

基于标准探测器的 FY-2(05)星扫描辐射计 可见通道外场定标

周磊, 彭妮娜, 张黎明, 吴浩宇, 郑小兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感室(九室), 安徽合肥 230031)

摘要:为了对 FY-2 号 05 星扫描辐射计可见光通道进行发射前外场辐射定标,在采用了传统的辐亮度定标方法的同时,提出了一种新型的独立于扫描辐射计可见光通道光谱响应函数的基于标准探测器的反射比定标法(Detector Based Reflectance Calibration)。该方法通过筛选波长得出在一定的精度范围内 FY-2 号可见光通道的漫射板反射辐亮度与漫射板的某一单波长反射辐亮度成正比,从而可以用 8 通道高精度辐亮度标准探测器中对应波段的探测器的响应替代 FY-2 号 05 星扫描辐射计宽波段响应直接求出定标系数。传统辐亮度定标方法结果的不确定度为 6.0%~6.4%,而利用基于标准探测器的反射比定标法定标结果的不确定度达到 5.4%。实验结果表明基于标准探测器的反射比定标法由于采用了直接由高精度低温绝对辐射计传递的标准探测器,与传统的基于辐射源传递相比其测量精度得到有效提高,并且受现场大气条件的影响小。

关键词:辐射定标;辐亮度定标;基于标准探测器的反射比定标;扫描辐射计

中图分类号:TP 79 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0323(2007)01-0020-06

1 引言

卫星遥感传感器发射前外场绝对辐射定标采用的最基本方法是辐亮度法和 Langley 法。辐亮度法对于位移不变的扫描辐射计可见光通道线性光学传感器系统,其辐射量的输入 L 与传感器系统输出信号 V 成正比,通过对不同水平辐射量的测量,采用线性拟合的方法,确定传感器系统响应率和噪声水平。而 Langley 法则是在稳定大气和气体散射/吸收符合比耳定律条件下,依据扫描辐射计响应电压与大气消光系数的关系,在不同的大气质量下进行一系列测量,采用线性拟合的方法,得出拟合参数。前者需要精确已知扫描辐射计相对光谱响应率,而且辐射标准传递探测器采用的是灯—板定标系统,其本身定标误差为 5% 左右。后者定标精度取决于大气状况,大气状况很差时,定标精度很低。为减小上述不利因素带来的测量误差,引入了基于标准探测器的反射比定标法。该方法继承了辐亮度法不受大气状况影响的优点,同时也摒弃了辐亮度法需要准确已知扫描辐射计各通道相对光谱响应率,辐射

标准传递探测器定标精度低的缺点,采用积分中值定理推导出在一定的精度范围内, FY-2 号可见光通道的漫射板反射辐亮度与漫射板的某一单波长反射辐亮度成正比。事实上,邱金桓^[1]等通过对大量地面太阳辐射测量数据的分析也得到了类似的结论。据此,我们尝试采用不依赖于扫描辐射计可见光通道光谱响应函数、降低对定标过程中的天气依赖程度的基于标准探测器的反射比定标。由于采用了直接由高精度低温绝对辐射计传递的探测器标准,期望定标的总不确定度得以提高。

本文采用基于标准探测器的反射比定标法,于 2006 年 4 月 12 日至 4 月 14 日在云南天文台对 FY-2(05)星扫描辐射计的可见光通道(0.55~0.90 μm)进行了绝对辐射定标,并与辐亮度法进行了比较,结果具有很好的一致性,而 Langley 法因为大气状况变化很快,其定标结果和基于标准探测器的反射比定标法、辐亮度法相比较差。这也充分说明,在大气状况变化很快且扫描辐射计相对光谱响应率未知的情况下,基于标准探测器的反射比定标

法的优越性更为突出。

2 基于标准探测器的反射比定标法原理及检验方法

2.1 定标原理

在太阳照明条件下,某一时刻漫射板反射的 FY-2 号可见光通道辐亮度:

$$L(t) = \int a(\lambda) L_r(\lambda) d\lambda / \int a(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中: $a(\lambda)$ 是扫描辐射计的相对光谱响应函数, $L(t)$ 为 t 时刻辐射计的辐亮度。应用积分中值定理:

$$L(t) = (\lambda_2 - \lambda_1) a(\lambda_0) L_r(\lambda_0) / \int a(\lambda) d\lambda = K a(\lambda_0) L_r(\lambda_0) \quad (2)$$

