

# DQ-1 宽幅成像光谱仪发射前载荷定标技术

王 阳<sup>1</sup>, 张冬冬<sup>1</sup>, 张 镔<sup>1,2</sup>, 熊千千<sup>1</sup>, 钮新华<sup>1</sup>, 陈帅帅<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江杭州 310024;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 大气环境监测卫星作为国家民用空间基础设施规划中的科研卫星, 其遥感应用需求对其载荷的定量化精度要求越来越重要。宽幅成像光谱仪作为大气环境监测卫星中的主要载荷, 可获取光谱范围从可见光至长波红外(0.415~12.000  $\mu\text{m}$ ) 的陆表和大气多光谱信息。采用 45° 扫描镜配合消旋系统的扫描方式, 光路结构采用同轴望远镜系统, 实现 3 个探测器焦面上 21 个谱段的同时对地的超宽幅高空间分辨率成像。为了准确地获取能量和仪器响应之间的定量关系, 在卫星发射前开展宽幅成像光谱仪全光路、全口径辐射定标试验, 分别介绍了可见到短波谱段积分球定标技术和中长波谱段热真空红外定标技术, 为用户定量应用提供了良好的保障, 并对定标过程中传递路径下的误差来源及精度进行分析评估。

**关键词:** 光学遥感; 辐射定标; 定量化; 定标精度

**中图分类号:** TP 722.5

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.01.018

## Pre-launch Calibration Technology of DQ-1 Wide-Field Imaging Spectrometer

WANG Yang<sup>1</sup>, ZHANG Dongdong<sup>1</sup>, ZHANG E<sup>1,2</sup>, XIONG Qianqian<sup>1</sup>,

NIU Xinhua<sup>1</sup>, CHEN Shuaishuai<sup>1,3</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, Zhejiang, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As a scientific research satellite in the national civil space infrastructure planning, the quantitative development for the atmospheric environment monitoring satellite will be more and more important for the application of space remote sensing. As the main instrument for the atmospheric environment monitoring satellite, the wide-field imaging spectrometer can achieve the multi-spectral information about the land surface and atmosphere in the spectral range from visible light to long-wave infrared bands (0.415~12  $\mu\text{m}$ ). The 45° scanning mirror and racemic system is used for the scanning imaging, and the coaxial telescope system is applied to the optical structure to simultaneously obtain ultra-wide and high spatial resolution imaging from the ground with 21 spectral bands on the focal plane of the three detectors. To accurately obtain the quantitative relationship between the radiance and the instrument response, the full-optical path and full-aperture radiometric calibration tests are carried out for the wide-field imaging spectrometer before the satellite launches. The integrating sphere calibration in the visible short-wave spectrum and the vacuum infrared calibration in the medium and long wavelength bands are introduced, respectively, which provides a good guarantee for the quantitative application of users. During the calibration process, the error sources and calibration accuracy in the transfer path are analyzed and evaluated.

**Key words:** optical remote sensing; radiometric calibration; quantification; calibration accuracy

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-06-29

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902004)

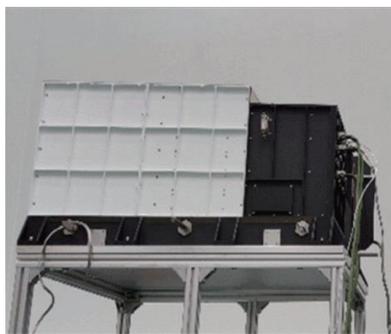
作者简介: 王 阳(1990—), 男, 博士, 主要研究方向为空间遥感仪器定标技术。

通信作者: 张冬冬(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为红外光电技术、光电成像技术及系统工程。

## 0 引言

大气环境监测卫星是国家民用空间基础设施规划中的科研卫星,是我国大气环境监测领域的重要组成部分。大气环境监测卫星是一颗综合探测卫星,装载了大气探测激光雷达、高精度偏振扫描仪、多角度偏振成像仪、宽幅成像光谱仪(Wide-field Imaging Spectrometer)等5类遥感仪器,通过主动和被动手段结合,实现对大气细颗粒物、污染气体、温室气体、云和气溶胶等大气、水和生态环境等要素进行大范围、连续、动态、全天时的综合监测。

宽幅成像光谱仪是大气环境监测卫星上的重要遥感仪器之一,通过获取全球大气和地面百米量级真彩图像,为天气预报、气候变化研究和地球环境监测提供重要物理参数,提高我国在水体、生态及大气环境监测及评估方面的能力,将有效代替各行业部门对外国遥感数据的依赖,推动环境保护、气象、农业等领域遥感应应用,进一步发挥民用航天遥感数据应用的作用。宽幅成像光谱仪采用多元并扫技术、大视场成像、高灵敏度焦平面探测器组件等技术,该载荷具有2 300 km幅宽、600/150/75 m的空间分辨率能力,能够获取全球大气和地表百米量级的全球、全天候、多光谱、三维、定量遥感数据,获取可见至热红外波段21个探测波段的地球二维影像信息,经信息获取和数据处理,实时输出数字图像数据,通过卫星发射前对系统每个通道进行辐射定标和光谱定标以及在轨运行时星上辐射标定,实现图像数据量化<sup>[1-4]</sup>。



