

文章编号:1001-9014(2005)04-0277-04

一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法

童进军^{1,2,3}, 邱康睦², 李小文³

(1. 清华大学公共管理学院, 北京 100084; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081;
3. 北京师范大学资环系遥感与GIS中心, 北京 100875)

摘要:利用青海湖水文自动观测浮标系统测得的水表温度和NCEP再分析资料的探空数据对HY-1/COCTS热红外通道进行在轨绝对辐射定标. 该方法定标结果与常规场地试验定标结果一致, 可以实现对卫星热红外通道的在轨连续场地绝对辐射定标.

关键词:水表温度; NCEP再分析资料; 热红外通道; 辐射定标

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A

NEW METHOD OF IN-FLIGHT ABSOLUTE CALIBRATION FOR THERMAL INFRARED CHANNELS OF SATELLITE SENSORS

TONG Jin-Jun^{1,2,3}, QIU Kang-Mu², LI Xiao-Wen³

(1. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China;
3. Research Center for Remote Sensing and GIS, Department of Resource and Environment Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The thermal infrared channels was in-flight calibrated by using surface temperature in Qinhai lake measured by auto buoy and atmospheric profile of NCEP reanalyzed data in Qinhai lake. The calibration results by using this method are consistent with those by using normal experiment method, which can in-flight calibrate the thermal infrared channels of satellite sensors constantly.

Key words: surface temperature; NCEP reanalyzed data; thermal infrared bands; radiometric calibration

引言

卫星热红外通道有多种定标方法: 发射前定标、天上定标和在轨场地定标. 但当卫星在轨运行后, 天上定标系统可能发生不稳定变化, 因此需要用在轨场地定标进行检验和校正. 常规的卫星热红外通道在轨场地定标方法是首先选择一个稳定的、大面积水体目标; 当卫星观测水体时, 利用模拟卫星通道热红外辐射计在湖面测得湖水向上辐亮度, 再经过大气订正, 计算出卫星入瞳处辐亮度; 然后, 把这一目标的辐亮度和卫星计数值作为高点, 再利用卫星扫描冷空间作为一低点, 由这两点计算出斜率和截距. Palmer^[1]和Slater^[2,3]成功地 will 这一方法应用于卫星热红外通道的定标. 中国遥感卫星辐射校正场选择青海湖为卫星热红外通道定标场^[4]. 该方法已多次

成功地应用于FY-1C、FY-2B的热红外通道定标, 多次定标结果表明这一定标方法结果可信. 但是, 这种定标方法需要在场地做同步观测, 因此限制了定标的次数, 通常一年只能进行1~2次, 目前国际上尚未找到很好的办法来增加卫星热红外通道场地定标的次数. 在本文中, 利用青海湖水文自动观测浮标系统测得的水表温度代替CE312测得的亮温、利用NCEP再分析资料的探空廓线代替实际探空廓线对HY-1/COCTS热红外通道(COCTS第9通道: 10.30~11.40 μm ; COCTS第10通道: 11.40~12.50 μm)进行定标, 所得结果与2003年8月在青海湖的同步试验结果进行比较, 发现两者结果一致. 通过误差分析表明, 可以利用青海湖水文自动观测浮标系统测得的水表温度和NCEP再分析资料的探空数据对卫星热红外通道进行连续的场地绝对辐射定标.

收稿日期: 2004-07-10, 修回日期: 2005-01-17

Received date: 2004-07-10, revised date: 2005-01-17

基金项目: 国防科工委卫星应用研究项目“中国遥感卫星辐射校正场辐射校正技术发展研究”(GF2002-辐射)

作者简介: 童进军(1977-), 男, 四川内江人, 博士, 清华大学公共管理学院博士后, 主要从事卫星传感器定标和环境政策方面的研究.

