

引用格式: Zhang Yong, Rong Zhiguo, Min Min, *et al.* Spectral Matching of FY-2 Series Satellites Infrared Channels Inter-calibration[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 844-849. [张勇, 戎志国, 闵敏, 等. 风云二号气象卫星红外通道交叉辐射定标光谱匹配[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 844-849.]

风云二号气象卫星红外通道交叉辐射定标光谱匹配

张 勇, 戎志国, 闵 敏, 张玉香

(中国遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 着重介绍了宽通道红外传感器对应通道间的交叉辐射定标光谱匹配方法, 并以 FY-2C IR1、IR2 与 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道为切入点, 进行通道间的光谱匹配计算, 获取了两通道的光谱匹配因子, 为实现这两种传感器红外分裂窗通道的交叉定标奠定了基础。该方法可以很好地应用于各种类型卫星红外传感器的对应通道间交叉定标光谱匹配, 为实现不同类红外遥感数据的辐射归一化提供了重要的方法借鉴, 为建立一致的全球红外遥感观测数据库奠定了基础。

关 键 词: FY-2C; Terra/Aqua MODIS; 红外遥感; 交叉定标; 光谱匹配

中图分类号: V 556.3; TP 732 文献标志码: A 文章编号: 1004-0323(2013)05-0844-06

1 引 言

红外遥感的发展必然向着量化的方向深入, 任何卫星及其携带的红外传感器发射前后, 都必须对仪器输出和获得的数据进行全面而准确的实时绝对辐射定标, 以确保所获取数据满足量化应用的需求^[1]。风云二号系列气象卫星至今已成功发射了 FY-2A/B/C/D/E/F 6 颗卫星。FY-2A/B 是 01 批试验卫星, FY-2C/D/E 是 02 批业务运行的静止气象卫星, FY-2F 是 03 批业务卫星的首发星。该系列卫星上搭载的多光谱扫描辐射计均具有中长波红外通道, 可以高频次地获取地球表面出射的长波辐射。但是, 由于自旋稳定是目前我国在轨业务运行的静止气象卫星运用的平台技术, 受到卫星平台限制导致星载辐射计无法将星上黑体放置在最前端, 实现与对地观测目标信号相同的全光路观测, 因此无法完成星上黑体绝对辐射定标。目前, 该系列卫星的绝对辐射定标是通过在轨外定标的方法完成的。

在卫星在轨外定标技术研究和验证方面, 过去十几年中世界各国的科学家们都进行了富有成果的研究和实践^[1-8]。其中, 交叉定标法是利用一个经过精

确定标的传感器作为参考, 进行传感器间辐射基准传递的一种有效手段^[8], 具体方法是选择两个传感器同时或近同时对相同区域观测成像, 通过光谱响应匹配, 建立两个传感器图像之间的联系, 利用参考传感器的定标系数, 实现目标传感器的辐射定标。对于两个宽通道传感器间的交叉定标, 其难点和影响定标精度的关键点之一就在于两传感器相应通道间的光谱匹配。目前, 光谱匹配技术在众多不同类型、不同波段传感器的交叉定标文献中都有涉及^[9-19], 但是将光谱匹配技术以独立于某些特定型号卫星传感器, 作为通用定标技术之一加以介绍的文献资料在国内外鲜见报道。本文以 FY-2C 与 Terra/Aqua MODIS 的交叉定标为例, 详细描述了宽通道红外传感器对应通道间交叉辐射定标光谱匹配的通用方法和匹配结果, 具有广泛的适用性和可移植性。

2 FY-2C 与 Terra/Aqua MODIS 卫星的对应红外通道

FY-2C 气象卫星于 2004 年 10 月 19 日发射升空, 10 月 24 日定点于 104.5°E 赤道上空, 并在轨正常超期运行, 目前该卫星已经转入在轨备份状态。

收稿日期: 2012-07-16; 修订日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171275, 40905014 和 40701118); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906036)。

作者简介: 张 勇(1977—), 男, 陕西镇巴人, 副研究员, 主要从事卫星传感器辐射定标和真实性检验, 以及热红外定量遥感的理论和方法研究。E-mail: zhangyong@cma.gov.cn。

FY-2C 卫星上搭载了一台 5 通道扫描辐射计,具体指标见表 1 所示。本文针对该传感器热红外分裂窗通道与 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道的交叉定标光谱匹配展开论述。

