

文章编号:1001-9014(2009)01-0042-04

凝视型地球辐射探测仪的辐射标定技术研究

陆段军, 王模昌, 郁蕴健, 洪孝炬

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:凝视型地球辐射探测仪是我国的新型空间应用遥感仪器, 仪器具有全波探测通道和短波探测通道, 采用腔体探测器, 对地凝视观测, 视场覆盖地表边缘, 用于从空间的低轨道卫星平台测量地球辐射出射总量, 提供地球辐射收支信息. 作为量化应用的遥感仪器, 对仪器提出了高精度的定标需求, 本文结合仪器的设计特点, 提出了使用辐射标准传递方法, 先用黑体标定凝视型地球辐射探测仪全波腔体探测通道, 继而后用全波通道标定积分球, 再用标定好的积分球对凝视型地球辐射探测仪短波探测通道进行标定的办法, 提高了短波探测通道的辐射标定精度.

关键词:地球辐射收支; 凝视型地球辐射探测仪; 腔体探测器; 辐射定标

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A

RADIATION CALIBRATION METHOD OF EARTH RADIATION MEASUREMENT NONSCANNER

LU Duan-Jun, WANG Mo-Chang, YU Yun-Jian, HONG Xiao-Ju

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Earth radiation measurement (ERM) nonscanner, which includes a total-wave channel and a short-wave channel, is a new type of remote sensing instrument in our country. There is an activity cavity detector in each of these channels. ERM nonscanner is used to stare the earth and measures the earth radiation budget from the low orbit satellite and its field of view covers with the edge of the earth. Being a quantification remote sensor, ERM needs a high precision radiant calibration standard. The method of radiant calibration standard transfer was proposed after considering the design of the instrument. At first, the totalwave active cavity detector was calibrated by a blackbody. Then, the totalwave active cavity was used to measure an integrating sphere source. At the end, the calibrated integrating sphere source was used to calibrate the short-wave active cavity detector. This method could enhance the calibration accuracy of ERM nonscanner short-wave channel.

Key words: earth radiation budget; ERM nonscanner; activity cavity detector; radiation calibration

引言

地球辐射收支的探测是空间遥感探测的有机组成部分, 在国际上相关的研究已经开展了很多年^[1-4], 其中文献[1]、[2]和[4]分别介绍了美国从1975年雨云卫星开始的ERB、1992年的ERBE仪器和目前应用的CERES的使用情况, 文献[3]介绍了欧洲新一代地球同步轨道气象卫星MSG上使用的GERB的研究和使用情况. 地球辐射探测仪是装载于我国新一代极轨气象卫星上的辐射收支测量仪器, 包含了凝视型地球辐射探测仪和扫描型地球辐射探测仪.

凝视型地球辐射探测仪设有短波探测和全波探

测两个通道, 短波通道的光谱范围为 $0.2 \sim 4.3 \mu\text{m}$, 用于测量天气系统对太阳入射辐射能量的反射情况, 全波通道的光谱范围为 $0.2 \sim 50 \mu\text{m}$, 用于测量天气系统对外辐射的总量, 全波通道和短波通道测量值之差反映了天气系统的净长波出射辐射. 出于仪器的量化应用需求, 全波通道的定标精度需达到 0.8% , 短波通道的定标精度需达到 1% , 本文对凝视型地球辐射探测仪的辐射标定办法进行了探讨, 提出了使用全波通道传递黑体辐射基准至积分球的办法, 探讨了这种标定方法在使用中碰到的问题和解决的方法. 通过这些方法的应用为凝视型地球辐射探测仪提供了辐射标定途径.

