

FY-2E 与 FY-2C 红外分裂窗通道光谱响应差异的对比分析

张 勇, 李 元, 戎志国

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 在遥感数据定量应用中, 卫星通道的光谱响应函数是影响定量产品反演算法、精度和获取的地球特征物理量的关键因素之一。针对 FY-2E 红外分裂窗通道光谱响应函数的调整, 利用 NOAA AVHRR 卫星相应通道的定标查找表、青海湖实测的水面辐亮度和大气状态数据, 以及利用 PLANK 方程模拟的全动态范围内的辐亮度等数据对 FY-2E 与 FY-2C 红外分裂窗通道的差异进行了深入分析, 发现由于光谱响应调整导致通道的探测波段发生变化, 将影响到卫星探测的下垫面物理特性反演。同时, 由于对 FY-2E 光谱响应函数的调整, 使其红外分裂窗通道的亮温差相对于 FY-2C 在整个动态范围内都明显的增加, 将进一步提高 FY-2E 卫星红外分裂窗通道的定量反演能力。

关键词 风云二号; 热红外; 分裂窗通道; 光谱响应函数

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)06-1634-04

引 言

风云二号卫星是我国静止轨道气象卫星的主力型号, 至今已成功发射了 FY-2A/2B/2C/2D/2E 五颗卫星。FY-2A/2B 是 01 批试验卫星, FY-2C/2D/2E 是 02 批业务运行的静止气象卫星。星上搭载的多光谱扫描辐射计均具有热红外通道, 可以高频次地获取地球表面出射的长波辐射。

FY-2C 地球静止轨道气象卫星于 2004 年 10 月 19 日发射升空, 10 月 24 日定点于东经 104.5 度赤道上空, 并在轨正常运行至今, 目前该卫星已经处于超期运行状态。针对该卫星的替代卫星——FY-2E 也已于 2008 年 12 月 23 日成功发射升空, 并定点于东经 123.5°赤道上空, 作为 FY-2C 的备份星目前处于在轨备份运行状态。E 星发射后, 将保证与 FY-2D 双星组网观测的连续性, 扩展卫星气象业务运行能力, 为气象和环境监测、气象预报、防灾减灾以及经济社会发展和国家安全提供保障。FY-2E 与 FY-2C 卫星上分别搭载了一台 5 通道扫描辐射计, 可见光有 1 个通道, 红外通道有 4 个, 分别为长窗区分裂窗 2 个通道、水汽 1 个通道和中波一个通道, 具体指标见表 1 所示。

光谱响应函数是红外焦平面成像器件的重要技术参数, 它是指红外探测器受不同波长的光照射时, 其响应率随波长变化的情况, 是探测器的相对响应与入射波长的函数关系^[1], 它决定了导引系统可以截获目标的信息类型。对于卫

星遥感器, 无论是利用光谱的绝对强度还是相对强度, 都需要应用标准黑体对传感器进行定标, 测量和计算仪器的光谱响应函数^[2]。对遥感数据的定量应用中发现: 仪器响应函数的精确度对卫星测量结果影响很大。尤其是针对红外卫星遥感器的绝对辐射定标^[3-7], 无论是在轨场定标, 还是交叉定标, 光谱响应函数都是影响定标精度的关键因子。

Table 1 FY-2C and FY-2E MCSR technical requirements

卫星	通道	波段/ μm	灵敏度($NE\Delta T$)	动态范围/K
FY-2C	可见	0.56~0.91	—	—
	红外 1	10.32~11.49	0.28@300 K	180~330
	红外 2	11.32~12.68	0.38@300 K	180~330
	红外 3	3.53~4.04	0.51@300 K	180~340
	水汽	6.27~7.55	0.45@260 K	190~300
FY-2E	可见	0.510~0.905	—	—
	红外 1	10.29~11.45	0.19@300 K	180~330
	红外 2	11.59~12.79	0.26@300 K	180~330
	红外 3	3.59~4.09	0.30@300 K	180~340
	水汽	6.32~7.55	0.19@260 K	190~300