表 1 FY-2C 多通道扫描辐射计设计指标

Table 1 Specification of the FY-2C Multi-Channel Scanning Radiometer (MCSR)

项目		MCSR 指标
探测波段/ μm	可见光	0.55~0.90
	长波红外	10.30~11.30
		11.50~12.50
	中波红外	3.50~4.00
	水汽	6.30~7.60
动态范围	可见光(反照率)	0~98%
	长波红外(亮温)	180~330 K
		180~330 K
	中波红外(亮温)	180~340 K
	水汽(亮温)	190~300 K
灵敏度	可见光(信噪比)	$S/N\geq 50$
	长波红外($NE\Delta T$)	$NE\Delta T\leq 0.4\sim 0.2\text{ K}(300\text{ K})$
		$NE\Delta T\leq 0.4\sim 0.2\text{ K}(300\text{ K})$
	中波红外($NE\Delta T$)	$NE\Delta T\leq 0.3\sim 0.3\text{ K}(300\text{ K})$
	水汽($NE\Delta T$)	$NE\Delta T\leq 0.6\sim 0.5\text{ K}(260\text{ K})$
数据量化方式	码位数	可见光/bits 6
		红外、水汽/bits 10
	采样率	可见光/KHZ 411.76
		红外、水汽/KHZ 102.94
	红外、水汽探测器工作温度	
		夏季 100 K 其他季节 93 K

MODIS(中分辨率成像光谱仪)是美国 Terra 和 Aqua 卫星上都有装载的重要遥感传感器,是 EOS 计划中用于观测全球生物和物理过程的仪器。可以提供 0.4~14.5 μm 之间的 36 个离散波段的图像,其热红外波段的星下点空间分辨率 1 000 m,视场宽度为 2 330 km。MODIS 每两天连续提供地球上任何地方昼夜的发射辐射图像数据,包括对地球陆地、海洋和大气观测的红外波谱数据^[20]。为了进行高精度的红外绝对辐射定标,MODIS 的每一条扫描线在对地扫描之前和之后都要获取深冷空间和星上定标黑体的辐射信号,由此获得高精度的定标结果。因此,采用 MODIS 传感器的 31、32 红外分裂窗通道作为定标的参考标准可以满足对 FY-2C 多光谱扫描辐射计绝对辐射定标的精度要求。

图 1 显示了 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道与 FY-2C 红外 1 和 2 通道的光谱响应函数对比曲线和模拟计算的大气层顶出射辐射。大气层顶出射辐射是利用 MODTRAN 辐射传输软件包,选择热带大

气和标准大气廓线,温度范围为 200~320 K、以海洋、云、陆地等目标作为辐射传输计算的输入参数,通过模拟计算,获得 43 组热红外谱段样本数据,如图 1 中虚线所示。由于交叉定标两传感器主要是选取星下点附近的观测区域作为匹配区^[1,6,8],因此,在进行两传感器通道匹配系数计算时只模拟了 10° 倾斜观测和垂直观测的情况,所有 43 条模式模拟输入大气廓线的详细信息列于表 2。

3 光谱匹配计算

从图 1 可以看出,FY-2C 分裂窗通道和 Terra/Aqua MODIS 相应通道的光谱响应函数存在较大差别,从而导致相同的光谱辐亮度输入,两个传感器会有不同的通道辐亮度输出,并且具有很大的差异^[21]。因此,在进行交叉定标之前,必须对两个传感器相应的红外通道进行光谱匹配,尽量减少两者间的光谱差异。利用 MODTRAN 模式模拟了 43 条大气廓线的层顶分谱出射辐亮度(图1中虚线所示),

