

文章编号 1004-924X(2013)03-0567-08

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的 实验室定标

赵敏杰, 司福祺*, 江宇, 周海金, 汪世美, 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要:采用四通道凸面光栅成像光谱仪设计了星载大气痕量气体差分吸收光谱仪,该光谱仪用天底推扫方式探测地球地表或天空散射光信号,基于痕量气体对不同谱段光信息的“指纹”吸收和差分吸收光谱算法定量获取大气痕量气体分布。针对该光谱仪的大视场、宽谱段、高分辨率(光谱、空间)等特点,提出了相应的光谱定标和辐射定标方法,建立了定标系统,实现了对载荷的光谱定标和辐射定标,并对其定标的不确定度进行了分析。结果表明,载荷光谱定标不确定度为0.027 nm,辐射定标不确定度为2.96%,满足给定的技术指标要求,为载荷的定量反演提供了保证。

关键词:星载光谱仪;差分吸收光谱仪;痕量气体;光谱定标;辐射定标;定标不确定度

中图分类号:O433.1;TP732 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0567

In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer

ZHAO Min-jie, SI Fu-qi*, JIANG Yu, ZHOU Hai-jin, WANG Shi-mei, LIU Wen-qing

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

Abstract: A space-borne differential optical absorption spectrometer was designed on the basis of a four channel Offer imaging spectrometer with a convex grating. It could acquire high accuracy radiation scattered by earth surfaces or air in a nadir push-broom mode, and could quantitatively obtain the trace gas distribution based on the “fingerprint” absorption of the trace gas at different spectral information and the differential optical absorption spectrum algorithm. According to the characteristics of large field, wide wavelength range, high spatial and spectral resolution of the spectrometer, the corresponding methods of spectral calibration and radiometric calibration were presented, and a calibration system was built. Then the spectral and radiometric calibrations of the spectrometer were realized, and the calibration uncertainty was analyzed. Experimental results show that spectral calibration uncertainty of the instrument is 0.027 nm and the radiation uncertainty is 2.96%. The calibration accuracy meets the given requirements and can provide a foundation for quantitatively inversion of the instrument.

收稿日期:2012-11-27;修订日期:2012-12-09.

基金项目:公益性行业(气象)科研专项经费资助项目(No. GYHY201106045-1)

Key words: space-borne spectrometer; differential optical absorption spectrometer; trace gas; spectral calibration; radiometric calibration; calibration uncertainty

1 引言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新型光学遥感仪器,它是光谱技术和成像技术相结合的产物。经过 30 年的飞速发展,成像光谱仪的探测波段范围不断拓宽、成像能力显著增强、探测灵敏度大幅提高^[1],并广泛地应用于科学研究、航空航天、军事等领域。其中,光谱分辨率达到亚纳米量级的成像光谱仪可实现大气痕量气体的探测。如目前在轨运行的臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI)载荷^[2],其光谱分辨率为 0.42~0.63 nm。目前,我国尚未有类似的高分辨率成像光谱仪在轨运行,缺乏对大气痕量气体(如 NO₂、SO₂等)的监测能力,因此星载高分辨率成像光谱仪的研制势在必行。

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪具有优于 0.5 nm 的光谱分辨率,可实现大气痕量气体的探测,该仪器由中科院安徽光学精密机械研究所自主研制,计划于 2015 年升空运行。它通过探测地球大气或地表反射、散射的紫外/可见光,利用差分吸收光谱技术来反演大气中痕量气体的分布和变化,具有高分辨率、宽光谱范围、大视场角的特点。该载荷的光谱为 240~710 nm,视场为 114°×0.5°,光谱分辨率为 0.3~0.5 nm。光谱通道设计为 4 个:240~315 nm;311~403 nm;401~550 nm;545~710 nm。该载荷预计在太阳同步轨道进行天地观测和面阵推扫,穿轨方向的地面观测范围为 2 600 km,能够实现一日全球覆盖从而监测全球关键大气成份的分布。

定标是遥感载荷定量反演的前提,其精度直接影响着最终产品数据的精度。定标主要分为实验室定标和星上定标。实验室定标在地面对载荷完成定标以验证载荷的性能和可靠性,为载荷的数据处理提供支持。载荷在轨运行期间要进行星上定标以保证遥感数据的准确性,这是因为真空环境对其性能有较大的影响,仪器本身也会随着