为了进一步提高 FY-2 卫星红外数据定量应用能力, 提高分裂窗通道的地球物理参数反演精度, 仪器制造部门对分裂窗两通道的光谱响应函数进行了调整。与 FY-2C 相比, FY-2E 的红外两通道光谱重叠率大大降低, 如图 1 所示。分裂窗两个通道的标称光谱设置为: IR1, 10.3~11.3 μm ;

收稿日期: 2009-07-13, 修订日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701118)和公益性行业科研专项经费项目(GYHY200906036)资助

作者简介: 张 勇, 1977 年生, 国家卫星气象中心副研究员 e-mail: zhangyong@cma.gov.cn

IR2, 11.5~12.5 μm, 对应的中心波长为 10.8 和 12 μm。针对 FY-2C 和 FY-2E 红外分裂窗光谱响应函数计算了通道有效中心波长, 如表 2 所示。

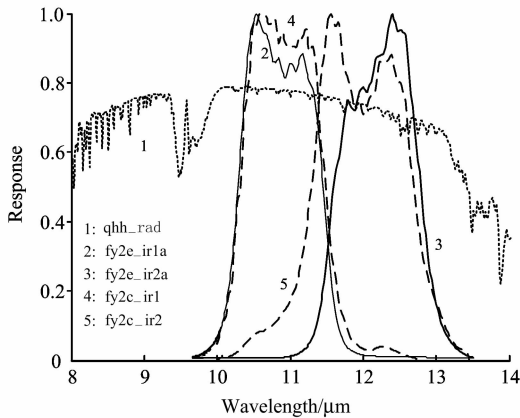


Fig. 1 FY-2E/2C's split windows spectral response functions

Table 2 Comparisons of FY-2E/2C split windows' effective central wavelengths(μm)

	FY-2C	FY-2E	DIFF(2E-2C)
IR1	10.868 1	10.824 1	-0.044 0
IR2	11.862 1	12.151 9	0.289 8

从表 2 可以看出, 光谱响应函数的调整主要针对红外 2 通道。根据计算结果, 红外 2 通道的光谱响应中心有效波长向长波方向移动, 而红外 1 通道没有做大的调整。从图 1 也可以看出这些调整的情况。本文针对两传感器热红外分裂窗通道的光谱响应函数差异展开对比与分析研究工作。

1 对比方法

利用传感器入瞳处的分谱辐亮度 $L_{target}(\lambda)$ 与传感器热红外通道光谱响应函数 $f_{res}(\lambda)$ 进行卷积, 就可以得到卫星某一通道入瞳处的通道等效辐亮度

$$L_{eq} = \frac{\int L_{target}(\lambda) f_{res}(\lambda) d\lambda}{\int f_{res} d\lambda} \quad (1)$$

而观测目标出射的光谱辐亮度可以由普朗克函数给出

$$L(\sigma) = \frac{C_1 \sigma^3}{\exp\left(\frac{C_2 \sigma}{T}\right) - 1} \quad (2)$$

其中 $C_1 = 1.191 \times 10^{-12}$, 单位: $W/cm^2 sr(cm^{-1})^4$, 为第一辐射常数; $C_2 = 1.439 K cm^{-1}$, 为第二辐射常数; σ 为波数, 单位: cm^{-1} ; T 为温度, 单位: K ; $L(\sigma)$ 为光谱辐亮度, 单位: $W \cdot (cm^2 sr cm^{-1})^{-1}$ 。(2)式是普朗克函数用波数表达的形式, 用波长表达的形式为

$$M(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (3)$$

因为 $\sigma = 1/\lambda$, $d\sigma = -d\lambda/\lambda^2$, 故

$$\int_{\sigma_1}^{\sigma_2} L(\sigma) d\sigma = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

然后, 考虑通道的中心波长(或波数), 根据(2)式或(3)式反演可以得到传感器入瞳处的通道亮温。

我国风云二号系列气象卫星红外分裂窗通道的设置与 NOAA AVHRR 的通道设置较为一致(如图 2 所示), 并且大部分卫星定量产品的反演算法也有一致性, 因此为了试验光谱响应函数的调整对仪器探测目标物理量的影响程度, 本文采用 3 种不同的方法来对通道响应函数差异造成的影响进行全面系统的分析: (1)利用某一个时次的 NOAA AVHRR 卫星数据定标查找表作为标准输入, 根据 FY-2E/C 对应通道的光谱响应函数计算通道亮温来进行比对分析; (2)利用青海湖野外同步观测试验获取的实测水面红外光谱和大气探空数据, 利用 MODTRAN 辐射传输模式来计算 FY-2E/2C 对应的通道大气层顶辐亮度及亮温, 来对比分析光谱响应函数差异对卫星观测结果的影响; (3)根据 Plank 函数来模拟计算卫星传感器全动态范围内光谱响应函数差异对卫星观测结果的影响。