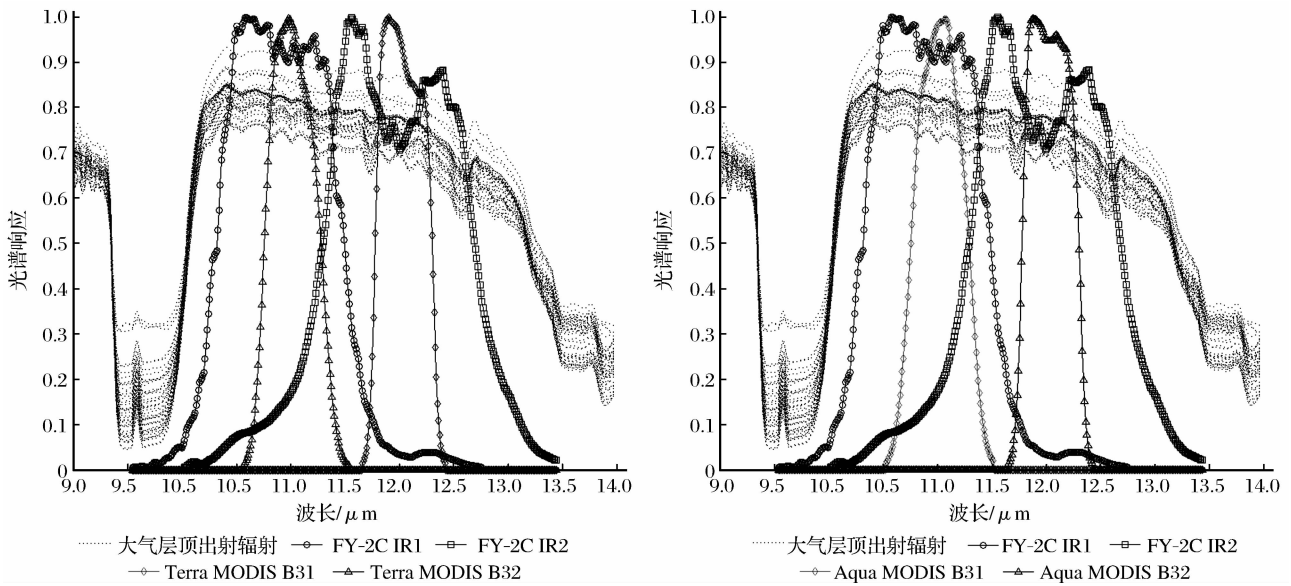


图 1 FY-2C 红外 1、2 通道与 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道光谱响应对比

Fig. 1 Spectral response functions of FY-2C IR1, IR2 and Terra/Aqua MODIS 31, 32

表 2 MODTRAN 模拟输入大气廓线样本

Table 2 Atmospheric profile samples using
for MODTRAN simulations

样本编号	边界层温度/K	目标类型	观测角度
1	278	海洋	垂直观测
2	283	海洋	垂直观测
3	293	海洋	垂直观测
4	303	海洋	垂直观测
5	308	海洋	垂直观测
6	278	海洋	倾斜 10°
7	283	海洋	倾斜 10°
8	293	海洋	倾斜 10°
9	303	海洋	倾斜 10°
10	308	海洋	倾斜 10°
11	278	农田	倾斜 10°
12	283	农田	倾斜 10°
13	303	农田	倾斜 10°
14	313	农田	倾斜 10°
15	320	农田	垂直观测
16	278	沙漠	垂直观测
17	283	沙漠	倾斜 10°
18	303	沙漠	垂直观测
19	313	沙漠	倾斜 10°
20	320	沙漠	垂直观测
21	278	森林	垂直观测
22	290	森林	倾斜 10°
23	300	森林	倾斜 10°
24	310	森林	倾斜 10°
25	320	森林	倾斜 10°
26	200	高云	垂直观测

续表 2

样本编号	边界层温度/K	目标类型	观测角度
27	220	高云	垂直观测
28	240	高云	垂直观测
29	255	高云	垂直观测
30	210	低云	垂直观测
31	230	低云	垂直观测
32	250	低云	垂直观测
33	215	卷云	垂直观测
34	235	卷云	垂直观测
35	255	卷云	垂直观测
36	250	TIGR 廓线 04 #	垂直观测
37	260	TIGR 廓线 02 #	垂直观测
38	270	TIGR 廓线 05 #	垂直观测
39	280	TIGR 廓线 02 #	垂直观测
40	290	TIGR 廓线 04 #	垂直观测
41	300	TIGR 廓线 02 #	垂直观测
42	310	TIGR 廓线 05 #	垂直观测
43	320	TIGR 廓线 02 #	垂直观测