时间的推移而老化^[3]。星载大气痕量气体差分吸收光谱仪采用两种星上定标方式:“灯+漫透射板”和“太阳+漫射板”。本文主要讨论了星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标,包括光谱定标和辐射定标。其中,要求光谱定标精度优于 0.05 nm,辐射定标不确定度小于 5%。

2 光谱定标

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪是一种推扫式成像光谱仪,能够同时记录被测对象的光谱信息和空间信息。在对地观测时,其面阵 CCD 探测器的一维记录地球大气辐射的光谱分布信息,记为光谱维;另一维记录空间分布信息,记为空间维;再由卫星向前的飞行带动载荷对地球大气推扫给出二维空间分布的另一维^[4],最终得到目标的成像数据立方。面阵 CCD 探测器的示意图见图 1。在实验室对载荷进行光谱定标,就是采用数理统计中的回归分析来找出光谱维 CCD 的像元序数和波长之间的函数关系表达式,得出定标方程^[5]。光谱定标可以得到相关的光谱性能指标:通过定标方程可以确定成像光谱仪的光谱范围,对特征峰进行高斯拟合可以确定光谱分辨率,亦可对其定标精度和不确定度等信息进行分析。

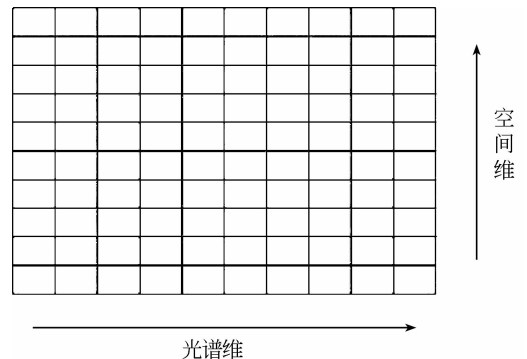


图 1 面阵 CCD 探测器示意图

Fig. 1 Plane CCD detector for imaging spectrometer

2.1 光谱定标装置及原理

由于星载大气痕量气体差分吸收光谱仪(载荷)具有视场角大、谱段范围宽、空间分辨率和光谱分辨率高等特点,为了保证载荷光谱定标的有效性和精度,本文建立了一套定标装置,如图2所示。星载大气痕量气体差分吸收光谱仪固定在数控二维转台上,狭缝与水平方向平行。光源、光阑、滤光片等仪器固定在二维转台的旋转臂上,此旋转臂能够平行于狭缝在水平面上转动,从而快速地完成载荷全视场、全波段的光谱定标。

常用的光谱定标方法包括单色仪法和标准谱线法^[6]。单色仪法是利用连续输出的单色准直光作为定标光源对仪器的光谱响应进行标定,该方法可同时实现宽光谱范围的中心波长和光谱分辨率的标定,具有定标精度高,实用性强的优点;标准谱线法一般采用汞灯、钠灯等作为标准灯,利用标准灯发射的特征谱线对仪器进行标定,这种方法易于实现、具有结构简单、易操作的优点,常用来实现光谱分辨率较高的线性色散仪器的波长标定。本实验利用标准谱线法进行载荷的光谱定标。鉴于载荷的光谱范围宽,实验采用汞氙灯作为标准灯,汞氙灯是 Ocean Optics 公司生产的 HG-1 型光谱定标源,波长为 253~922 nm。如图2所示,汞氙灯固定在旋转臂上,为保证定标精度及 CCD 响应能够获得较高的信噪比,定标时应调整好汞灯的位置及载荷的积分时间以使谱线强度适中。实验时,控制电机带动旋转臂旋转,以快速地完成光谱仪的全视场定标。

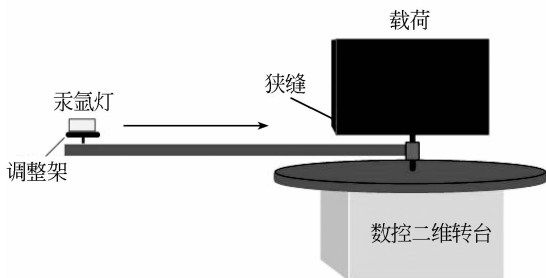


图2 载荷实验室定标平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental platform

面阵 CCD 的通道序号记为 X_{ij} , 其对应的中心波长值为 Y_{ij} , 其中下标 i 代表通道的行号(光谱维像元号), j 代表通道的列号(空间维像元号)。由于光谱在 CCD 上近似成线性排列, 通道