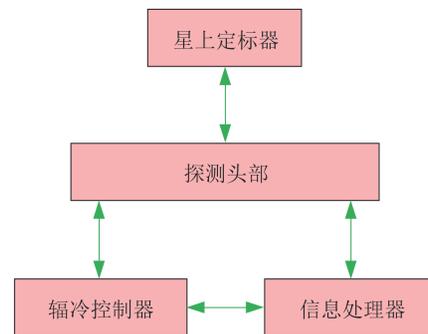
(a) 仪器现场

随着空间遥感产品的定量化应用要求的不断提高,空间传感器的高精度定标日益显现其重要性和必要性<sup>[5-7]</sup>。目前辐射定标阶段按照发射前<sup>[8-9]</sup>、在轨替代<sup>[10-12]</sup>和在轨星上定标<sup>[2,7,13]</sup>这3大类进行划分。实验室定标作为传感器定标中最易实现、定标精度最高的定标方式<sup>[4,14]</sup>,是空间传感器发射之前的一项重要工作,为传感器的在轨定标提供了初始的参考<sup>[8-9]</sup>,为空间传感器在轨数据反演提供了重要参数。利用其实验室条件模拟仪器在轨工作环境,具有严格的质量体系保证定标过程控制,并使其可溯源至国际单位标准量值<sup>[15]</sup>。

本文主要介绍宽幅成像光谱仪卫星发射前的实验室辐射定标技术,分别介绍可见、近红外、短波红外和中长波红外5个谱段的定标技术。

## 1 系统组成和工作原理

宽幅成像光谱仪由探测头部、信息处理器、辐冷控制器和星上定标器4台单机组成,如图1所示,详细组成部分为:光机扫描系统、主光学系统、后光学系统、可见光/近红外焦平面探测器组件、短波红外焦平面探测器组件,中/长波红外焦平面探测器组件、辐冷制冷器、制冷器控制电路、前置放大器、电子学信息处理系统、星上定标系统等。其中,探测头部作为系统的主要部分,集成了遥感信息获取、定标数据获取、信息流控制、辐射制冷、数据输出等功能,星上定标器包括以太阳为辐射源的可见光/近红外星上定标器和经地面标定的参考黑体。



(b) 仪器系统组成

图1 宽幅成像光谱仪系统

Fig.1 Wide-field imaging spectrometer system

宽幅成像光谱仪采用45°扫描镜+消像旋系统<sup>[16]</sup>的光机扫描形式,多元探测器并扫获取宽视场下的地物目标信息。以分色片及滤光片/探测器组

合方式获得光谱通道,用大制冷量辐射制冷器冷却红外探测器,探测器把经光机扫描接收的并经分光地球辐射光信号转换为电信号,经电路放大、A/D

转换后形成数字量,经发射前确定或地面校正注入的校正系数对该数字量进行均匀性校正,然后存入地球信息存储器。整个系统探测波段分成可见光、近红外、短波红外、中/长波红外、长波红外共 5 个光谱谱段,分别由 5 个子光路完成光学成像,并通过硅面阵、光伏碲镉汞线阵和光导碲镉汞线阵探测器进行光电转换后经信号放大处理后输出。

借助于卫星绕地球运行,仪器扫描镜以固定的瞬时视场、在飞行轨迹方向进行扫描,获取地球的二维影像,扫描镜旋转一周可依次扫描星下点地球、可见光定标、星上黑体及冷空间信号(图 2),系统以全孔径、全视场方式进行星上可见光/近红外通道的实时定标,成像光谱仪不仅能获得 21 个探测通道的均匀地球图像,而且能够定量获得各个通道飞行中辐射数据,宽幅成像光谱仪主要技术指标见表 1

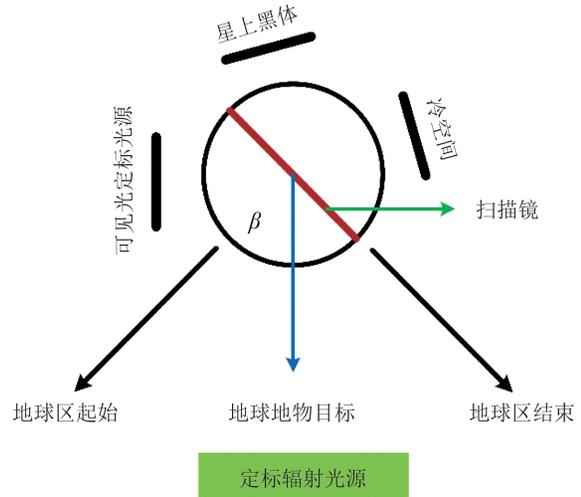


图 2 宽幅成像光谱仪仪器扫描顺序

Fig.2 Schematic diagram of the scanning sequence of the wide-field imaging spectrometer.