用 FY-2C 和 Terra/Aqua MODIS 对应通道的光谱响应函数对分谱的大气层顶辐亮度进行卷积, 获取相应的通道辐亮度; 分别利用式(1)和式(2), 计算获得 FY-2C 和 Terra/Aqua MODIS 对应通道的归一化通道辐亮度:

$$R_{FY-2} = \frac{\int L_M(\lambda) f_{FY-2}(\lambda) d\lambda}{\int f_{FY-2}(\lambda) d\lambda}$$

(1)

$$R_{\text{MODIS}} = \frac{\int L_M(\lambda) f_{\text{MODIS}}(\lambda) d\lambda}{\int f_{\text{MODIS}}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

其中: $R_{\text{FY-2}}$ 和 R_{MODIS} 分别是 FY-2C 和 Terra/Aqua MODIS 对应通道的归一化通道辐亮度; $L_M(\lambda)$ 为 MODTRAN 模式模拟的不同地表、不同大气状态下的大气层顶出射红外光谱; $f_{\text{FY-2}}(\lambda)$ 和 $f_{\text{MODIS}}(\lambda)$ 分

别为 FY-2C 和 Terra/Aqua MODIS 对应通道的光谱响应函数。对获取的 43 个点上的两种传感器对应通道的大气层顶出射辐亮度进行线性回归(图 2),获得对应通道的光谱匹配因子(表 3),使用这些匹配因子对 Terra/Aqua MODIS 各个通道所获得的表观辐亮度进行修正,从而推导出 FY-2C 对应通道的表观辐亮度。

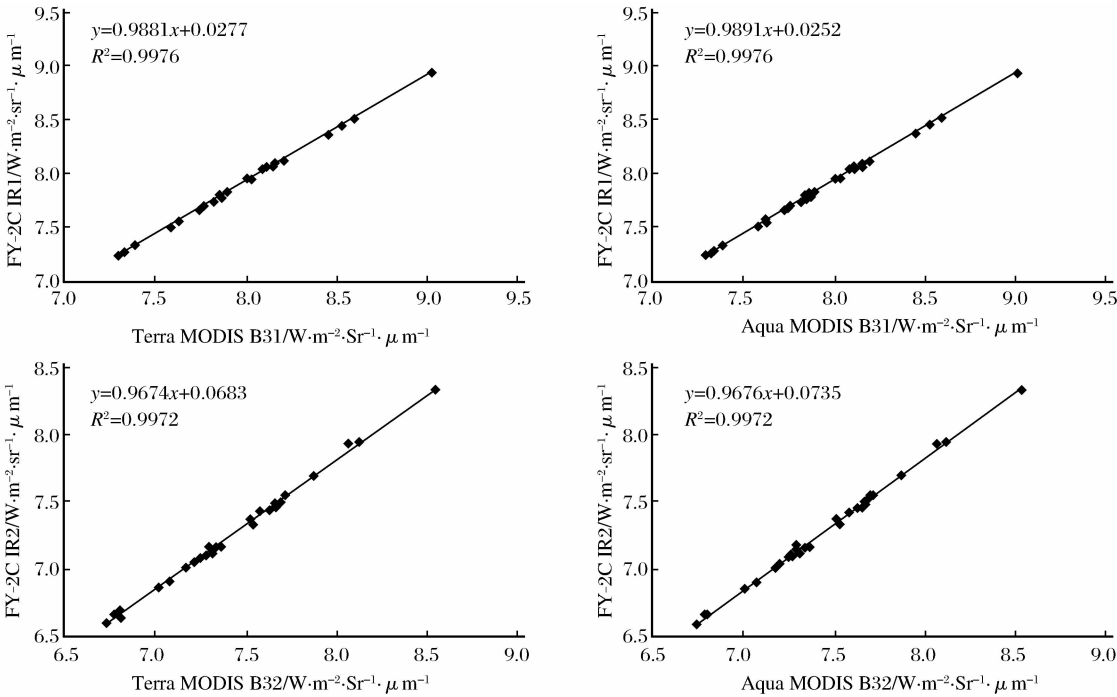


图 2 FY-2C IR1、IR2 与 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道光谱响应回归
Fig. 2 Linear regression of FY-2C IR1,IR2 and Terra/Aqua MODIS 31,32

表 3 FY-2C IR1、IR2 与 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道光谱匹配因子

Table 3 The matching coefficients of FY-2C IR1,IR2 and Terra/Aqua MODIS 31,32

	FY-2C IR1		FY-2C IR2	
	系数 a	系数 b	系数 a	系数 b
Terra MODIS B31	0.9881	0.0277	—	—
Aqua MODIS B31	0.9891	0.0252	—	—
Terra MODIS B32	—	—	0.9674	0.0683
Aqua MODIS B32	—	—	0.9676	0.0735