收稿日期: 2008-03-18, 修回日期: 2008-12-18

Received date: 2008-03-18, revised date: 2008-12-18

基金项目: 本项目得到国家科工局FY-3气象卫星地球辐射探测仪工程项目资助

作者简介: 陆段军(1973-), 男, 广西武鸣人, 研究员, 主要从事星载地球辐射收支与探测技术研究。

1 凝视型地球辐射探测仪的工作模型

凝视型地球辐射探测仪采用电替代辐射加热腔体探测器接收地面目标的辐射信息,腔体探测器结构为双腔热阻方式.在轨对地凝视工作时,腔体的电加热功率 P_e 补偿地气系统的目标入射辐射加热功率 P_R ,由此可以建立腔体探测器工作时的模型如下:

$$P_e + P_R = K_c \Delta T_c + C_c dT_c/dt + \sum P_r + \sum K_i \Delta T_i, \quad (1)$$

式中, K_c 表示腔体探测器与热沉之间的热导的大小, ΔT_c 表示主辅腔之间的温度偏差, C_c 表示腔体的热容大小, T_c 为腔体的温度, $\sum P_r$ 是腔体探测器与外部的辐射交换部分能量, $\sum K_i \Delta T_i$ 求和项表示引线传导能量.

地气系统目标辐射加热功率 P_R 为:

$$P_R = \int_{\lambda} N(\lambda, T) \alpha_c(\lambda) d\lambda \int_A f(\sigma) d\sigma, \quad (2)$$

式中, $N(\lambda, T)$ 是地气系统目标的辐亮度,它与光谱和温度相关, $\alpha_c(\lambda)$ 为腔体探测器的光谱吸收率, $f(\sigma)$ 是腔体探测器微小面元和光阑开口间相对位置的函数, A 为探测器面积, $d\sigma$ 为探测器表面微小面元的积分因子.

2 凝视型地球辐射探测仪标定方法

空间遥感仪器的定标方法通常包括地面定标、在轨定标和交叉定标等^[5-7],在地面定标中凝视型地球辐射探测仪全波通道采用黑体辐射源标定,黑体光谱辐射出射度由 Planck 公式给出,根据式(2),全波通道面对黑体接受的辐射功率为:

$$P_{BB} = \int_{\lambda} \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \alpha_c(\lambda) d\lambda \int_A f(\sigma) d\sigma. \quad (3)$$

腔体探测器的电加热功率 P_e 可通过加热电压测量得到,由式(1),腔体探测器加热电压 V_{WC} 为:

$$V_{WC}^2(n) = A_{WC} \int_{\lambda} N_{BB}(\lambda, T_n) \alpha_c(\lambda) d\lambda + B_{WC} + K_{FOV} [T_{FOV}(n) - T_{FOVref}], \quad (4)$$

式中, $A_{WC} = -R_{WC} \int_{\omega_{CA}} f(\sigma) d\sigma$,

$$B_{WC} = R_{WC} (K_{WC} \Delta T_{WC} + C_{WC} dT_{WC}/dt + \sum P_{WCR} + \sum_{i=1}^n K_{WCI} \Delta T_{WCI}),$$

其中, n 为标定时采样点个数, A_{WC} 和 B_{WC} 是通过黑体标定确定参数, K_{FOV} 为光阑温度影响因子, T_{FOV} 为光阑的瞬时温度, T_{FOVref} 为光阑的基准温度.

短波探测通道定标中将积分球和仪器一起置于

真空环境中,积分球辐亮度对波长的不确定度在 2.0% ~ 2.6% 之间,不能直接标定短波探测通道,由于全短波探测通道结构设计一致,因此在仪器定标中采用凝视型地球辐射探测仪全波通道传递黑体辐射标准至积分球,然后再用积分球标定仪器的短波通道.

在积分球与仪器间设置滤光片,滤光片吸收处于仪器短波通道光谱透过区域中平顶部分外的光谱辐射能量,在此光谱范围内仪器的光谱吸收率的变化小于 $\pm 0.3\%$,对定标精度不产生影响.积分球系统的辐亮度 N_{IS} 可以分为短波部分和长波部分:

$$N_{IS} = \int_{\lambda} N_{ISSA}(\lambda) T_f(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} [N_f(\lambda, T) + N_{ISLA}(\lambda, T) T_f(\lambda)] d\lambda, \quad (5)$$

上式中, $N_{ISSA}(\lambda)$ 为积分球的短波部分辐射, $T_f(\lambda)$ 表示为外加滤光片的光谱透过率, $N_f(\lambda, T)$ 表示滤光片的辐亮度, $N_{ISLA}(\lambda, T)$ 表示积分球体的长波辐亮度(包括泡壳的长波辐射和积分球内的长波辐射,它们是光谱和温度的函数),在实际应用中 $N_{ISLA}(\lambda, T)$ 将为滤光片吸收.