表 1 宽幅成像光谱仪主要技术指标

Tab.1 Main technical parameters of the wide-field imaging spectrometer

通道号	中心波长/ $\mu\text{m}$	带宽/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/m	信噪比@太阳反照率/ 灵敏度@典型温度	定标精度
1	0.415	0.02	600	>500 @ 30%	绝对定标精度<5% 相对定标精度<2%
2	0.443	0.02	600	>500 @ 30%	
3	0.470	0.05	150	>100 @ 30%	
4	0.490	0.02	600	>500 @ 30%	
5	0.555	0.05	150	>100 @ 30%	
6	0.659	0.05	150	>100 @ 30%	
7	0.681	0.02	600	>500 @ 30%	
8	0.753	0.02	600	>500 @ 30%	
9	0.800	0.30	75	>100 @ 30%	
10	0.865	0.02	600	>200 @ 30%	
11	0.936	0.01	600	>57 @ 30%	
12	0.940	0.05	600	>250 @ 30%	
13	1.375	0.03	600	>150 @ 30%	
14	1.640	0.05	600	>200 @ 30%	
15	2.130	0.05	600	>110 @ 30%	
16	3.800(L)	0.18	600	<0.5 K@300 K	
17	3.800(H)	0.18	600	<0.5 K@300 K	
18	7.325	0.30	600	<0.6 K@270 K	
19	8.550	0.30	600	<0.5 K@270 K	
20	10.800	1.00	300	<0.3 K@ 300 K	
21	12.000	1.00	300	<0.3 K@300 K	

注:3.8  $\mu\text{m}$  通道中的 H 为高增益通道;L 为低增益通道。

## 2 发射前遥感载荷定标技术

在卫星发射任务前,需要在地面完成空间遥感器光谱定标和辐射定标试验,其中辐射定标包括积

分球辐射定标和真空红外辐射定标试验,测试正样产品的性能和为在轨运行提供仪器标定系数。本文针对大气环境监测卫星携带的光学遥感载荷-宽

幅成像光谱仪的发射前定标技术进行介绍。

## 2.1 遥感载荷光谱定标技术

实验室光谱定标的任务是确定各探测通道所有像元的光谱响应函数,利用高精度的单色仪对空间遥感光谱仪进行波长定标<sup>[17]</sup>。光谱定标实验装置主要由连续光谱光源、光源电源(输出功率可

调)、单色仪及计算机构成,单色仪由光源与照明系统、分光系统和接收系统 3 部分构成,卤钨灯(350~2 500 nm)、硅碳棒光源(1~20 μm)等光源,配合可调功率的稳压稳流电源,控制光源输出的光功率,为太阳反射谱段和红外谱段光谱定标测试提供稳定、平滑、连续宽谱段的光谱曲线,如图 3 所示。

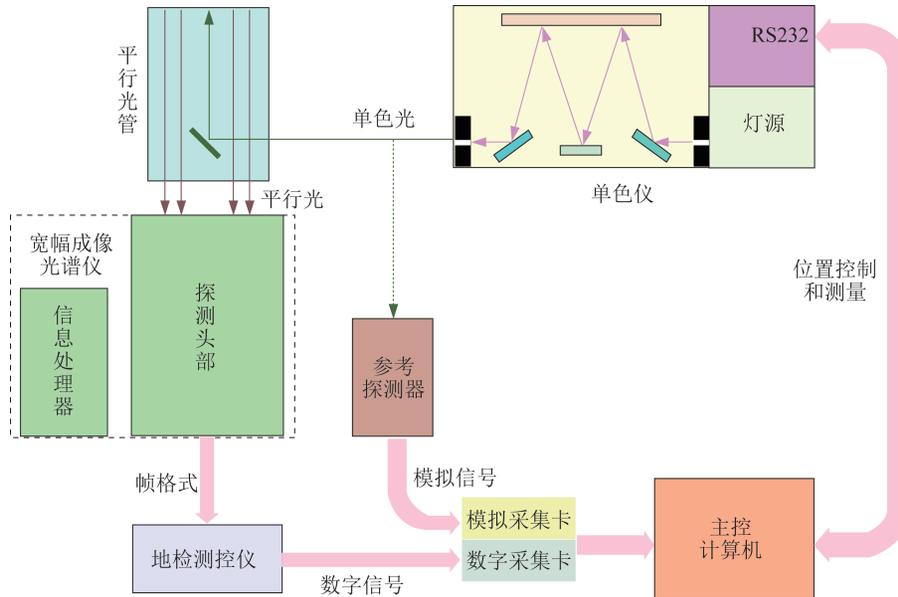


图 3 光谱定标原理

Fig.3 Schematic diagram of spectral calibration

稳压光源经聚光系统聚焦后照明单色仪入射狭缝,经过准直镜准直成平行光束,平行光束作为入射光照射到闪耀光栅上,形成多级衍射色散光,经过会聚反射镜,聚焦到平面反射镜,光线经狭缝出射。单色仪通过改变光栅入射角,实现光栅的分光,由出射狭缝射出特征单色光进入平行光管,平行光管将出射狭缝处的单色光转化成平行光束,准直光束经遥感载荷光学系统成像到探测器上,得到各通道在该单色波长处的响应值,基于单色仪位置控制和测量系统,可以实现单色仪的自动波长扫描功能<sup>[17-18]</sup>。利用宽幅成像光谱仪地检系统实现各通道等波长间隔的自动波长扫描,将需要的单色光输出至成像光谱仪,完成各通道的光谱定标测试。