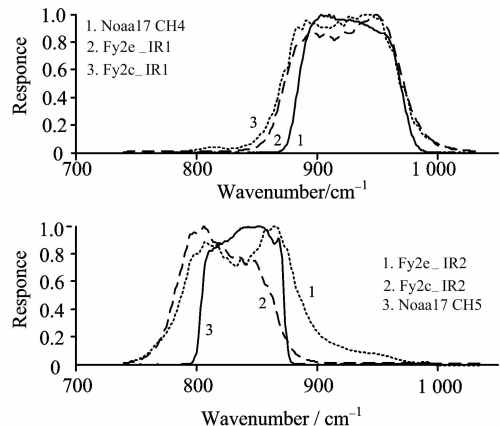


Fig. 2 Comparisons between NOAA AVHRR and FY-2E/C split window channels spectral response functions

2 试验结果与分析

2.1 利用 NOAA AVHRR 探测的通道辐亮度反演 FY-2E/2C 对应的通道亮温

获取 2009 年 2 月 8 日 UTC 2:30 的 NOAA AVHRR 红外分裂窗通道的定标查找表, 及对应的通道辐亮度。将 NOAA 探测的辐亮度作为输入, 考虑 FY-2E/2C 的光谱响应, 反演通道亮温, 结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 由于光谱响应差异的关系, 导致红外 2 通道 FY-2E 与 NOAA-17 CH5 具有较大的差别, 差值如图 4 所示。从图 4 可以看出: FY-2E/2C 两颗星红外通道 1, 由于光谱响应较为相近, 其在相同辐亮度时对应的亮温也较为相近; FY-2C 通道 2 尽管光谱响应较标称的通道范围宽, 但其中心波长与标称的较为一致, 表现在同样的辐亮度对应的亮温差值较小, 而 FY-2E 通道 2 由于中心波长偏移标称的位置较大, 在同样的辐亮度时, 其对应的亮温差值较大, 最大达到 2 K 以上。

2.2 利用青海湖实测数据计算 FY-2E/2C 对应的通道辐亮度及亮温

选择 2008 年 9 月 3 日在青海湖实测数据进行大气辐射传输计算。湖面温度为 287.08 K, 获取当天的探空数据, 经过 MODTRAN 模拟获取大气层顶的 TOA 辐亮度曲线, 如图 1 中线条 1 所示, 利用(1)式分别与 FY-2E/2C 的红外分裂窗通道光谱响应函数进行卷积, 获取通道的等效辐亮度, 并利用(3)式反演了通道亮温, 如表 3 所示。

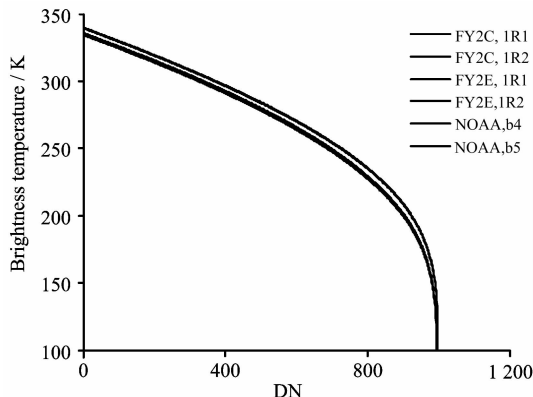


Fig. 3 Curves of FY-2E/2C brightness temperature's changing inverted from NOAA data