对于不同的实验条件,随时间的不同, λ_0 的取值有可能不同。在高海拔、小光学厚度的昆明实验条件下,以固定波长 λ_d 取代随时间变化的 λ_0 , 如果取代后的相对误差较小,如小于 1%:

$$\left| \frac{K a(\lambda_0) L_r(\lambda_0) - K a(\lambda_d) L_r(\lambda_d)}{K a(\lambda_0) L_r(\lambda_0)} \right| \leq 0.01 \quad (3)$$

则 FY-2 可见光通道辐亮度以固定波长 λ_d 的时间序列辐亮度表示:

$$L(t) = K a(\lambda_d) L_r(\lambda_d) = C L_r(\lambda_d) \quad (4)$$

由式(4)可见,在一定的精度范围内, FY-2 号可见光通道的漫射板反射辐亮度与漫射板的某一单波长反射辐亮度成正比。根据式(1)和式(4),对于已扣除暗电流噪声的 FY-2 号可见光通道响应电压 V_r 与单波段辐亮度关系可进一步导出反射比定标关系:

$$V_r = A L_r = A C L_r(\lambda_d) \frac{C L_r(\lambda_d)}{C I_0(\lambda_d)} = V_0 \frac{I_r(\lambda_d)}{I_0(\lambda_d)} = V_0 \rho_r(\lambda_d) \quad (5)$$

式(5)中的 V_0 即为要求的定标系数, $L_r(\lambda_d)$ 由 8 波段绝对辐亮度计同步测量给出,定标引用的大气外太阳照度 $E_0(\lambda)$ 参照 2000 ASTM E-490。由于实验是在春分附近,数据处理过程中,忽略日-地距离引起的照度变化,大气外太阳常数引用平均照度。根据式(5),采用最小二乘法计算出扫描辐射计可见光通道定标系数。

2.2 基于标准探测器的反射比定标法的检验方法

扫描辐射计对应的太阳及天空背景照明的漫射板辐亮度 L 可由下列公式计算出:

$$L_r = \frac{\int a(\lambda) L(\lambda) d\lambda}{\int a(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

其中: $a(\lambda)$ 是扫描辐射计可见光通道的相对光谱响应函数。利用式(6)给出的 FY-2 号可见光通道漫射板反射辐亮度 L_{FY-2} 以及大气外辐亮度 L_{0FY-2} , 可以对单波长替代的基于标准探测器的反射率定标方法的各时刻反射率误差进行评估:

$$\text{固定波长替代反射率误差} = \frac{L_{FY-2}}{L_{0FY-2}} - \frac{L_\lambda}{L_{\lambda_0}} \quad (7)$$

对基于标准探测器的反射率定标,根据式(7),期望在任意时刻的误差均小于 0.01。

3 定标过程

3.1 定标仪器

本次实验中用作辐射标准传递辐射计的是 ASD 野外光谱辐射计、ISI921VF 系列野外地物光谱辐射计和 8 通道高精度辐亮度计。其中 ASD 野外光谱辐射计和 ISI921VF 系列野外地物光谱辐射计用于辐亮度法定标,8 通道高精度辐亮度计用作基于标准探测器的反射比定标法。同时,为检验和验证定标过程中标准传递的精度,8 通道高精度辐亮度计也用于对绝对辐亮度进行监视。下面分别简单介绍了这 3 种仪器:

3.1.1 8 通道高精度辐亮度计

8 通道高精度辐亮度计各通道中心波长分别为: 515、544、633、675、750、830、900 和 960 nm, 带宽 10 nm。仪器是由陷阱探测器、视场光阑、孔径光阑、窄带滤光片以及温控系统组成。陷阱探测器的定标与标准传递是以高精度低温绝对辐射计^[3] 为基准,其不确定度优于 0.035%^[2], 窄带滤光片采用 Lambda 900 分光光度计进行透过率测量,温控系统可以将温度控制在 $\pm 0.1^\circ$ 。为检验和验证定标过程中标准传递的精度,以该仪器对漫射板辐亮度进行监视和测量,对 ASD 和 ISI921VF 中与这几个相近波段的辐亮度测量结果进行评估和检验,给出各波段辐亮度的相对标准偏差,同时这种波段式陷阱探测器也用于基于标准探测器的反射比定标法实验。

3.1.2 ISI921VF 系列野外地物光谱辐射计

本系列型号野外地物光谱辐射计主要应用于野外试验,利用太阳辐射作为照明光源,可测量地物目标的光谱辐亮度;利用漫反射参考板对比测量,可获得目标的反射率光谱信息;通过对经过标定的漫反

射参考板的测量,可获得地面的总照度以及直射/漫射照度光谱信息;利用特定的辅助测量机械装置,可获得地面目标的BRDF(方向反射因子)光谱信息参数测量。该装置在本次实验中主要是辐亮度定标和辐射标准传递,其波长范围380~1 080 nm,3°视场,波长准确度1.4 nm,相对精度0.5%。

3.1.3 ASD高精度野外便携式光谱辐射仪

ASD是一种便携式野外光谱测量仪器,由光谱仪、笔记本电脑和探测光纤组成。光谱仪可实现光电信号的快速转换,光谱仪自带的笔记本电脑可以控制光谱仪完成辐射测量并存储测量数据,探测光纤实现光信号传输。这套装置的特点是波段范围宽、光谱分辨率高、携带方便,该仪器常用于野外实验。ASD主要参数为:波段范围350~2 500 nm,光谱分辨率为1 nm,仪器视场角为1°。

3.2 定标过程

FY-2扫描辐射计安装在高度约5 m的支架上,在其正下方为1.2 m的漫反射板。同步观测架位于扫描辐射计、漫射板的北偏西方向(不遮挡直射阳光)。标准传递辐射计与8通道绝对辐亮度校验探测器设计安装在同一个外壳内,并安装在同步观测架的横杆上,同步观测架横杆可以转动,以便将标准传递辐射计、陷阱探测器在FY-2扫描辐射计、漫射板之间移进和移出。辐射计入瞳到漫射板的高度约2.5 m(定标过程如图1)。

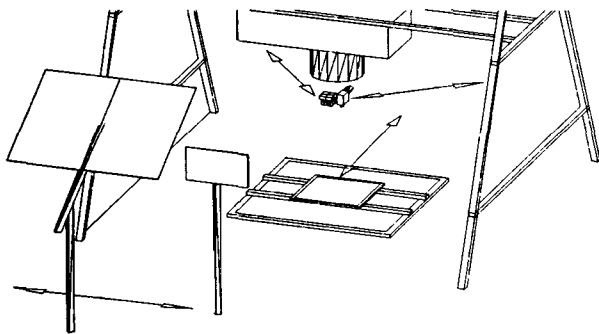


图1 定标示意图

Fig. 1 Schematic drawing of calibration

辐亮度定标实验与Langley法定标和漫射板的BRDF检测同时进行,涉及标准漫射板的测量。对于漫射板和标准板均测量其遮挡直射阳光和直射加漫射辐亮度,其中遮挡测量两次(直射加漫射测量前后各1次)。

由于每块漫射板测量挡—不挡—挡,标准板(500 mm)、大板各测量3次,对于FY-2扫描辐射计和标准传递辐射计的测量顺序在单号和双号板是

不一样的。

定标试验每天测量均从高反射板开始,按照反射比秩序依次测量。在完成一个轮次后,再进行下一轮次。2006年4月12日从早上约10:46开始(北京时),到中午约12:40对5种反射比的板进行了测量,共测量了4个轮次,增益为1;4月13日从早上约9:00开始,到下午14:30对5种反射比的板进行了测量,共测量了11个轮次,增益为1;4月14日从早上约10:00开始,到11:00对5种反射比的板进行了测量,共测量了4个轮次,增益为1。所有原始数据都对增益归一化。