在单色仪光谱定标前,利用参考探测器对单色仪输出的单色光进行相对辐射标定,用于校正光谱定标中单色仪输出的光谱辐射不一致性,并利用高分辨率光谱仪及谱线灯对单色仪光谱输出的单色光进行波长位置标定,通过以上测试保证光谱定标

的准确性。

通过单色仪波长扫描可以获取通道单像元的光谱响应数据,通过暗背景扣除,粗大误差剔除,单色仪辐射光谱订正,数据归一化、数据平滑等处理过程,用以获取通道单像元的光谱响应函数。

## 2.2 遥感载荷辐射定标技术

### 1) 太阳反射谱段辐射定标技术

宽幅成像光谱仪采用基于光源标准的实验室辐射定标方法<sup>[14]</sup>,该方法采用中国计量科学研究所的光谱辐射照度灯和漫反射板作为初级标准,使用标准光谱仪测量标准灯<sup>[19]</sup>-漫反射板定标系统和定标用积分球的输出,建立辐射源辐射亮度标准。其中,积分球光源辐射量值是指积分球出光口的辐射亮度,对其检测是采用光谱辐射亮度响应度已知的标准光谱仪直接测量获得。

在辐射定标实验中,如图 4 所示,以积分球模拟目标,宽幅成像光谱仪扫描镜沿着积分球出口面法

线方向观测来自积分球的漫反射辐射,通过控制积分球辐射源的输出辐亮度,打开积分球内部的全部灯源。通过逐渐减少灯数或调节阑开口大小,获取仪器各通道对应不同能级的信号输出。根据仪器太阳反射波段光谱响应函数和积分球输出辐亮度光谱分布,可以计算各个通道不同积分球输入辐亮度,具体计算为

$$L_s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

式中: $L_s$ 为积分球入射通道辐亮度; $L(\lambda)$ 为积分球在波长 $\lambda$ 处输出光谱辐射亮度; $R(\lambda)$ 为仪器的相对光谱响应度; $[\lambda_1, \lambda_2]$ 为通道的光谱响应范围。

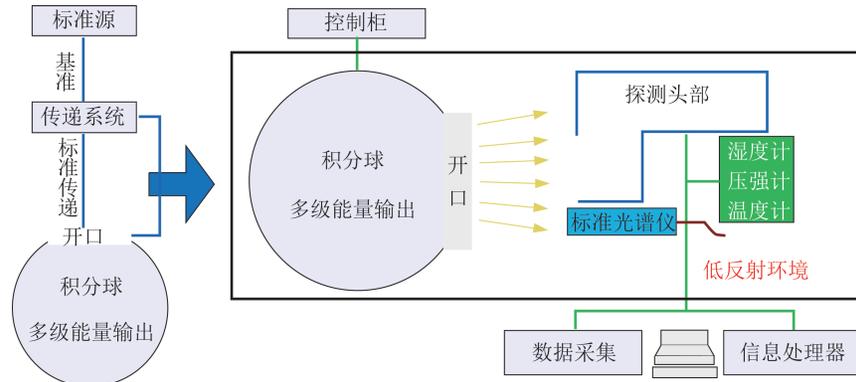


图 4 积分球辐射定标方案

Fig.4 Scheme of integrating sphere radiative calibration

定标采用线性方式拟合各探测像元输出数字量与对应入瞳处的等效辐亮度的函数关系,确定各通道、像元的定标系数,具体表示为

$$L_s = mC + b \quad (2)$$

式中: $C$ 为通道像元输出信号计数值; $m$ 、 $b$ 为定标系数。

调整积分球输出辐亮度,测得相应通道典型辐照值下的通道信号值和噪声值,以计算各通道信噪比。在实验室积分球定标试验前,完成对仪器动态范围的调试,在获得各个通道像元定标系数的基础上,计算各通道各像元的动态范围。

2) 红外热发射谱段定标技术

辐射定标是确定仪器的响应率和系统偏差的过程,通过定标建立仪器响应与标准黑体辐射量之间的关系。成像光谱仪的红外探测器采用辐射制冷器冷却,红外辐射定标和性能测试在F3H真空设备<sup>[20]</sup>中进行。其具有液氮和液氦环境,建立有深冷黑体和冷屏。在真空红外辐射定标时,如图5所示,仪器通过扫描镜依次接收冷空间、面源黑体以及星上黑体的辐射,光学接收孔径对准面源黑体,探测头部进行恒温控制,利用深冷黑体(液氮热沉)作为模拟冷空间的辐射基准,即空间零辐射基准,高发射率面源黑体为空间辐射基准。