序号 X_{ij} 与其对应的中心波长 Y_{ij} 近似具有线性相关关系, 建立的定标方程模型如式(1)所示^[4]。定标时, 可利用寻峰法确定定标谱线中的一系列特征峰及其所在的通道序号, 记这一数据组为 (X_{ij}, Y_{ij}) , 利用最小二乘法对数据组进行分析即可确定出系数 a_i, b_i , 如式(2)所示。

$$Y_{ij} = a_i + b_i X_{ij}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} b_i = \frac{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_i)(Y_{ij} - \bar{Y}_i)}{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_i)^2} \\ a_i = \bar{Y}_i - b_i \bar{X}_i \end{cases} \quad (2)$$

2.2 光谱定标结果及定标不确定度

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪采用凸面光栅分光。由于其观测视场大, 狭缝的光谱图像与理想的图像有一定偏离, 即产生光谱弯曲现象; 又由于边缘视场的影响, 因此在载荷定标时需要标定全视场每个像元的工作中心波长, 并确定波长随空间维和光谱维分布的矩阵表^[6-7]。

按上述定标原理对载荷每个通道的某行 CCD 进行光谱定标, 利用寻峰法确定特征峰及其所对应的通道序号 (X_{ij}, Y_{ij}) , 并对数据组 (X_{ij}, Y_{ij}) 进行线性回归分析, 确定的线性拟合方程结果如表1所示。

表1 载荷各通道光谱定标方程

Tab. 1 Equation of spectral calibration of each channel

通道	定标方程
紫外 1	$y = 243.832 + 0.076x$
紫外 2	$y = 314.397 + 0.093x$
可见 1	$y = 396.869 + 0.122x$
可见 2	$y = 536.514 + 0.139x$

为检测光谱定标的精度, 本文对其不确定度进行了分析。上述定标过程的不确定度主要包括: 定标光源的不稳定度、寻峰不确定度和回归分析不确定度。分析如下:

(1) 定标光源的不稳定度: 定标光源采用汞氙灯, 其不确定度较小, 但受所给谱线值有效位的限制, 不确定度取为 0.01 nm。

(2) 寻峰不确定度: 主要由 Gauss 拟合误差

以及温度等因素造成的仪器光谱漂移引起,其值优于 0.1 个像元。

(3) 回归分析不确定度: 主要由最小二乘法回归分析引起, 由回归直线与标准值之差决定, 可采用残差标准差来计算。

各通道的不确定度如表 2 所示, 表中各不确定度的来源相互独立, 合成不确定度为各不确定度平方和的开方。由表可知, 合成不确定度的最大值为 0.027 nm, 满足光谱定标精度小于 0.05 nm 的技术指标。

表 2 各通道光谱定标不确定度分析结果

Tab. 2 Uncertainties of spectral calibration of each channel at central field (nm)

通道	定标灯谱线 不确定度	寻峰不 确定度	回归分析 不确定度	合成不 确定度
紫外 1	0.01	0.008	0.024	0.027
紫外 2	0.01	0.009	0.023	0.026
可见 1	0.01	0.012	0.020	0.025
可见 2	0.01	0.014	0.018	0.025

2.3 光谱定标结果验证

为验证光谱定标结果, 用星载大气痕量气体差分吸收光谱仪测量了 PtCrNe 空心阴极灯的特征谱线。PtCrNe 空心阴极灯是在贺利氏特种光源公司定制, 由 Newport 公司生产的 6035 型低压氙灯。分析空心阴极灯的特征谱线值和仪器按上述定标方法得出的定标波长值, 取两者之差可得出验证结果。以可见 1 通道为例, 验证结果如表 3 所示。偏差的最大值为 0.029 nm, 这表明利用标准谱线法进行的定标结果偏差较小、定标精度较高, 满足偏差小于 0.05 nm 的定标要求。