1 定标原理

卫星热红外探测器对湖水表面进行观测时接收的辐射包括三部分,第一部分是来自水表面的热辐射,经过大气的衰减到达卫星,其大小由水体表层附近的温度和比辐射率以及大气透射率决定;第二部分为大气的热辐射,与大气中吸收气体的含量和物理状态有关;第三部分是水表面的反射。

卫星接收的单色辐射亮度由式(1)表示

$$L_T(\lambda) = L_1(\lambda) + L_2(\lambda) + L_3(\lambda), \quad (1)$$

其中到达卫星高度的水表面热辐射为

$$L_1(\lambda) = \tau_a(\lambda)L_{lake}(\lambda). \quad (2)$$

其中, $\tau_a(\lambda)$ 为目标到卫星方向整层大气单色透射率, $L_{lake}(\lambda)$ 为湖水表面在卫星所在方向的辐射亮度。

大气的热辐射亮度为

$$L_2(\lambda) = L_{up}(\lambda). \quad (3)$$

式中 $L_{up}(\lambda)$ 为卫星所在方向大气的单色大气辐射亮度。

湖水表面反射的辐射经大气削弱后到达卫星探测器,其表达式为

$$L_3(\lambda) = \rho_{lake}(\lambda)\tau_a(\lambda)L_{down}(\lambda). \quad (4)$$

式中 ρ_{lake} 为湖水表面的反射率, $L_{down}(\lambda)$ 为能够反射到卫星观测方向的向下的大气辐射亮度。王维和^[5]等的计算表明,大气向下的热辐射亮度在窗区(10~13 μm)约为 0.2~0.7 $\times 10^{-5}$ [(Watts/($\text{cm}^2 \cdot \text{Str. cm}^{-1}$))],因而水面反射的最大亮度为 0.2~1.1 $\times 10^{-7}$ (Watts/ $\text{cm}^2 \cdot \text{Str. cm}^{-1}$).而在窗区水面放射对卫星总辐射的贡献的平均值约为 0.6 $\times 10^{-5}$ (Watts/ $\text{cm}^2 \cdot \text{Str. cm}^{-1}$).如果完全忽略反射影响,则引起的总辐射值的相对误差不超过 1.8%,如果以亮温计算,误差在 1K 左右.在上面的论述中没有考虑到太阳的辐射,因为在大气外界,窗区波段的太阳辐照度小于 3 $\times 10^{-7}$ (Watts/ $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$),而地面接收的向下的大气热辐射通量密度大于 0.6 $\times 10^{-5}$ (Watts/ $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$),太阳到达水面的辐照度比大气到达地面的辐照度还要小 1~2 个量级,和水面的射出通量密度相比就更小了,而太阳影响卫星传感器的总辐射是通过地面/水面反射实现的,因此忽略太阳辐射的贡献不会产生影 响.因此 L_3 相对于 L_1 和 L_2 的贡献可以忽略.由以上的分析,卫星接收的单色辐射亮度表示为

$$L_T(\lambda) = \tau_a(\lambda)L_{lake}(\lambda) + L_{up}(\lambda). \quad (5)$$

卫星热红外通道的等效辐射亮度 L_{eq} 定义为

$$L_{eq} = \frac{\int L_T(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int S(\lambda)d\lambda}. \quad (6)$$

其中 $S(\lambda)$ 为卫星探测器光谱响应函数。

卫星通道计数值与卫星通道辐亮度成线性关系:

$$L_{eqi} = G_i \cdot DC_i + I_i \quad (7)$$

DC_i 为卫星通道计数值, G_i 为卫星通道 i 定标斜率, I_i 为截距.要得到定标系数 G_i 和 I_i ,必须有两组 L_{eqi} 和 DC_i ,卫星观测青海湖和冷空间会得到两组计数值,通过这两组计数值就能计算出定标系数。

2 资料

2.1 卫星计数值提取

根据 HY-1 卫星轨道计算, HY-1 卫星在 2003 年 8 月 8 日 11:25h(北京时)、2003 年 8 月 15 日 11:20h(北京时)在青海湖过境.图 1 给出了它们卫星图像。

2.2 水表温度和 NCEP 再分析资料

青海湖水文自动观测浮标系统在每年的 4~10 月份的无冰期间,对青海湖区湖面上的 5 个气象参数(气温、气压、温度、风速、风向)和湖水中的两个水文参数(表层温度、盐度)进行定点连续观测.每天获得 8 个时次的数 据.本文中采用 2003 年 8 月 8 日和 8 月 15 日 11h(北京时)的表层温度.当 HY-1 卫星过青海湖时,青海湖的水表温度分别为 15.1 $^{\circ}\text{C}$ 和 15.79 $^{\circ}\text{C}$ 。