使用全波探测通道观察积分球滤光片系统,若对应不同的亮灯级数全波探测通道的输出信号为 $V_{WC}(n)$,则全波探测通道腔体探测器输出与积分球的辐亮度存在如下关系:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{ISSA}(\lambda, n) T_f(\lambda) \alpha_c(\lambda) d\lambda = \frac{1}{A_{WC}} V_{WC}^2(n) - \left(\frac{B_{WC}}{A_{WC}} + \int_{\lambda} N_f(\lambda, T) \alpha_c(\lambda) d\lambda \right), \quad (6)$$

式中,各参数可参见前文定义.关闭所有光源时,短波辐射输出为零,可以确定等式右侧积分项 $\int_{\lambda} N_f(\lambda, T) \alpha_c(\lambda) d\lambda$ 的大小.

用短波探测通道观察积分球时,短波通道的腔体探测器接收的积分球辐射功率 P_{SCR} 可表示为:

$$P_{SCR} = \int_S f(s) ds T_s \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{ISSA}(\lambda, n) T_f(\lambda) \alpha_c(\lambda) d\lambda + \varepsilon_{ISL} \right], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ISL} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_f(\lambda, T) T_s(\lambda) \alpha_c(\lambda) d\lambda$$

式中, $\int_S f(s) ds$ 为短波通道探测器的视场面积接受因子, T_s 表示短波通道滤光片在积分球滤光片内的透过率, $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{ISSA}(\lambda) T_f(\lambda) \alpha_c(\lambda) d\lambda$ 由式(6)标定得到, ε_{ISL} 为积分球的长波辐射部分透过短波

表 1 全波通道的黑体定标数据

Table 1 The calibration data of the total-wave channel by using the blackbody source

黑体温度(K)	203.15	218.15	233.15	248.15	263.15	273.15	283.15	291.15	300.15	308.15	318.15	325.15	333.15
全波通道数值	6191	6140	6084	6012	5924	5852	5775	5703	5620	5531	5416	5324	5208

滤光片被短波腔体接受的辐射功率.

短波腔体工作时,腔体加热电压和接受的积分球辐射功率之间满足如下关系式:

$$P_{SCe} + P_{SCR} = K_{SC}\Delta T_{SC} + C_{SC}dT_{SC}/dt + \sum P_{SCR} + \sum_{i=1}^n K_{SCi}\Delta T_{SCi} \quad (8)$$

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{ISSA}(\lambda) T_f(\lambda) \alpha_{SC}(\lambda) d\lambda = \frac{1}{R_{SC} T_s \int_{SCA} f(A) dA} V_{SCe}^2 + \frac{K_{SC}\Delta T_{SC} + C_{SC} \frac{dT_{SC}}{dt} + \sum P_{SCR} + \sum_{i=1}^n K_{SCi}\Delta T_{SCi} - \epsilon_{ISL} \int_{SCA} f(A) dA}{\alpha_{SC} T_s \int_{SCA} f(A) dA} \quad (9)$$

3 标定试验不确定度分析

凝视型地球辐射探测仪在进行标定试验时将仪器、黑体辐射源和积分球辐射源置于真空环境中.全波腔体对准黑体,为减小仪器与黑体的互相耦合,在仪器与黑体之间添加隔离冷屏,冷屏温度降至 150K 以下,黑体在 200 ~ 350K 之间进行恒温控制,在面源黑体温度稳定之后,获取该黑体温度下的定标数据,得到全波的定标数据,定标数据如表 1 所列.