表 3 可见 1 通道光谱定标结果验证

Tab. 3 Calculation results of spectra of visible channel 1 (nm)

空心阴极灯特征谱值	仪器定标波长值	偏差绝对值
428.972	429.001	0.029
435.962	435.939	0.023
540.978	540.974	0.004

3 辐射定标

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪在轨运行测量的实际值为大气、地面等目标的辐射值, 而探测器 CCD 的输出值为灰度值(即 DN 值)。为了从光谱仪测量数据中定量获取各种地物目标的辐射信息并反推出地物目标的辐射特性, 从而对卫星遥感图像进行正确判读和有效利用, 需要对仪器进行辐射定标^[8]。目前, 在实验室常用的定标方法有漫反射板法和积分球法。漫反射板法用辐照度已知的标准灯照射标准反射白板, 在白板处形成近似的朗伯光源, 用此光源的辐亮度作为标准辐亮度对仪器进行定标。积分球法能够提供高稳定性、高均匀性、大口径的定标源, 以积分球辐亮度作为定标标准对仪器进行辐亮度定标已广泛应用于需要使用面光源的领域。

3.1 辐射定标原理和装置

根据光度学定义, 一发光平面在某一方向的辐亮度 L 的数学表达式为:

$$L = d^2\varphi/dSd\Omega\cos\theta. \quad (3)$$

对于成像光谱仪, 光辐射经过光栅分光后到达 CCD 探测器上的辐亮度 $L(\lambda)$ 为单位波长间隔内的辐射亮度, 其数学表达式为:

$$L(\lambda) = dL/d\lambda = d^3\varphi/dSd\Omega\cos\theta d\lambda, \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: 辐亮度的单位分别为 $W/m^2 \cdot Sr$ 和 $W/m^2 \cdot Sr \cdot nm$; φ 为发光面辐射在立体角 Ω 里的辐射通量, dS 是发光面上的面元, $d\Omega$ 为选取方向上的立体角, θ 为选取方向与面元法线的夹角。辐射定标就是确定像元灰度值和 $L(\lambda)$ 的关系。定标时需要选取标准辐射源, 理想的标准辐射源是绝对黑体, 其辐射能谱用普朗克定律表示为:

$$T(\lambda) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1},$$

其中: h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, c 为光速, T 为黑体的绝对温度。实际上, 这样的绝对黑体并不存在, 定标时常采用高精度定标后非常稳定的光源。

对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪进行辐射定标, 建立如下定标模型:

$$L_{ij}(\lambda) = \alpha \times N_{ij} + \beta, \quad (5)$$

其中: $L_{ij}(\lambda)$ 是第 i 行、第 j 列像元对应的光谱辐亮度, N_{ij} 是第 i 行、第 j 列像元响应的灰度值, α, β

为定标系数。 α, β 通过拟合不同辐亮度等级和其对应的灰度值得到。利用定标系数可以根据图像灰度值计算出成像光谱仪入瞳处的辐亮度(即表观辐亮度),从而反演出地面目标的反照率等目标信息^[9-11]。

定义成像光谱仪的辐亮度响应度为:

$$R(\lambda) = \frac{L_{ij}(\lambda)}{(N_{ij} - \sigma)}. \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可知,光谱仪的辐亮度响应度 $R(\lambda) = \alpha$, 像元灰度值的修正值 $\sigma = -\beta/\alpha$ 。 σ 的物理含义为包括探测器、电子学系统和杂散辐射产生的暗信号输出^[11]。因此,可由像元的灰度值 N_{ij} 直接得出其对应的辐亮度值:

$$L'_{ij}(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{(N_{ij} - \sigma)} \times N'_{ij}.$$

δ 用定标结果的相对偏差表示:

$$\delta = \frac{|L_{ij}(\lambda) - L'_{ij}(\lambda)|}{L_{ij}(\lambda)}.$$

其中: L_{ij} 为标准辐亮度, $L'_{ij}(\lambda)$ 为定标后测量的辐亮度。

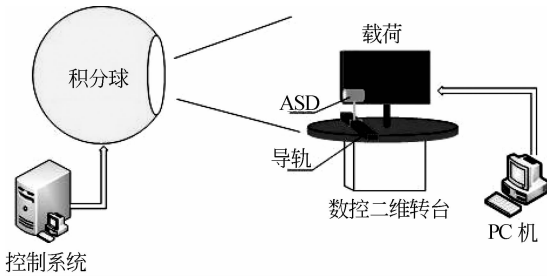


图 3 辐射定标系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of radiometric calibration system