4 结 语

本文开展了宽通道红外遥感器对应通道间的交叉辐射定标光谱匹配方法研究,并以 FY-2C IR1、IR2 与 Terra/Aqua MODIS 31、32 通道为切入点,进行通道间的光谱匹配计算,获取了两通道的光谱匹配因子,为实现两种传感器红外分裂窗通道的交

叉定标奠定了基础。未来将本文获取的光谱匹配因子应用于两传感器间的交叉定标,实现 FY-2C 与 Terra/Aqua 卫星红外观测数据的辐射归一化,并且提出的交叉定标光谱匹配方法可以应用于 FY-2 系列后续卫星的在轨绝对辐射定标。

该方法可以很好地适用于各种类型卫星红外遥感器的对应通道间交叉定标光谱匹配,为实现不同类型红外遥感数据的辐射归一化提供了重要的方法借鉴,为建立一致的全球红外遥感观测数据库奠定了基础。

参考文献(References):

[1] Zhang Yong. Study on Thermal Infrared Remote Sensors' Absolutely Radiometric Calibrations[D]. Beijing:Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Science, 2006. [张勇. 遥感传感器热红外数据辐射定标研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2006.]
[2] Teilleta P M,Barkerb J L,Markhamb B L,et al. Radiometric

- Cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM Sensors based on Tandem Data Sets[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78: 39-54.
- [3] Tobin, D C, Revercomb H E, Moeller C C, *et al.* Use of Atmospheric Infrared Sounder High-spectral Resolution Spectra to Assess the Calibration of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on EOS Aqua[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 111, D09S05. doi: 10. 1029/2005JD006095.
- [4] Patrick M, Louis N, David R D, *et al.* Rapid Calibration of Operational and Research Meteorological Satellite Imagers Part II: Comparison of Infrared Channels[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19: 1250-1266.
- [5] Gunshor M M, Schmit T J, Menzel W P, *et al.* Intercalibration of Broadband Geostationary Imagers Using AIRS[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26: 746-758.
- [6] Zhang Yong, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Absolute Radiometric Calibration of CBERS-02 IRMSS Thermal Band[J]. Science in China (Series E), 2005, 35 (Sup. I): 70-88. [张勇, 顾行发, 余涛, 等. CBERS-02 IRMSS 传感器热红外通道综合辐射定标[J]. 中国科学 E 辑信息科学, 2005, 35 (增刊 I): 70-88.]
- [7] Zhang Yong, Li Yuan, Rong Zhiguo, *et al.* Absolute Radiometric Calibration of FY-2C Infrared Split-window Channels by Using Sea Buoy Data and NCEP Reanalysis Data[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28 (3): 188-193. [张勇, 李元, 戎志国, 等. 利用大洋浮标数据和 NCEP 再分析资料对 FY-2C 红外分裂窗通道的绝对辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28 (3): 188-193.]
- [8] Zhang Yong, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Radiometric Cross-calibration of CBERS-02 IRMSS Thermal Channel[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25 (4): 261-266. [张勇, 顾行发, 余涛, 等. 中巴地球资源卫星热红外通道的交叉辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25 (4): 261-266.]
- [9] 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.]
- [10] Chen Zhengchao, Liu Xiang, Li Junsheng, *et al.* The Cross Calibration of Beijing-1 Microsatellite Multispectral Sensors[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29 (2): 637-643. [陈正超, 刘翔, 李俊生, 等. 北京一号小卫星多光谱传感器交叉定标[J]. 宇航学报, 2008, 29 (2): 637-643.]
- [11] Zou Chengzhi, Gao Mei. A Long-term Atmospheric Temperature Dataset Derived from NOAA Microwave Sounding Unit with Cross-calibration[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19 (5): 582-587. [邹成治, 高梅. 交叉定标产生的 NOAA 卫星长期大气温度观测资料[J]. 应用气象学报, 2008, 19 (5): 582-587.]
- [12] Wu Ronghua, Yang Jun, Yang Zhongdong, *et al.* Impacts of Spectral Response Differences on SNO Calibration-study Examples of FY-3A/MERSI and EOS/MODIS [J]. Remote Sensing Information, 2011, (2): 51-57. [吴荣华, 杨军, 杨忠东, 等. 光谱响应差异对高精度交叉定标的影响——以 FY-3A/MERSI 与 EOS/MODIS 为研究实例[J]. 遥感信息, 2011, (2): 51-57.]
