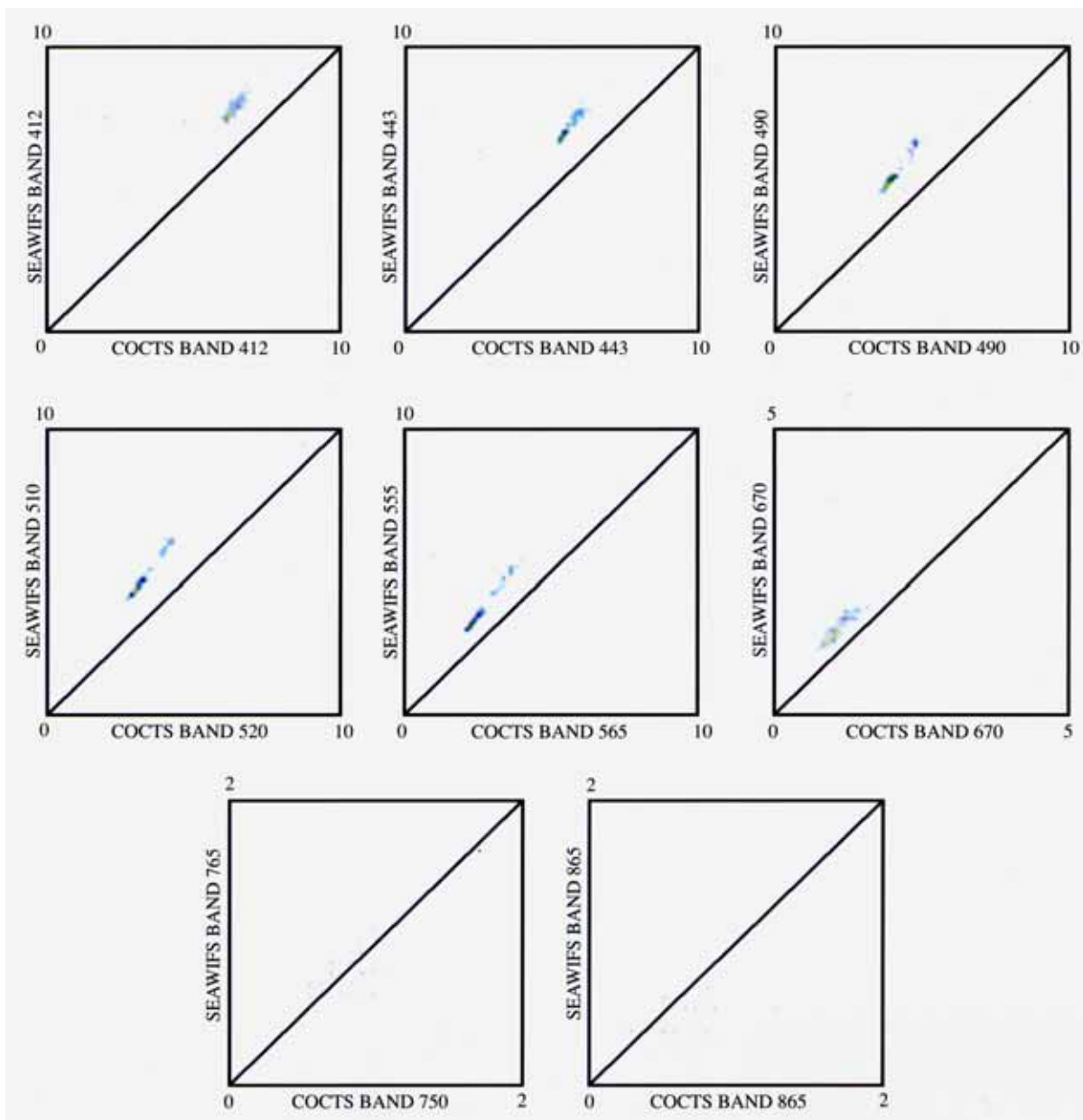


图2 COCTS 模拟得到的总辐亮度(L_t)和实际接收得到的总辐亮度 L_r 的比较

$$\langle L_r(\lambda) \rangle = a(\lambda) \cdot L_t(\lambda) + b(\lambda), \quad (8)$$

式中, $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 为上述 3 个定标区域得到的 COCTS 在轨定标系数, 其数值见表 3。值得注意的是, 在实际情况下, 当输入定标方程的计数值为扣除遥感器暗电流后的值, 系数 $b(\lambda)$ 为 0。但这里, 我们只关注遥感器在海洋上观测的辐亮度值区间, 因此, 回归得到的系数 $b(\lambda)$ 可能不为 0。这样(8)式可用于 COCTS 的辐射再定标。在 412 和 443 nm 波段, b 值较大的原