为保证测量数据顺序与实际测量顺序相一致,定标过程中由专人负责统一指挥,并由专人负责记录测量顺序。

4 定标结果及分析

4.1 定标结果

4.1.1 漫射板BRF特性及反射率

由于定标过程中采用了1.2 m的漫射板,其BRF和均匀性都未知,因此在定标过程中加入了标准漫射板,用来测量1.2 m漫射板的特性,这也是准确定标的关键。定标实验中,针对5块不同漫射板的光谱绝对辐亮度进行了3 d的测量,3 d之间的结果以及不同辐射计的测量结果都具有很好的一致性。由3 d漫射板的光谱绝对辐亮度测量计算得到的漫射板的方向特性和漫反射率结果如图2。4月12日和4月13日ISI921VF野外地物光谱辐射计测量的5块不同漫射板的光谱绝对辐亮度的相关系数在0.999左右;4月12日8通道高精度陷阱探测器测量的5块不同漫射板的光谱绝对辐亮度的相关系数在0.9999以上;4月13日8通道高精度陷阱探测器测量的5块不同漫射板的光谱绝对辐亮度的相关系数在0.999左右。计算得到的3 d 5块漫射板的漫反射率标准差分别为(波段范围在400~800 nm以内):1#板0.01以下、2#板0.01以下、3#板0.02以下、4#板0.03以下以及5#板0.09以下;计算得到的3 d 5块漫射板的BRF标准差分别为(波段范围在400~800 nm以内):1#板0.01以下、2#板0.01以下、3#板0.01以下、4#板0.01以下以及5#板0.01以下。分析说明5块漫射板的BRF受天气环境的影响较小,3 d的结果重复性很好,而3#、4#、5#板漫反射率标准差偏大,可能是由于3#、4#、5#板漫反射率较小,仪器本身噪声带来的误差。根据上述结果分析,本次定标所用的8通道辐亮

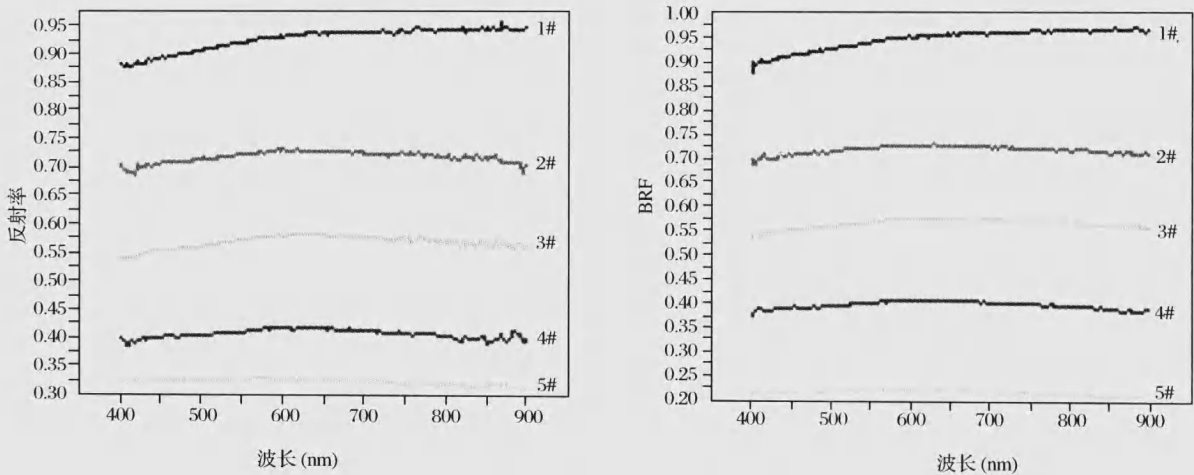


图 2 5 块漫反射板反射率和 BRF 特性

Fig. 2 Reflectivity and BRF of five standard white references

度计和标准传递辐亮度计具有较好的线性、稳定性和重复性。

4.1.2 辐亮度标准传递的检验

为检验和验证定标过程中标准传递的精度,以 8 通道高精度辐亮度计对漫射板辐亮度进行监视和测量,同时对 ASD 和 ISI921 几个相近波段的辐亮度测量结果进行评估和检验,其相对标准差最大约为 5%,其主要原因是波长匹配误差。通过连续 2 d