- [13] Tong Jinjun, Qiu Kangmu, Li Xiaowen, *et al.* Radiometric Cross-calibration of the FY1D/VIRR and EOS/MODIS in the Visible and Near-infrared Spectral Bands[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9 (4): 350-356. [童进军, 邱康睦, 李小文, 等. 利用 EOS/MODIS 交叉定标 FY1D/VIRR 可见光-近红外通道[J]. 遥感学报, 2005, 9 (4): 350-356.]
- [14] Li Xiaoying, Gu Xingfa, Min Xiangjun, *et al.* Radiometric Cross-calibration of the CBERS-02 CCD Camera with Terra MODIS[J]. Science in China (Series E), 2005, 35 (Sup. I): 41-58. [李小英, 顾行发, 闵祥军, 等. 利用 MODIS 对 CBERS-02 卫星 CCD 相机进行辐射交叉定标[J]. 中国科学 E 辑信息科学, 2005, 35 (增刊 I): 41-58.]
- [15] Li Xiaoying, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Radiometric Cross-calibration of CBERS-02 WFI with MODIS and the Effect on VI [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10 (2): 211-220. [李小英, 顾行发, 余涛, 等. CBERS-02 WFI 的辐射交叉定标及其对植被指数的作用[J]. 遥感学报, 2006, 10 (2): 211-220.]
- [16] Sun Ke, Fu Qiaoyan, Qi Xueyong. Radiometric Cross-calibration of Thermal Infrared Channel of IRS Sensor on HJ-1B Satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39 (5): 785-790. [孙珂, 傅俏燕, 齐学勇. HJ-1B 卫星 IRS 传感器热红外通道交叉定标[J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (5): 785-790.]
- [17] Peng Guangxiong, He Yuhua, Li Jing, *et al.* Study on CBERS-2's CCD Image Cross Calibration and Atmospheric Correction [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26 (1): 22-25. [彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴地球资源 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.]
- [18] Yang Zhongdong, Gu Songyan, Qiu Hong, *et al.* Research on the Algorithm of Cross Calibration about IRMSS Aboard on CBERS-1 [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22 (4): 281-285. [杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22 (4): 281-285.]
- [19] Dai Liyun, Che Tao. Cross-platform Calibration of Passive Microwave Brightness Temperature[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24 (5): 617-621. [戴礼云, 车涛. SMMR 与 SSM/I 被动微波亮度温度数据交叉定标[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24 (5): 617-621.]
- [20] Wan Z M, Zhang Y L, Li Z L, *et al.* Preliminary Estimate of Calibration of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Thermal Infrared Data Using Lake Titicaca[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80: 497-515.

[21] Zhang Yong,Li Yuan,Rong Zhiguo. Comparisons and Analysis on the Spectral Response Functions' Difference between FY-2E's and FY2C's Split Window Channels[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(6):1634-1637. [张勇,李元,戎志国. FY-2E 与 FY-2C 红外分裂窗通道光谱响应差异的对比分析[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(6):1634-1637.]

Spectral Matching of FY-2 Series Satellites Infrared Channels Inter-calibration

Zhang Yong,Rong Zhiguo,Min Min,Zhang Yuxiang

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environment Satellites,
China Meteorological Administration (LRCVES/CMA),Beijing 100081,China)

Abstract: The method of spectral matching for broadband infrared channels of remote sensors was introduced in this paper. The channels of FY-2C's IR1,IR2 and Terra/Aqua MODIS 31,32 were selected as example to do spectral matching,calculate the matching coefficients for corresponding channels. All of these efforts were set the seals on the inter calibration of two sensors. This method can be used for all kinds of infrared remote sensors corresponding channels inter calibration spectral matching and also provide a good methodology for the radiometric normalization in the different types of infrared remote sensors. This method can be used to establish the uniformed globe infrared remote sensing database.

Key words: FY-2C;Terra/Aqua MODIS;Infrared remote sensing;Inter calibration;Spectral matching