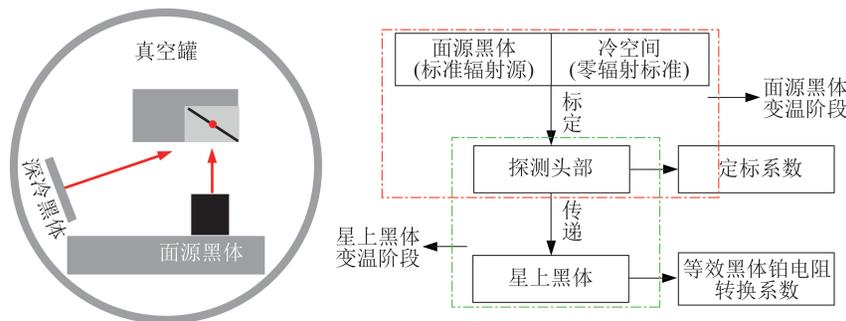


图 5 仪器真空红外定标方法原理

Fig.5 Schematic diagram of the vacuum infrared calibration method with the scanning radiometer

在面源黑体变温阶段,成像光谱仪头部温度、辐冷温度及星上黑体温度分别控制在相对恒定的

工作点上,通过改变面源黑体温度得到对应的系统输出信号码值,面源黑体选取的目标温度点可按照

等能量间隔进行恒温控制,覆盖各通道的动态范围,在典型亮温附近进行加密,通过面源黑体的完整升降温往复变温试验确定各通道的辐射定标系数,建立系统输出信号值与黑体入射辐射量的函数关系。

根据普朗克公式、通道光谱响应函数及面源黑体发射率计算不同物理温度  $T$  处的通道辐亮度  $N(T)$ ,利用不同温度的通道码值  $C(T)$  以及通道辐射能量  $N(T)$  计算线性能量  $N_{\text{lin}}(T)$  及非线性能量  $N_{\text{non}}(T)$ :

$$\begin{aligned} N_{\text{lin}}(T) &= a_0 + a_1 C(T) \\ N_{\text{non}}(T) &= N(T) - N_{\text{lin}}(T) \\ N_{\text{non}}(T) &= \sum_{i=0}^{i=m} b_i (N_{\text{lin}}(T))^i \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_1$  为由面源变温获取线性响应系数,通道总能量和线性能量用于获得非线性能量,进而计算系统非线性响应系数  $b_i$ 。

根据上述得到的探测器辐射线性响应系数与深冷空间信号码值  $C_{\text{冷空}}$  计算深冷空能量  $N_{\text{冷空}}$ :

$$N_{\text{冷空}} = a_0 + a_1 \times C_{\text{冷空}} \quad (4)$$

在星上黑体变温阶段,对探测头部、辐射制冷器及面源黑体分别进行控温,打开星上黑体独立温控系统对星上黑体进行加热控温,待整个黑体达到恒温,进行各组数据的采集工作。其星上黑体变温范围涵盖了成像光谱仪在轨工作环境的可能范围,通过改变星上黑体温度得到对应的系统输出信号码值和测温传感器输出的铂电阻码值  $C^{\text{prt}}$ ,利用已获取的辐射定标系数和星上定标黑体信号可以计算星上定标黑体的等效黑体温度  $T_j^{\text{等效}}$ ,建立测温铂电阻码值与星上黑体等效黑体温度之间的函数关系,通过探测头部把面源黑体辐射标准引渡到星上黑体上:

$$T_j^{\text{等效}} = \sum_{i=0}^{i=n} (C_j^{\text{prt}})^i d_i \quad (5)$$

最终供用户在仪器发射入轨工作后,在轨采用两点方式进行星上辐射定标<sup>[21]</sup>。通过全口径、视场的星上黑体提供高端辐射<sup>[15,22]</sup>,冷端辐射使用 4 K 冷空间,根据铂电阻测温码值对应信号数码值而重新给出星上黑体等效黑体温度。在此过程中,发射前地面需提供星上黑体的铂电阻转换系数或星上黑体发射率、深冷空能量以及非线性系数<sup>[1,23]</sup>,实现飞行中辐射实时校准。

### 3 定标精度分析

#### 3.1 相对定标精度

相对辐射定标精度的主要来源有参考辐射源均匀性、响应稳定性、数据处理误差、定标环境杂散辐射等因素综合影响的相对辐射定标数据处理过程等。采用统计分析方法进行评定,相对辐射定标即校正各探测器各通道、探元间输出响应不一致性的过程,相对定标系数算法应根据光学遥感对输入辐射响应的特点确定,基于多辐射能级的定标数据,建立其他探元  $i_0$  与基准探元  $i$  的不同能级 ( $j$ ) 的线性响应关系,随着入射辐射能量的改变,建立起每个探元与通道基准探元之间辐射线性响应变化,获得通道不一致性校正系数。因此,各通道相对辐射定标可按式进行:

$$C_{i_0,j} = a_i C_{i,j} + b_i^0 \quad (6)$$

式中:  $C$  为信号码值;  $i_0$  为通道基准像元;  $j$  为辐射能级。

光学遥感器第  $i$  个像元,第  $j$  能级相对校正后的信号值  $C_{i,j}^{\text{校正}}$  为

$$C_{i,j}^{\text{校正}} = a_i C_{i,j} + b_i^0 \quad (7)$$

相对定标精度即经过非均匀性校正后,  $C_{i,j}^{\text{校正}}$  像元间的一致性情况,针对每个通道所有像元,相对定标精度定义为

$$\text{相对定标精度}_j = \frac{\text{标准差}(C_{i,j}^{\text{校正}})}{\text{平均值}(C_{i,j}^{\text{校正}}) - \text{暗电流值}} \quad (8)$$