因可能是遥感器非线性响应或偏震响应的结果。

3 结果与讨论

对 3 个交叉定标区域分别利用发射前实验室定标系数、现场测量替代定标系数和本文卫星交叉定标系数, 得到 3 种定标系数下 COCTS 接收的总辐亮度, 并进行了比较, 如表 4 和图 3 所示。其结果讨论如下:

(i) 实验室定标结果在蓝光波段明显比现场替代定标或卫星交叉定标结果低, 特别是 412 和 443

表 3 COCTS 在轨定标系数

波长/nm	$a(\lambda)$	$b(\lambda)$
402~422	3.2950	-1.8650
433~453	1.4160	-0.4450
480~500	0.9800	0.0434
510~530	0.9125	-0.2360
555~575	0.9086	-0.0949
660~680	0.9353	0.0675
730~770	0.8580	0.0731
845~885	0.7080	0.0410

nm 波段, 实验室定标相对误差分别为 63%和 26%, 如图 3 所示. 所有可见光和近红外波段实验室定标的平均相对误差为 25%. 在蓝光波段实验室定标精度差的原因是由于积分球光源在蓝光波段相对于实际太阳光能量太弱.

(ii) 卫星交叉定标结果与现场测量替代定标结果十分吻合, 如图 3 所示. 在所有可见光和近红外波

段, 两者相对误差在 5%左右.
(iii) 由于大气校正和大气程辐射模拟算法精度所限, 总的来说, 波长短的通道的交叉辐射定标, 如 412 和 443 nm 通道, 比波长较长的通道要困难.

利用交叉定标结果, 从 COCTS 数据中提取了各波段归一化离水辐亮度, 同时, 从准同步的 SeaWiFS 数据中也提取了归一化离水辐亮度. 图 4 显示的是 443 nm 波段 COCTS 和 SeaWiFS 的归一化离水辐亮度比较.

4 结 论

发射前实验室定标结果应用到在轨运行时存在相当大的误差, COCTS 所有波段的平均相对误差达到 25%. 因此, 卫星发射后的在轨定标是非常必要的.

经卫星交叉定标后, COCTS 所有通道相对现场测量替代定标的误差为 5%, 满足水色遥感的离水辐

表 4 3 种定标方法得到的 COCTS 接收总辐亮度比较^{a)}

波段中心波 长/nm	区域 1 总辐亮度			区域 2 总辐亮度			区域 3 总辐亮度		
	发射前实验室	现场测量替代	卫星交叉	发射前实验室	现场测量替代	卫星交叉	发射前实验室	现场测量替代	卫星交叉
	定标	定标	定标	定标	定标	定标	定标	定标	定标
412	2.5072	6.7444	6.3940	2.3616	6.3527	5.8971	2.3680	6.3699	5.9552
443	4.5968	6.2517	6.0617	4.0192	5.4661	5.2799	3.9984	5.4378	5.1823
490	5.3840	5.3302	5.3209	4.0736	4.0329	4.0264	3.7168	3.6796	3.6922
520	5.3632	4.3742	4.6558	3.6912	3.0105	3.1435	3.2784	2.6739	2.7467
565	4.4752	3.8737	3.9771	2.6336	2.2796	2.2702	2.1568	1.8669	1.8870
670	1.5376	1.5376	1.5078	1.0176	1.0176	1.0118	0.7856	0.7856	0.8073
765	0.7968	0.7968	0.7630	0.6144	0.6144	0.5879	0.4224	0.4224	0.4415
865	0.5408	0.5408	0.4239	0.4320	0.4320	0.3469	0.2656	0.2656	0.2291

a) 表中的总辐亮度单位为 $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$

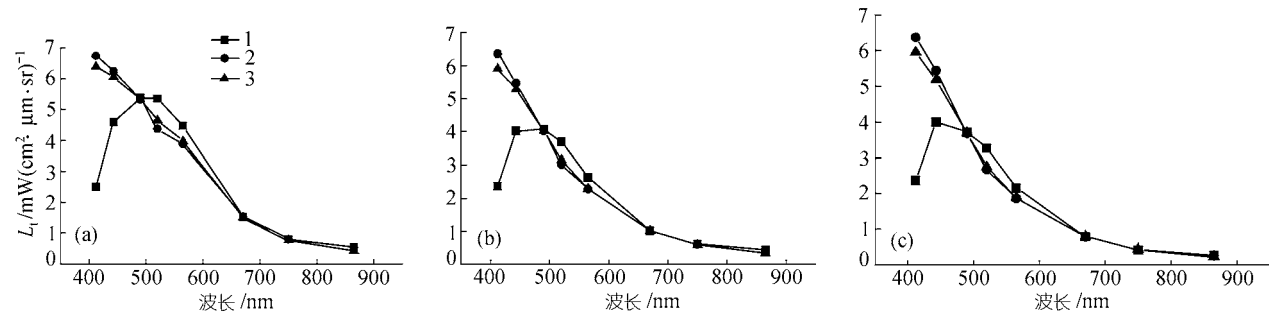


图 3 3 个区域 3 种不同定标方法的 COCTS 接收总辐亮度比较
(a) 区域 1; (b) 区域 2; (c) 区域 3. 1. 发射前定标, 2. 现场替代定标, 3. 卫星交叉定标