对 ASD 和 ISI921 辐亮度监视,两台辐射计工作稳定,数据可靠。

4.1.3 反射比定标方法波长验证

根据式(7),利用所给的光谱响应函数以及 ASD、ISI921 辐射计 4 月 13 日的 11 轮测量数据为例对基于标准探测器的反射比定标方法进行验证,结果如图 3 所示。图中以不同色的曲线表示不同时刻所测量的积分光谱反射比与单波长光谱反射比之

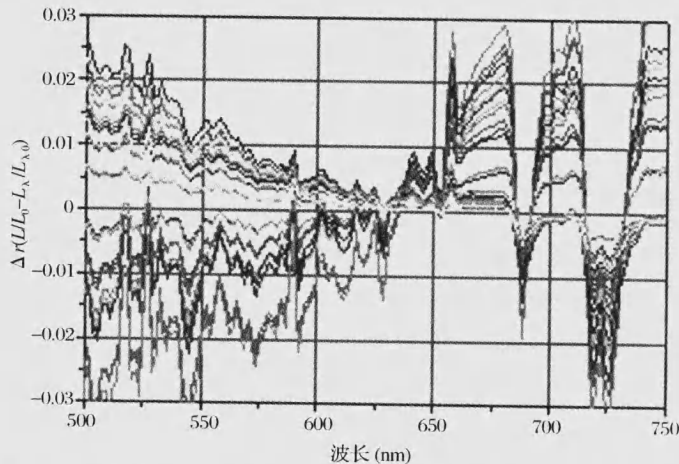


图 3 4 月 13 日积分光谱反射比与单波长光谱反射比之差曲线

Fig. 3 Difference of reflectance calibration of integral spectrum and single spectrum

差。由图可见,在波长 645 nm 附近,两台仪器测量的各时刻光谱积分反射比与单波长反射比之差均小于 0.005(期望在任意时刻的误差均小于 0.01)。

4.1.4 基于标准探测器的反射率法定标结果

利用 4 月 13 日测量数据为例,其中 ASD 和 ISI921 用于辐亮度法定标结果,8 通道辐亮度计用于基于探测器的反射比定标结果(只列出 4 个通道

定标数据),对 13 日 05 星扫描辐射计可见光通道定标结果统计见表 1。

4.2 定标结果分析

从 4 月 13 日两台光谱辐射计对基于标准探测器的反射比定标方法验证的 11 轮检测结果表明(如图 2),在 645 nm 附近各时刻光谱积分反射比与单波长反射比之差小于 0.005,该结果证明了在本次

表1 05星扫描辐射计可见光通道定标结果统计

Table 1 Result of the visible channel of scanning radiometer of satellite FY-2-05

	A1	B1	A2	B2
ISI921	-1.308	-1.283	-1.234	-1.269
ASD	-1.315	-1.289	-1.240	-1.275
8通道辐亮度计	-1.303	-1.278	-1.229	-1.264
平均	-1.309	-1.289	-1.234	-1.269
SD	0.006	0.006	0.006	0.006

定标实验条件下,基于标准探测器的反射比定标方法在较高的精度范围内成立。

从表1的定标结果统计来看,基于标准探测器的反射比定标法和辐亮度法两者定标结果非常一致,这充分证明基于标准探测器的反射比定标法的可行性和正确性。

另外,正如上文所述,ASD和ISI921辐射计是基于辐射源传递的灯-板系统^[5],而8通道辐亮度计采用了直接由高精度低温绝对辐射计传递的标准探测器^[4],其不确定度可以提高2~3数量级,同时