以通道的基准探元为基准,建立其他像元响应码值与基准探元码值之间的线性响应关系,获取非均匀校正系数,校正各通道探元不一致性。采用相对定标精度评价公式,在通道的所有探元非均匀校正后,计算该通道的探元一致性,即该通道的相对定标精度。经计算,各通道相对定标精度小于 1.0%,精度满足 2.0% 的指标要求。

#### 3.2 绝对定标精度

##### 1) 太阳反射谱段

对于可见、近红外和短波红外波段,仪器通过实验室积分球光源进行辐射定标试验,为了满足定标能级高低端数量及接近 1 个太阳常数动态范围覆盖的需求,根据积分球类型、灯数和光阑等特点设计可见近红外波段和短波红外波段实验室辐射定标方案。其中,宽幅成像光谱仪短波红外通道采用

辐射制冷器对探测器进行冷却,因此地面系统辐射定标试验需利用真空低温设备对辐射制冷器进行降温到工作温度后,使用积分球照射仪器的光学入瞳进行定标。

积分球辐射定标采用的标准光谱仪通过中国计量院灯-板定标系统进行辐射溯源和计量,可见近红外波段和短波红外波段标准光谱仪的标定误差  $\delta_1$ ,根据标准灯辐射测量误差、漫反板半球反射率及余弦特性等因素计算。标准光谱仪和宽幅成像光谱仪存在传递区域差异性  $\delta_2$ 。宽幅成像光谱仪采用同轴卡式望远镜结构,从积分球出射的辐射入射到仪器的视场外时,会被反射回积分球内,从而引起积分球输出辐射亮度变化,引入扫描镜反射辐射误差  $\delta_3$ 。考虑实际定标中扫描镜接收面的等效辐射及定标方向性,包括积分球角度不均匀性  $\delta_4$ 、面不均匀性  $\delta_5$  及辐射不稳定性  $\delta_6$ ,根据积分球的测试结果,进行能量折算和定标误差估计。由于真空罐窗口两

面工作的不同温度,其透过率可能存在一定的偏差,按常温测试结果计算真空罐窗口透过率误差  $\delta_7$ 。由单色仪系统光谱定标的测量误差,评估整机光谱响应曲线标定误差  $\delta_8$  对积分球辐射定标的影响。由获得的定标系数可以反演得到各能级对应辐亮度,与实际辐亮度之间的相对偏差计算可得各个通道像元的拟合误差  $\delta_9$ 。在辐射定标过程中,根据水汽路径差异性,计算水汽引入的误差  $\delta_{10}$ ,见表 2。对于上述不确定数据项都表征了一个可正、可负的偶然误差性质。计算可得,可见近红外定标精度为 3.2%,短波红外定标精度为 4.6%,满足任务指标要求。最终的误差计算公式为

$$\delta_{\text{可见/近红外}} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_8^2 + \delta_9^2 + \delta_{10}^2} \quad (9)$$

$$\delta_{\text{短波红外}} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2 + \delta_8^2 + \delta_9^2 + \delta_{10}^2} \quad (10)$$

表 2 太阳反射谱段定标不确定度表

Tab.2 Calibration uncertainty table in the solar reflection spectrum

不确定度因素	可见光/近红外/ $\mu\text{m}$		短波红外/ $\mu\text{m}$	
	0.412~0.865	0.936,0.940	1.38	1.60,2.13
传递辐射计的标定误差 $\delta_1$	2.2%		2.8%	
传递区域差异性 $\delta_2$	0.6%		0.6%	
扫描镜反射杂散光 $\delta_3$	0.2%		0.2%	
积分球角度不均匀性 $\delta_4$	忽略不计(近相同角度)		忽略不计(近相同角度)	
积分球面不均匀性 $\delta_5$	0.2%		0.2%	
积分球不稳定性 $\delta_6$	0.2%		0.2%	
真空罐窗口透过率影响 $\delta_7$	无		2.0%	
光谱标定误差 $\delta_8$	2.0%		2.0%	
数据拟合误差 $\delta_9$	1.0%		2.0%	
水汽引入误差 $\delta_{10}$	无	0.5%	1.0%	无
总不确定度 $\delta$	3.2%		4.6%	

定标误差来源主要包括传递辐射计的标定误差,真空罐窗口透过率的影响,光谱标定误差以及数据拟合误差。

## 2) 红外热发射谱段

红外探测系统每次扫描都需要进行冷空嵌位,在真空红外定标过程中,红外探测系统获取的能量  $N(T)$  可以表示为

$$N(T) = N_0(T) - N_0^{\text{冷空}}(T_0) \quad (11)$$

式中:  $N_0(T)$  为面源黑体温度  $T$  时的目标辐亮度;  $N_0^{\text{冷空}}(T_0)$  为冷空间温度  $T_0$  时的目标辐亮度。

$$N_0(T) = \epsilon_{\text{BCS}} N^{\text{黑体}}(T) + (1 - \epsilon_{\text{BCS}}) N^{\text{系统}}(T_1) \quad (12)$$

$$N_0^{\text{冷空}}(T_0) = \epsilon_{\text{SV}} N^{\text{冷空}}(T_0) + (1 - \epsilon_{\text{SV}}) N^{\text{系统}}(T_1) \quad (13)$$