NCEP 再分析资料格点:1 \times 1.每天世界时间 00、06、12、18h 的 26 层的温度,相对湿度数据.本文采用了 2003 年 8 月 8 日和 8 月 15 日 06h(世界时),(100 $^{\circ}\text{E}$ 37 $^{\circ}\text{N}$)点上的数据作为青海湖的相对湿度、温度廓线数据。

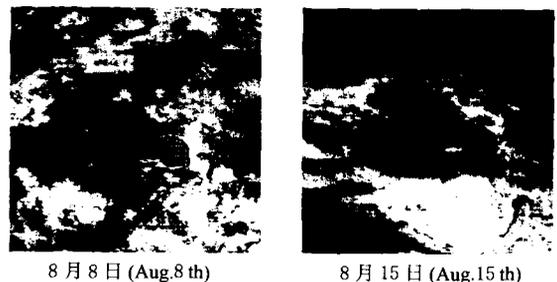


图 1 HY-1/COCTS 9 通道青海湖地区图像(黑线包围的区域为青海湖上空的无云区域)

Fig.1 Images of Qinghai lake of HY-1/COCTS band 9th (the area encompassed by black line is Qinghai lake without cloud)

3 定标系数确定

要根据式(7)确定定标系数就必须知道卫星观测青海湖和冷空间时的卫星入瞳处辐亮度以及相应的计数值.要确定卫星观测青海湖时的卫星入瞳处辐亮度需要分别计算 $L_{lake}(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$ 和 $L_{up}(\lambda)$. 本文利用青海湖 2003 年 8 月 8 日 11h(北京时)和 8 月 15 日 11h(北京时)NCEP 再分析资料 06h(世界时)的高空数据作为模式输入参数,利用 MODTRAN3.7 进行大气透过率 $\tau_a(\lambda)$ 和大气程辐射 $L_{up}(\lambda)$ 的计算.表 1 给出了这两次的通道的透过率和程辐射.

湖水表面的辐亮度根据浮标测得的水表温度,由 Plank 函数得到.表 2 给出了根据式(5)和式(6)计算的 2003 年 8 月 8 日和 8 月 15 日 HY-1 卫星观测青海湖时的卫星入瞳辐亮度和亮温.

综上所述,在知道了卫星的入瞳辐亮度和卫星的计数值之后,利用式(7)可计算出卫星通道的定标系数.结果在表 3 中给出.

表 1 NCEP 再分析资料计算出的 HY-1/COCTS 第 9 和第 10 通道的大气透过率和程辐射(程辐射单位: $w/cm^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$)

Table 1 The atmosphere transmittance and atmosphere path radiance of HY-1/COCTS band 9th and band 10th calculated by NCEP data (unit of path radiance: $w/cm^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$)

日期	HY-1/COCTS 第 9 通道		HY-1/COCTS 第 10 通道	
	透过率	程辐射	透过率	程辐射
2003.8.8	0.859 9	1.06E-06	0.761 1	2.10E-06
2003.8.15	0.978 9	1.25E-07	0.948 6	3.93E-07

表 2 HY-1/COCTS 第 9、10 通道入瞳辐亮度及亮温(辐亮度单位: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$, 亮温单位: (K))

Table 2 The entrance pupil radiance and radiance temperature of HY-1/COCTS band 9th and band 10th (unit of radiance: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$, unit of radiance temperature: K)

日期	HY-1/COCTS 第 9 通道		HY-1/COCTS 第 10 通道	
	入瞳辐亮度	亮温	入瞳辐亮度	亮温
2003.8.8	92.933 6	286.363 1	105.016 3	284.599 8
2003.8.15	96.108 8	288.450 4	109.836 1	287.648 8

表 3 HY-1/COCTS 第 9、10 通道定标系数(斜率单位: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})/DC$, 截距单位: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$)

Table 3 The calibration coefficients of HY-1/COCTS band 9th and band 10th (unit of slope: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})/DC$, unit of offset: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$)

日期	HY-1/COCTS 第 9 通道		HY-1/COCTS 第 10 通道	
	斜率	截距	斜率	截距
2003.8.8	0.155 4	-3.496 1	0.182 7	-5.025 7
2003.8.15	0.157 4	-3.572 3	0.187 1	-5.022 2