使用真空平移转动台移动仪器至积分球侧,积分球依次按点亮 1 只灯、2 只灯、3 只灯、4 只灯、5 只灯和 6 只灯,待光源输出稳定后,短波对准积分球,记录短波通道对积分球输出的响应值,全波对准积分球,分别记录开灯和关灯状态下的响应值,可得到仪器观测到的积分球的短波辐亮度总量和短波通道响应,得到的定标数据见表 2.

标定结果的不确定度主要包括源的不确定度、仪器与源的耦合不确定度和仪器自身的辐射测量不确定度,对于短波通道的标定则在考虑源的相关因素之外,还要考虑传递过程不确定度和短波通道自身辐射测量不确定度.分析可参见表 3 和表 4.

表 2 短波通道的积分球定标数据

Table 2 The calibration data of the short-wave channel by using the integrating sphere source

积分球灯数(n)	1	2	3	4	5	6
亮灯状态全波数值	5920	5765	5618	5471	5316	5162
暗灯状态全波数值	6066	6058	6053	6049	6046	6050
亮灯状态短波数值	4354	4157	3953	3743	3518	3268

$$P_{SCe} = V_{SCe}^2 / R_{SC}$$

其中, V_{SCe} 为腔体加热电压; R_{SC} 表示腔体加热丝阻值和积分球的辐射亮度之间满足如下关系,其它参数定义参见式(2).因此,开积分球不同灯数,可以标定仪器的短波探测通道,短波腔体的加热电压 V_{SCe} 与积分球的短波辐亮度 N_{ISS} 之间的关系满足式(9):

表 3 凝视型地球辐射探测仪全波探测通道的标定不确定度

Table 3 The radiation calibration uncertainty of the ERM total-wave channel

不确定度组成	符号	量值	百分比 (300K 黑体)	
黑体不确定度	黑体比辐射率不确定度	$\Delta\epsilon_{BB}$	0.0015	0.15%
	温度绝对不确定度	ΔT_{BB}	0.18K	0.24%
	仪器附加辐射	σ_1	0.14W/m ² sr	0.1%
仪器与黑体耦合不确定度	冷隔离屏附加辐射干扰	σ_2	0.0338W/m ² sr	0.023%
	光阑反射黑体辐射	σ_3	0.013W/m ² sr	0.01%
电子线路噪音	σ_{VTWno}	0.5μV	0.2%	
球面光阑构件温度不确定度	σ_{TFOV}	4K	0.07%	

表 4 短波通道定标引入附加不确定度

Table 4 The addition uncertainty of the ERM short-wave channel radiation calibration

不确定度组成	符号	量值	百分比	
积分球长波辐射变动	ΔI	0.1W/m ² sr	0.07%	
积分球辐射稳定性	σ_{NIS}	0.2%	0.2%	
传递附加误差	全波通道光阑温漂	σ_{TFOV}	4K	0.07%
	全波通道电子学噪音	σ_{VTWno}	0.5mV	0.2%
短波通道电子线路噪音	σ_{VSWno}	0.5mV	0.2%	

由表 3 可知,凝视型地球辐射探测仪全波探测通道的标定的综合不确定度 σ_{TW} 为:

$$\sigma_{TW} = \Delta\epsilon_{BB} + \Delta T_{BB} + \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_{VTWno}^2 + \sigma_{TFOV}^2} = 0.63\% \quad (10)$$

由表 3 和表 4 可知,短波探测通道的标定的综合不确定度 σ_{SW} 为:

$$\sigma_{SW} = \Delta\epsilon_{BB} + \Delta T_{BB} + \Delta I$$

$$+ \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{NIS}^2 + 2(\sigma_{TFOV}^2 + \sigma_{VTWno}^2) + \sigma_{NIS}^2 + \sigma_{VSWno}^2}$$

$$= 0.88\% \quad (11)$$

5 结语

作为量化应用的凝视型地球辐射探测仪,准确地辐射标定是确保仪器能够准确使用的关键环节。传统的短波红外通道标定通常使用的外场标定方法或积分球标定办法均有局限,本文提出了先用黑体标定凝视型地球辐射探测仪全波探测通道,继而用全波通道标定积分球,得到积分球的短波辐射总量,再用标定好的积分球对凝视型地球辐射探测仪短波探测通道进行标定的办法,提高了短波探测通道的定标精度,为仪器的量化应用建立了基础。

REFERENCES

- [1] Kyle H L, Hickey J R, Ardanuy P E, *et al.* The nimbus earth radiation budget (ERB) experiment: 1975 to 1992 [J]. *Bull. American Meteorol. Soc.*, 1993, **74**, 815—830.
- [2] Barkstrom B R. Earth radiation budget measurements-Pre-ERBE, ERBE, and CERES [J]. *Proc. of SPIE*, 1990,

1299, 52—60.