本实验采用积分球法对载荷进行定标,该方法的优点是积分球提供的大面积无偏振均匀光源可以实现成像光谱仪全口径的辐射定标^[12]。辐射定标装置如图 3 所示,实验中的积分球为安徽光机所遥感实验室生产的 IS2500-1000 型积分球,其直径为 2.5 m,开口直径为 1 m,内置 64 盏卤素灯,工作波段为 340~1 070 nm,完成载荷紫外 2、可见 1、可见 2 三个通道的辐射定标;用实验室购置的氙灯标准光源和积分球完成紫外 1 通道的辐射定标。实验时,可以通过控制积分球内开

启的灯数来调整积分球的辐亮度等级值,此辐亮度由标准光谱辐射计测得,光谱辐射计的型号为 ASD-VNIR^[13],ASD 位置如图 3 所示。将载荷固定在数控二维转台上,调整二维转台使狭缝对准积分球开口处,通过控制系统打开积分球内的 10 盏灯,待积分球辐亮度达到稳定后,开始采集数据,并将标准光谱辐射计放在载荷狭缝附近,测量积分球辐亮度。同理,依次开启积分球内 12 盏、16 盏灯进行实验,以确定不同辐亮度下成像光谱仪给出的 DN 值。

3.2 辐射定标结果

载荷紫外 1、紫外 2、可见 1、可见 2 四个通道的辐射定标过程和实验数据分析方法完全相同。本文以可见 1 通道为例进行讨论,其它通道的辐射定标可依照此通道的定标方法来完成。

积分球开启 10 盏灯后给出的辐亮度如图 4 所示,标准光谱辐射计每隔 1 nm 给出一个辐亮度值,但这无法满足载荷的定标要求。由于给出的辐亮度值相隔较小且较均匀,可以用插值法得出其它波长所对应的辐亮度值。

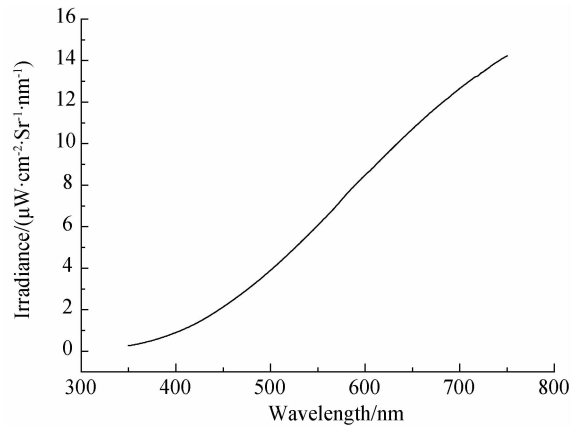


图 4 积分球光谱辐亮度曲线

Fig. 4 Spectral irradiance curve of integrating sphere

取可见 1 通道中心视场 1/3,1/2,2/3 光谱维处的像元为例进行辐亮度定标。积分球开启 10 盏、12 盏、16 盏灯时的辐亮度和像元 DN 值之间的关系记录在表 4 中。对表 4 中每个像元的一组 DN 值和辐亮度,以 DN 值为 x 轴点、光谱辐亮度为 y 轴点进行线性拟合,确定拟合系数 α, β ,并计算出像元的辐亮度响应度 $R(\lambda)$ 和像元灰度值的修正值 σ 。结果如表 5 所示。

表 4 可见 1 通道探测器 DN 值和积分球光谱辐亮度值的关系

Tab. 4 Relationship between DN and spectral irradiance in visible channel 1

光谱维	像元灰度值	光谱辐亮度 /($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)
	13 615.650	2.047 68
中心视场 1/3	14 700.339	2.659 29
	16 400.500	3.603 00
	15 054.839	2.883 97
中心视场 1/2	16 513.869	3.722 34
	18 785.109	5.050 69
	20 112.849	3.820 91
中心视场 2/3	22 961.210	4.915 05
	27 598.890	6.664 46