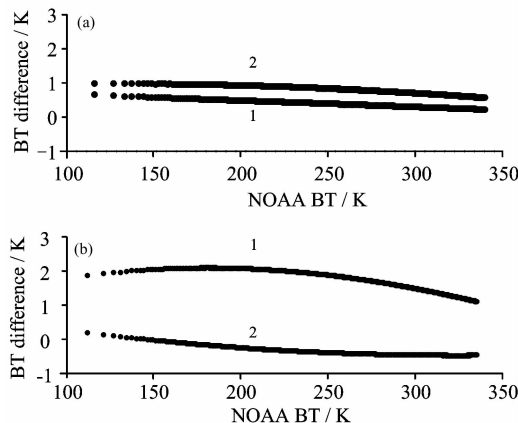


Fig. 4 Difference curves of channels' brightness temperatures between FY-2C/2E and NOAA-17 AVHRR corresponding

(a); Diff-IR1-NOAA-2E/2C; (b); Diff-IR2-NOAA-2E/2C;
1; Diff-noaa-2E; 2; Diff-noaa-2C

Table 3 FY-2E/2C corresponding channels' radiance and brightness temperatures inverted from the field data at Qinghai Lake

	IR1	IR2
FY-2E_RAD	90.992 2	105.666 4
FY-2C_RAD	91.655 6	103.071 8
DIFF_RAD_2E-2C	-0.663 5	2.594 6
FY-2E_TEM	286.073 8	284.944 4
FY-2C_TEM	286.101 0	285.345 6
DIFF_TEM_2E-2C	-0.027 2	-0.401 2

Radiance unit: $\text{mW} \cdot (\text{m}^2 \text{sr m}^{-1})^{-1}$, Temperature unit: K

从表 3 可以看出, 对于相同的地物目标, 在同样的大气

状态下, 由于光谱响应变化的原因, 将造成达到卫星入瞳处辐亮度的差别。从 FY-2C/2E 情况看, IR1 较为接近, IR2 相差较大, 将影响到卫星探测的下垫面物理特性反演。同时, IR1 与 IR2 两通道的亮温也会有较大差别, 其反演的亮温差在红外 1 通道为 $-0.027 2 \text{ K}$, 在红外 2 通道为 $-0.401 2 \text{ K}$ 。

2.3 FY-2E/2C 在全动态范围内通道辐亮度差异

利用 Plank 函数计算 $80 \sim 360 \text{ K}$ 范围内不同温度对应的 Plank 曲线, 分别与 FY-2E 和 FY-2C 红外分裂窗通道的光谱响应进行卷积, 获取通道辐亮度。对 FY-2E 与 FY-2C 做差, 如图 5 所示。

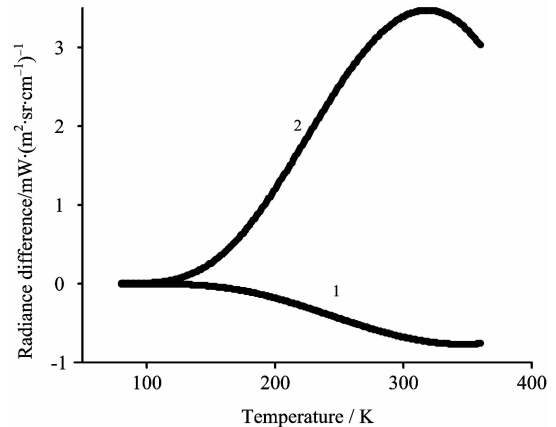


Fig. 5 FY_2E and FY-2C channel radiance differences at different background temperatures

1; IR1-2E-2C; 2; IR2-2E-2C

由于光谱响应差异, 造成 FY-2E 与 FY-2C 的通道 2 辐亮度在全动态范围内出现较大差异, 且差值随着探测目标温度的变化而变化。FY-2E 红外 2 通道的光谱响应调整导致两颗星对相同状态下的目标探测获得的能量存在很大差别, FY-2E 接收到的能量在整个动态范围内都大于 FY-2C 对应通道的能量。红外 1 通道的调整较小, 导致的差异也较小, 但是接收能量 FY-2E 在全动态范围内都小于 FY-2C。可以看出, 仪器研制方对 FY-2E 分裂窗通道光谱响应的调整减小了两通道的重叠率, 增加了两道间的亮温差。