表 4 通过常规试验计算的 HY-1/COCTS 第 9 和第 10 通道定标系数(斜率单位: $(mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})/DC)$, 截距单位: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$)

Table 4 The calibration coefficients of HY-1/COCTS band 9th and band 10th calculated by normal experiments (unit of slope: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})/DC$, unit of offset: $mw/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$)

日期	HY-1/COCTS 第 9 通道		HY-1/COCTS 第 10 通道	
	斜率	截距	斜率	截距
2003.8.8	0.157 8	-3.551 5	0.185 6	-5.105 9
2003.8.15	0.157	-3.563 4	0.186 3	-5.002 3

4 误差分析

首先将表 3 列出新方法的定标结果与表 4 列出的常规校正场定标方法结果进行比较^[6].

比较根据常规方法和新方法计算的 HY-1/COCTS 第 9 和第 10 通道定标系数发现,这两种资料计算的定标系数斜率相差约 0.001 ~ 0.003、截距相差约为 0.02 ~ 0.1. 定标系数非常一致.

对于根据常规校正场方法所得到的定标系数,它的误差来源主要包括:水表辐亮度测量误差、通道辐亮度计算误差、大气辐射传输计算精度、卫星计数值获取和冷空间处理.而对于根据浮标和 NCEP 再分析数据计算的定标系数,它的误差来源主要包括:水表温度测量误差、通道辐亮度计算误差、大气辐射传输计算精度、卫星计数值获取和冷空间处理.

根据对 FY1C、FY2B 热红外通道的定标结果,常规校正场方法定标的结果不确定性在误差允许范围内.而对于根据浮标和 NCEP 再分析数据计算的定标系数,由于是第一次采用这样的数据进行卫星定标,它的不确定性只能和常规校正场方法进行比较.详细分析如下:

(1) 水表温度测量误差将直接带入卫星入瞳处辐亮度.青海湖水文自动观测浮标测量水表温度的准确度精度小于 0.3K^[8].

(2) 通道辐亮度计算中,假设青海湖是绝对黑体,发射率为 1.新方法中浮标测得的水表温度代替常规方法中 CE312 测得的水表亮温将带来计算结果的误差.为此,比较了 2003 年 8 月在青海湖试验时 CE312 测得的水表亮温与对应时刻浮标测得的水表温度,图 2 是比较结果.

在比较的数据中,结果相差 0.6K 以上的有 2 次,其余都在 0.5K 以下,均方根误差为 0.435 5K.

(3) 在大气透过率和大气程辐射的计算中,NCEP 再分析资料的准确度也直接影响定标精度.

比较了 2003 年 8 月青海湖实际观测时的探空数据与对应 NCEP 再分析资料对 HY-1/COCTS 入瞳辐亮度的影响。水表亮温选择 15.1313K。根据前面介绍的方法分别计算每次 HY-1/COCTS 第 9 和第 10 通道入瞳辐亮度和亮温,以及根据两种数据计算结果的差。结果如图 3 所示。

从比较的结果可以看出:在 14 次比较中,由于 NCEP 再分析数据和实际探空数据不同带来的结果差异中,第 9 通道:入瞳辐亮度最大差为 1.9,最小差为 0.05,均方根误差为 0.992;对应的亮温最大差为 1.26,最小差为 0.03,均方根误差为 0.657。第 10 通道:入瞳辐亮度最大差为 2.975,最小差为 0.001 8,均方根误差为 1.595 1;对应的亮温最大差为 1.905 9,最小差为 0.001 1,均方根误差为 1.018 5。

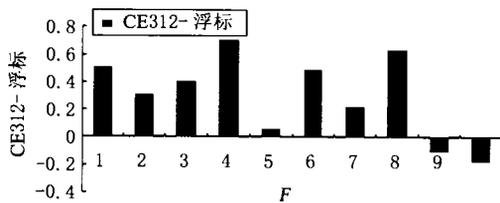


图 2 2003 年浮标测得水表温度与 CE312 测得亮温差值(单位:K)

Fig.2 The differences between water surface temperatures measured by auto buoy and radiance temperatures measured by CE312 in 2003 (unit:K)