- [3] Harries J E, Crommelynck D. The geostationary earth radiation budget experiment on MSG-1 and its potential application [J]. *Adv. in Space Res.*, 1999, **24**, 915—919.
- [4] Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, *et al.* Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1996, **77**, 853—868.
- [5] Lee III R B, Barkstrom B R, Smith G L, *et al.* The Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) sensors and preflight calibration plans [J]. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 1996, **13**, 300—313.
- [6] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, *et al.* On-orbit radiometric calibration of fengyun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the south china sea [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2), 97—101.
- [7] PENG Guang-Xiong, HE Yu-Hua, LI Jing, *et al.* Study on cbers-2's CCD image cross calibration and atmospheric correction [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1), 22—25.

(上接第 37 页)

表 1 算法误匹配率统计表

Table 1 Results of algorithm mismatch ratio

图 像	标定板	马路
本文算法	16.3%	19.1%
SAD	34.2%	30.8%

5 结语

红外图像高噪声,低分辨率的特点,使得基于灰度的区域匹配方法很难取得较好的效果。本文采用相位一致性对图像进行变换,利用变换后的值代替像素灰度值作为匹配基元,并在匹配过程中采用视差梯度约束。试验结果表明,经相位一致性变换后形成的新图像,噪声得到了一定的抑制,图像的特征更加明显,可以采用区域匹配的方法。在匹配过程中采用视差梯度的约束,提高了算法的正确匹配率。另外,实验中使用的是经过标定满足极线约束条件的图像。在实际情况下,图像会有伸缩和旋转的问题而不满足极线约束。这种情况下,可以考虑将搜索范围从一维扩展到二维,但这将增加计算量。如何减少这种情况的计算复杂度将是今后研究的可能方向。

REFERENCES

- [1] SONG Xin, WANG Lu-Ping, WANG Ping, *et al.* IR target

tracking based on improved mean shift method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (宋新, 王鲁平, 王平, 等. 基于改进均值位移的红外目标跟踪方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(6): 429—432.

- [2] LIU Sheng-Peng, FANG Yong. Infrared image fusion algorithm based on contourlet transform and improved pulse coupled neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘盛鹏, 方勇. 基于 Contourlet 变换和 IPCNN 的融合算法及其在可见光与红外线图像融合中的应用. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 217—221.
- [3] LI You-Zhu, WANG Jian-Xun. Infrared thermography target detection between concrete structure and plant leaf [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李友竹, 王建勋. 混凝土结构物与植物叶片之红外热像探测研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 182—186.
- [4] Hajebi K, Zelek J S. Dense Surface from Infrared Stereo [C]. *Applications of Computer Vision*, 2007. WACV 07. IEEE Workshop on Feb. 2007: 21—21.
- [5] Kovesi P D. Phase congruency: A low-level image invariant [J]. *Psychological Research*, 2000, **64**(2): 136—148.
- [6] Mulet-Parada M, Noble J A. 2D + T acoustic boundary detection in echocardiography [J]. *Medical Image Analysis*, 2000, **4**: 21—30.
- [7] Myerscough P J, Nixon M S. Temporal phase congruency [C]. *Image Analysis and Interpretation*, 2004, 6th IEEE Southwest Symposium on USA, 2004: 76—79.
- [8] Xiao Z, Yu M, Li Q, *et al.* Symmetry Phase Congruency: Feature Detector Consistent with Human Visual System Characteristics [C]. WAA2003. 2003: 381—386.