3 结论与讨论

在遥感数据定量应用中, 卫星通道的光谱响应函数是影响定量产品反演算法、精度和获取的地球特征物理量的关键因素之一。尤其是热红外窗区的分裂窗通道, 在利用这两个通道反演地球物理量时, 两通道的亮温差、通道各自的亮温等信息都是影响反演结果的敏感因子。通过本文的研究工作, 利用 3 种独立的方法重点探讨了由于光谱响应函数调整, 对通道探测获取的能量和反演亮温的影响, 可以得出以下几点结论: (1) 通过与 NOAA 17 AVHRR 对应通道的亮温进行比较, 可以发现 FY-2E 红外 2 通道由于光谱响应函数的调整, 造成反演亮温最大达到 2 K 以上。这就导致 FY-2E 红外 2 通道与 NOAA AVHRR 的对应通道在探测波段上产生较大的差异, 一些从 NOAA AVHRR 移植到 FY-2E 的定量

产品反演算法需要进行较大的修改和调整。(2)利用青海湖的实测水表辐射和大气状态数据,通过 MODTRAN 辐射传输模式模拟了 FY-2E 和 FY-2C 分裂窗通道的 TOA 辐亮度,通过对比发现仅仅是光谱响应函数的差异,就导致红外 2 通道两传感器相同探测目标反演亮温差达到 0.4K 以上,这将影响到卫星探测的下垫面物理特性反演。(3)由于光谱响应函数的调整, FY-2E 红外分裂窗两通道在青海湖实测的表面特征和大气状态条件下,亮温差为 1.129 4 K, FY-2C 为 0.755 4。这种分裂窗两通道亮温差的变化在 FY-

2E/C 的全动态范围内都有所表现,在不同的探测目标温度下,两通道亮温差都有所增加。增大分裂窗通道的亮温差,将会进一步提高两通道对地球物理参数的反演能力。

总而言之,仪器研制部门对 FY-2E 分裂窗两通道光谱响应函数的调整,达到了预期的目的,大大降低了两道的重叠率,在整个动态范围内,都增加了两通道的亮温差,提高了分裂窗通道的定量反演能力。但是,由于这种调整,造成了仪器探测波段的变化,对定量产品反演算法和反演结果的影响,还有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] Rastello M L, Premoli A, Bonicatto G. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 22.
- [2] Wang Junde, Wang Tianshu, Chen Zouru, et al. Spectrosc. Lett., 1997, 30(4): 783.
- [3] ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-guo, et al(张 勇, 李 元, 戎志国). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(5): 1213.
- [4] ZHANG Yong, GU Xing-fa, YU Tao, et al(张 勇, 顾行发, 余 涛, 等). Science in China Series E(中国科学 E 辑 工程材料科学), 2005, 35(增 I): 70.
- [5] ZHANG Yong, GU Xing-fa, YU Tao, et al(张 勇, 顾行发, 余 涛, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2006, 25(4): 261.
- [6] RONG Zhi-guo, ZHANG Yu-xiang, JIA Feng-min, et al(戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2007, 26(2): 97.
- [7] ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-guo, et al(张 勇, 李 元, 戎志国, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2009, 28(3): 188-193.

Comparisons and Analysis of the Spectral Response Functions' Difference between FY-2E's and FY2C's Split Window Channels

ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-guo

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

Abstract Remote sensors' channel spectral response function (SRF) was one of the key factors to influence the quantitative products' inversion algorithm, accuracy and the geophysical characteristics. Aiming at the adjustments of FY-2E's split window channels' SRF, detailed comparisons between the FY-2E and FY-2C corresponding channels' SRF differences were carried out based on three data collections: the NOAA AVHRR corresponding channels' calibration look up tables, field measured water surface radiance and atmospheric profiles at Lake Qinghai and radiance calculated from the PLANK function within all dynamic range of FY-2E/C. The results showed that the adjustments of FY-2E's split window channels' SRF would result in the spectral range's movements and influence the inversion algorithms of some ground quantitative products. On the other hand, these adjustments of FY-2E SRFs would increase the brightness temperature differences between FY-2E's two split window channels within all dynamic range relative to FY-2C's. This would improve the inversion ability of FY-2E's split window channels.

Keywords FY-2 satellites; Thermal infrared; Split window channels; Spectral response function

(Received Jul. 13, 2009; accepted Oct. 19, 2009)