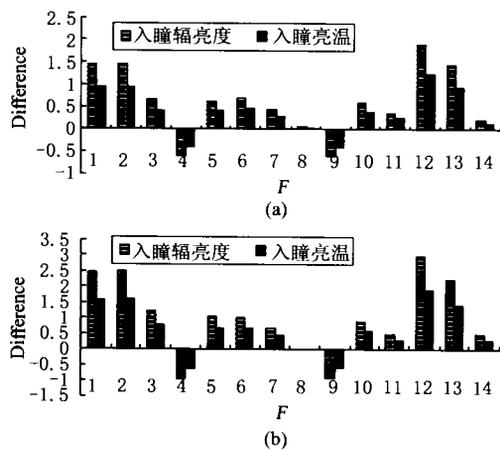


图 3 根据实际探空资料和 NCEP 再分析数据探空资料计算的 HY-1/COCTS 热红外通道入瞳辐亮度以及亮温之差(a 为 9 通道,b 为 10 通道)(辐亮度单位: $\text{mw}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$,亮温单位:(K))

Fig.3 The difference between entrance pupil radiances and the difference between entrance pupil radiance temperatures calculated by real sound data and NCEP reanalyzed data. (a: HY-1/COCTS band 9th; b: HY-1/COCTS band 10th) (unit of radiance: $\text{mw}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$, unit of radiance temperature: K)

5 结语

利用青海湖自动浮标系统测得的水表温度与 NCEP 再分析数据对 HY-1/COCTS 热红外通道进行绝对辐射定标的结果与青海湖场地试验所得到的定标结果一致。同时,采用该方法对 FY-2B 热红外通道进行绝对辐射定标,两种方法的定标结果十分一致^[8]。通过误差分析可以看出:这种一致并非偶然,而是具有普遍性,主要原因在于青海湖海拔高,水汽含量小,遥感辐射测量中水汽削弱量不大,因此 NCEP 资料水汽含量偏差的影响相对较小,为热红外通道定标提供了良好的条件。因此,可以在没有青海湖场地试验的时候,通过青海湖自动浮标系统测得的水表温度与 NCEP 再分析数据对卫星热红外通道实现较高频次的绝对辐射定标。

致谢 感谢中科院大气所冉令坤博士和国家卫星海洋应用中心赵崑同志在数据方面的支持。

REFERENCES

- [1] Palmer J M. Calibration of satellite sensors in the thermal infrared [J]. *SPIE*, 1993, **1762**:108—117.
- [2] Slater P N, Biggar S F, Thome K J, et al. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors [J]. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**(2): 349—359.
- [3] Slater P N, Thome K J, Arai K, et al. Radiometric calibration of ASTER data [J]. *Japanese Journal of Remote Sensing*, 1995, **15**:16—23.
- [4] Hu X Q, Zhang Y X, Liu Z Q, et al. Optical characteristics of china radiometric calibration site for remote sensing satellite sensors (CRCSRSS) [C]. *SPIE Proceeding*, 2000, **4151**:77—86.
- [5] WANG Wei-He, RONG Zhi-Guo. *Radiometric Calibration for the Thermal Channels of FY-1C and FY-2B*. 《The scientific research papers about china radiometric calibration site for remote sensing satellite》[C]. Beijing: Oceanpress (王维和,戎志国. FY-1C 和 FY-2B 热红外通道辐射定标《中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编》.北京:海洋出版社), 2001, 307—319.
- [6] Tong Jinjun, Qiu Kangmu, Li Xiaowen. Absolute radiometric calibration for thermal infrared bands of HY-1/COCTS by using Qinhai lake [C]. *IEEE IGARSS*, 2004.
- [7] JIN Yan-Ming, TAN Shi-Xiang. *The Meteorology Auto-Observation System in Qinhai Lake*. 《The scientific research papers about China radiometric calibration site for remote sensing satellite》[C]. Beijing: Oceanpress (井彦明,谭世祥. 青海湖水文气象自动观测浮标系统《中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编》.北京:海洋出版社), 2001, 111—120.
- [8] TONG Jin-Jun, QIU Kang-Mu, LI Xiao-Wen. Absolute radiometric calibration for thermal infrared bands of FY-2B by using NCEP reanalyzed data in Qinhai lake [C]. *IEEE IGARSS*, 2004.