扫描辐射计可见光通道传感器实际的光谱响应函数与给定的光谱响应函数之间存在一定的差异,辐亮度法定标的误差分析相对来说存在比较大的困难,而对于基于标准探测器的反射比定标,并不依赖于光谱响应函数,被定标传感器之间的光谱差异可归结到波长匹配误差,因此在高海拔、小光学厚度测量条件下,基于标准探测器的反射比定标法和辐亮度法可以相互验证。基于标准探测器的反射比定标方法和辐亮度法定标不确定度分析如表2、3所示。

表2 基于标准探测器的反射比定标误差分析

Table 2 Analysis of error of detector based reflectance calibration

探测器标准传递误差(%)	2.0
测量误差(%)	0.5
波长配准误差(%)	2.0
漫射板均匀性误差(%)	2.0
漫射板光谱平坦性误差(%)	2.5
同步非一致性(%)	2.5
太阳常数引入误差(%)	2.0
综合不确定度(%)	5.4

表3 辐亮度法定标误差分析

Table 3 Analysis of error of radiation calibration

标准灯系统(%)	2.5~4.0
测量误差(%)	0.6
波长配准误差(%)	2.0
漫射板均匀性误差(%)	2.0
漫射板光谱平坦性误差(%)	2.5
同步非一致性(%)	2.5
太阳常数引入误差(%)	2.0
综合不确定度(%)	6.0~6.4

5 结 语

通过本次外场实验,在采用了传统的辐亮度定标方法的同时,尝试采用了基于标准探测器的反射比定标法定标FY-2(05)星扫描辐射计,在高海拔、小光学厚度条件下,该方法的优点充分体现出来,其定标结果与辐亮度法定标结果非常一致,而整体定标实验不确定度为5.4%,符合外场定标要求。但是通过对基于标准探测器的反射比定标法的初步尝试,发现该方法的关键是固定波长的选择,如何在复杂、多变的大气状况中准确选择出固定波长,需要进一步研究。

参考文献:

[1] Qiu Jinhuan. Broadband Extinction Method to Determine

Aerosol Optical Depth from Accumulated Direct Solar Radiation[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(11): 1611-1625.

- [2] 郑小兵,吴浩宇,章俊平. 不确定度优于0.035%的绝对光谱响应率标准探测器[J]. 光学学报, 2001, 21(6): 749-752.
- [3] Thomas R, Gentile J, Houston M, *et al.* The NIST High Accuracy Cryogenic Radiometer[J]. Appl Opt., 1996, 35(7): 1056-1068.
- [4] 郑小兵,吴浩宇,章俊平,等. 高精度光辐射定标和标准传递方法研究[J]. 科学通报, 2000, 45(12): 1341-1344.
- [5] Peng Nina, Yi Weining, He Chaolan. In-lab Calibration for Absolute Spectral Responsivity of Optical Instrument[A]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, v 6150 II. 2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment [C], 2006.

Detector Based Field Radiometric Calibration for the Visible Band of Multi-channel Scanning Radiometer of Satellite FY-2-05

ZHOU Lei, PENG Nina, ZHANG Li-ming,
ZHENG Xiao-beng, WU Hao-yu

*(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science,
P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)*

Abstract: For pre-launch field radiometric calibration for the visible channel of scanning radiometer of satellite FY-2-05, the traditional radiation calibration method has been adopted, on the other hand, a novel method called Detector Based Reflectance Calibration (DBRC) which is independent of spectral response function of scanning radiometer has been advanced. Because the integral radiation of the Standard White Reference is in direct proportion to that in a certain narrow wave band, through the selection of bands from the eight channels of the high accuracy Multi-channel radiance standard detector, the integral response radiation of the FY-2 scanning radiometer can be replaced by the narrow wave band response radiation of the high accuracy Multi-channel radiance standard detector. Therefore, the calibration coefficients can be determined directly by the high accuracy Multi-channel radiance standard detector. The uncertainty of traditional radiation calibration is about 6.0%~6.4%, while the uncertainty of DBRC reaches 5.4%. The results of the experiments demonstrate that the uncertainty of BRDC, which is based on the high accuracy cryogenic radiometry system, is much higher than that of the traditional radiation calibration which is based on the standard radiation source.

Key words: Radiometric calibration, Radiation calibration, Detector based reflectance calibration (DBRC)