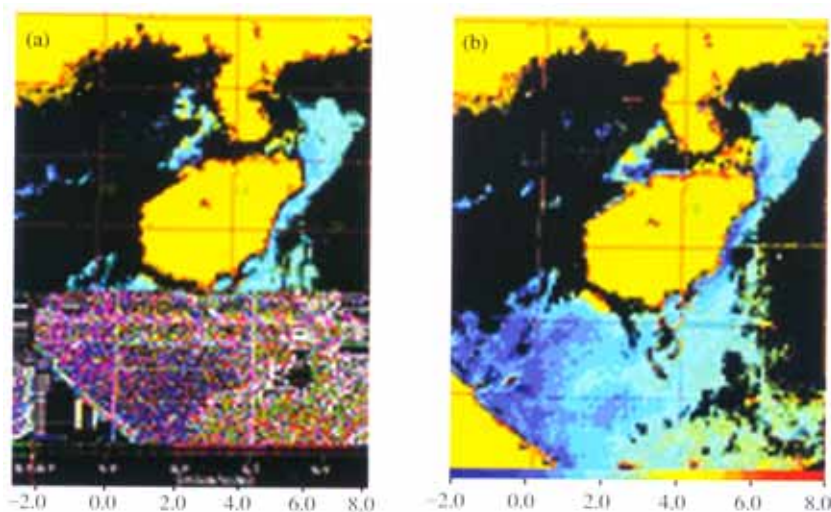


图4 由COCTS交叉定标后数据与SeaWiFS数据得到的443 nm波段归一化离水辐亮度
(a) COCTS; (b) SeaWiFS

亮度反演精度要求. 利用SeaWiFS数据模拟COCTS接收总辐亮度实现的交叉定标是用于HY-1A在轨定标的一种有效方法.

卫星交叉定标方法是一种经济实用的卫星在轨定标技术, 对发展中国家更为适用.

致谢 本工作受国家自然科学基金项目(批准号: 40006011)和国家“八六三”计划项目(2002AA639490)资助.

参 考 文 献

- 1 Delu P. Satellite Marine Remote Sensing in China. Proceedings of SPIE, 2003, 4892: 1~16
- 2 Hooker S B, Esaias W E, Feldman G C, et al. An Overview of Seawifs and Ocean Color. NASA Tech, Memo 104566, 1992, 1(1): 1
- 3 Delu P, Mao Zhihua. Atmospheric Correction for China's Coastal Water Color Remote Sensing. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20 (3): 343~354
- 4 Delu P, Mao Tianming, Li Shujing, et al. Study on Detection of Coastal Water Environment of China by ocean Color Remote Sensing. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20 (1): 51~63
- 5 Delu P, Tasuku T, Mao Zhihua, et al. Simulation and Evaluation of the Quality and Availability of Typical GLI Ocean Image. Progress in Natural Science, 2002, 12(6): 463~467
- 6 Gordon H R. In-orbit Calibration Strategy for Ocean Color Sensors. Remote Sensing of Environment, 1998, 63: 265~278 [DOI]
- 7 Wang Menghua, Bryan A F. Comparing the Ocean Color Measurements between MOS and SeaWiFS: a Vicarious Inter-calibration Approach for MOS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 184~197 [DOI]
- 8 Hu Chuanmin, Muller-Karger F E, Andrefouet S, et al. Atmospheric Correction and Cross-Calibration of LANDSAT-7/ETM+ Imagery over Aquatic Environments: a Multiplatform Approach Using Seawifs/MODIS. Remote Sensing of Environment, 2001, 78: 99~107 [DOI]
- 9 Barnes R A, Eplee R E, Patt F S, et al. Changes in the Radiometric Sensitivity of Seawifs Determined from Lunar and Solar-Based Measurements. Appl Opt, 1999, 38(21): 4649~4664
- 10 He Xianqiang, Delu P. A Practical Method of Atmospheric Correction of Seawifs Imagery for Turbid Coastal and Inland Waters. Proceedings of SPIE, 2003, 4892: 494~505 [DOI]
- 11 Gordon H R, Wang M. Retrieval of Water-Leaving Radiance and Aerosol Optical Thickness over the Oceans with Seawifs: a Preliminary Algorithm. Appl Opt, 1994, 33: 443~452
- 12 Gordon H R, Brown J W, Evans R H. Exact Rayleigh Scattering Calculations for Use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner. Appl Opt, 1988, 27: 862~871
- 13 Gordon H R, Clark D K. Clear Water Radiances For Atmospheric Correction Of Coastal Zone Color Scanner Imagery. Appl Opt, 1981, 20: 4175~4180

(2004-02-11 收稿, 2004-07-19 收修改稿)