式中:  $\epsilon_{\text{BCS}}$  为面源黑体的发射率;  $\epsilon_{\text{SV}}$  为深冷黑体的发射率;  $N^{\text{系统}}(T_1)$  为仪器扫描镜温度  $T_1$  对应的发射能量。

因此,面源黑体定标时,红外探测系统获取的能量  $N(T)$  可以表示为

$$N(T) = \epsilon_{\text{BCS}} N^{\text{黑体}}(T) + (1 - \epsilon_{\text{BCS}}) N^{\text{系统}}(T_1) - \epsilon_{\text{SV}} N^{\text{冷空}}(T_0) - (1 - \epsilon_{\text{SV}}) N^{\text{系统}}(T_1) \quad (14)$$

在红外辐射定标前对作为目标的面源黑体进行复检与复测,基于面源黑体的发射率标定误

差<sup>[24-25]</sup>,面源黑体正对的探测头部扫描镜,按照 18 °C 温度计算发射能量,扫描镜的反射率按照 0.5% 计算,计算典型辐射目标处的面源黑体发射率标定误差  $\delta_1$  和面源黑体反射辐射  $\delta_2$ 。红外定标时深冷黑体采用液氮热沉,深冷黑体按照 100 K 计算能量,其热沉反射率测量误差为 0.2%。探测头部反射镜温度为 18 °C,扫描镜的反射率为 0.5%,冷空间温度测量不确定度为 0.5 K,计算观测目标在典型辐射目标处的冷空相关误差大小 ( $\delta_3, \delta_4, \delta_5$ )。根据普朗克公式计算,深冷黑体温度 100 K 与真实冷空温度 4 K 之间辐射偏差  $\delta_6$ ,其差异可以不予考虑。真空定标试验过程中,探测器温度稳

定性为 0.1 K,由此引起的响应度误差小于 0.3%,计算典型目标处探测器引入的误差  $\delta_7$ 。从红外通道在轨二点定标法分析,其定标误差主要来源于定标辐射源和系统非线性等因素,根据真空红外定标的定标曲线计算系统非线性误差  $\delta_8$  和铂电阻系数拟合误差  $\delta_9$ 。根据定标公式,基于不同红外通道能量和温度之间的函数关系,对各个误差源引入的不确定度进行分析,其总的红外辐射定标不确定度的计算公式为

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2 + \delta_8^2 + \delta_9^2} \quad (15)$$

各个红外通道获取的定标不确定度见表 3。

表 3 真空红外定标不确定度表

Tab.3 Vacuum infrared calibration uncertainty Table

通道/ $\mu\text{m}$	3.8 (L)	3.8 (H)	7.2	8.55	10.8	12.0
考核点/K	300	300	270	270	300	300
面源黑体发射率测量 $\delta_1$	$1.00 \times 10^{-1}$	$6.00 \times 10^{-2}$	$8.00 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-1}$	$1.60 \times 10^{-1}$
面源黑体反射辐射 $\delta_2$	$1.70 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$9.50 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^{-3}$	$5.80 \times 10^{-4}$	$6.50 \times 10^{-4}$
冷空发射率测量 $\delta_3$	$5.10 \times 10^{-12}$	$3.10 \times 10^{-12}$	$2.50 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-4}$	$5.00 \times 10^{-4}$
冷空反射辐射 $\delta_4$	$1.00 \times 10^{-2}$	$1.10 \times 10^{-2}$	$3.80 \times 10^{-2}$	$4.10 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-2}$	$3.90 \times 10^{-2}$
冷空温度测量 $\delta_5$	$5.30 \times 10^{-11}$	$3.20 \times 10^{-11}$	$1.30 \times 10^{-5}$	$9.40 \times 10^{-5}$	$6.00 \times 10^{-4}$	$1.50 \times 10^{-3}$
冷空温度真实性 $\delta_6$	$2.60 \times 10^{-10}$	$2.60 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$9.20 \times 10^{-3}$	$2.46 \times 10^{-2}$
探测器波动 $\delta_7$	$7.00 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$	$1.10 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{-1}$	$2.00 \times 10^{-1}$	$2.20 \times 10^{-1}$
非线性误差 $\delta_8$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$2.40 \times 10^{-1}$	$2.40 \times 10^{-1}$	$2.90 \times 10^{-1}$
铂电阻拟合误差 $\delta_9$	$1.20 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$1.52 \times 10^{-1}$	$1.60 \times 10^{-1}$
不确定度 $\delta$ /K	$1.60 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{-1}$	$1.70 \times 10^{-1}$	$2.90 \times 10^{-1}$	$3.80 \times 10^{-1}$	$4.30 \times 10^{-1}$

通过以上取值可以计算出红外辐射定标的总不确定度  $\delta=0.43$  K,在真空红外定标阶段,从整个辐射定标过程涉及的因素链来看,影响红外辐射定标主要误差来源于黑体发射率误差、探测器波动、非线性误差、铂电阻拟合误差等因素。

## 4 结束语

空间对地遥感器的精确定标是其遥感数据高质量应用的基本前提,宽幅成像光谱仪是大气环境监测卫星主要载荷之一。本文介绍了 DQ-1 宽幅成像光谱仪发射前全光路、口径光谱定标和辐射定标技术,包括可见短波谱段积分球定标技术和中长波谱段热真空黑体定标技术,分别评估其辐射定标过程中的误差源引入的不确定度。经分析得知,宽幅成像光谱仪可见短波谱段定标精度优于 5%,中长波红外谱段定标精度优于 0.5 K,所有通道相对定标

精度优于 2%。为仪器发射前定标试验提供了精确的辐射定标系数,为大气、环境、气象等用户的定量化应用提供了技术保障。

## 参考文献

- [1] OUDRARI H, MCINTIRE J, XIONG X, et al. Prelaunch radiometric characterization and Calibration of the S-NPP VIIRS sensor [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 54(4): 2195-2210.
- [2] XIONG X, BUTLER J, CHIANG K, et al. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(9): 5065-5078.
- [3] SUN J, WANG M. VIIRS reflective solar bands on-orbit calibration five-year update: extension and improvements [C]// proceedings of the SPIE Optical Engineering + Applications, 2016.
- [4] SCHWARTING T, MCINTIRE J, OUDRARI H,

- et al. Pre-Launch radiometric Calibration of the S-NPP and JPSS-1 VIIRS Day/Night Bands [C]//Conference on Characterization and Radiometric Calibration for Remote Sensing, Logan (UT):CALCON, 2016:1-22.
- [5] CAO C. Improved NOAA-20 Visible Infrared imaging radiometer suite day/night band image quality by upgraded gain Calibration [J]. Remote Sensing, 2021, 13(13):2509.
- [6] 张钊, 屈炜, 万志. 紫外-短波红外航天遥感探测器光电性能测试装置的研制和标定[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(5):53-59.
- [7] XIONG X, ANGAL A, BUTLER J, et al. Global space-based inter-calibration system reflective solar calibration reference: from Aqua MODIS to S-NPP VIIRS [C]//proceedings of the SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, 2016.
- [8] 王浩, 晋利兵, 李岩, 等. 基于温度修正的GF-5全谱段光谱成像仪热红外谱段辐射定标[J]. 红外技术, 2020, 42(6):547-551.
- [9] 赵艳华, 李岩, 晋利兵, 等. 全谱段光谱成像仪高精度辐射定标技术[J]. 上海航天, 2019(S2):106-111.
- [10] CHANDER G, HEWISON T J, FOX N, et al. Overview of intercalibration of satellite instruments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3):1056-1080.
- [11] 杨天杭, 胡秀清, 徐寒列, 等. 基于交叉比对的风云三号D星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估[J]. 光学学报, 2019, 39(11):377-387.
- [12] LIU M, MERCHANT C, GUAN L, et al. Inter-Calibration of HY-1B/COCTS thermal infrared channels with MetOp-A/IASI [J]. Remote Sensing, 2018, 10(8):1173.
- [13] XIONG X, ANGAL A, WU A, et al. Sixteen years of Terra MODIS on-orbit operation, calibration, and performance [C]// proceedings of the SPIE Remote Sensing, 2016.
- [14] BUTLER J J, XIONG X, GU X, et al. Precise prelaunch radiometric calibration of VIIRS [C]// Earth Observing Systems XX. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [15] PEARLMAN A, MONTANARO M, EFREMOVA B, et al. Preluance radiometric calibration and uncertainty analysis of landsat thermal infrared sensor 2 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020(99):1-12.
- [16] 郑列华, 尹达一, 冯鑫. K镜消像旋机构在海洋卫星水色仪中的应用[J]. 红外技术, 2007(1):17-21.
- [17] 谢臣瑜, 翟文超, 李健军, 等. 超连续激光单色仪系统级光谱响应度定标比对验证[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2):145-152.
- [18] 曹海霞, 吴娜, 冯树龙, 等. 单色仪与成像光谱仪的交互光谱定标[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10):2585-2581.
- [19] 代彩红, 王彦飞, 吴志峰, 等. 光谱辐射亮度国际比对与结果分析[J]. 计量学报, 2020, 41(2):147-152.
- [20] 景加荣. F3H红外定标试验用空间环模设备[J]. 航天器环境工程, 2008(4):77-80, 7.
- [21] 赵其昌, 顾亦磊, 郭玲玲, 等. FY-3C中分辨率光谱成像仪在轨红外辐射定标分析[C]//红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 苏州:2019.
- [22] MARKHAM B, MCCORKELE J, MONTANARO M, et al. Landsat 9: Mission status and prelaunch instrument performance characterization and calibration [C]// proceedings of the IGARSS 2019—2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2019.
- [23] CHANG T, XIONG X. Assessment of MODIS thermal emissive band on-orbit calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(6):2415-2425.
- [24] 徐骏, 孟炳寰, 翟文超, 等. 基于热红外标准辐亮度计的常温黑体定标技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3):716-721.
- [25] 宋健, 郝小鹏, 原遵东, 等. 基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9):277-283.