表 5 可见 1 通道辐射定标结果

Tab. 5 Calibration results of chosen CCD pixels in visible channel 1

光谱维	$\alpha/\times 10^{-4}$	β	$R(\lambda)$	σ
中心视场 1/3	5.581 90	-5.550 11	α	9 943.048 07
中心视场 1/2	4.194 05	-4.126 22	α	9 838.270 88
中心视场 2/3	3.795 92	-3.808 33	α	10 034.010 20

3.3 辐射定标结果验证

在得出像元的辐亮度响应度 $R(\lambda)$ 和像元灰度值的修正值 σ 后,就完成了对相应像元的辐射定标。为了验证定标结果,将积分球内的灯开启 8 盏、18 盏灯,让载荷测量此时积分球的标准辐亮度。通过像元给出的灰度 N_{ij} 值和辐亮度响应度 $R(\lambda)$ 可由式 $L_{ij} = R(\lambda) \times (N_{ij} - \sigma)$ 得出像元所对应的辐亮度值 $L_{ij}(\lambda)$,用此辐亮度和积分球的标准辐亮度进行比较,结果如表 6 所示。表中最大相对偏差为 2.9%,说明此方法的辐射定标精度较高,满足偏差小于 5%的定标要求。

表 6 载荷辐射定标结果验证

Tab. 6 Verification of radiometric calibration results

光谱维	辐亮度	仪器	
	标准值/ ($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)	定标值/ ($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)	相对偏差 (%)
中心视场 1/3	1.607 04	1.595 88	0.7
	4.068 01	3.949 73	2.9
中心视场 1/2	2.263 23	2.274 59	0.5
	5.705 20	5.746 00	0.7
中心视场 2/3	3.000 21	2.991 36	0.3
	7.528 21	7.705 57	2.3

3.4 辐射定标不确定度分析

在载荷定标过程中会不可避免地引入一些误差,这些误差影响着载荷的定标精度,主要来自定标过程各个环节的不确定度和载荷本身的不确定度^[14]。上述载荷的绝对辐射定标系统基于辐亮度计,由大口径积分球提供均匀的辐射源,定标系统的不确定度主要来自标准辐射度计不确定度、积分球稳定性、积分球面均匀性等,该项不确定度可由定标系统检测报告中查得。载荷本身的不稳定主要包括仪器响应的非稳定性不确定度和非线性不确定度。通过上述分析,辐射定标过程的不确定度主要包括:(1)基于光谱辐射计的辐亮度定标系统的不确定度;(2)载荷响应的非稳定性不确定度;(3)载荷响应的非线性不确定度。

可见 1 通道辐射定标的各不确定度和合成不确定度如表 7 所示。合成不确定度由各不确定度平方和的开方得到,其值为 2.96%,满足辐射定标不确定度小于 5%的技术指标要求。

表 7 可见 1 通道辐射定标不确定度分析

Tab. 7 Uncertainties of absolute radiometric calibration in visible channel 1 (%)

误差来源	值
积分球定标系统不确定度	2.82
载荷非线性不确定度	0.81
载荷非稳定性不确定度	0.39
合成不确定度	2.96

4 结 论

本文主要研究了载荷星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的定标技术,介绍了在实验室中对载荷

进行光谱定标和辐射定标的相关实验,并给出了测量结果。通过对载荷定标不确定度的分析及定标结果的验证可知,载荷的光谱定标不确定度为0.027 nm,辐射定标不确定度为2.96%,均满足技术指标要求,这为载荷的定量反演提供了保证。

参考文献:

- [1] 马玲,崔德琪,王瑞,等. 成像光谱技术的研究与发展[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 573-576,580. MA L, CUI D Q, WANG R, *et al.*. Study and developments of imaging spectrometer technique[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(Supp.): 573-576,580. (in Chinese)
- [2] de VRIES J, van den OORAD G H J, HILSEN RATH E, *et al.*. Ozone Monitoring Instrument(OMI)[J]. *SPIE*, 2001, 4480: 315-325.
- [3] 查鹏. 空间相机星上辐射定标技术的研究[J]. 红外, 2006, 27(3): 32-38. ZHA P. Research on spaceborne radiant calibration technology of space camera [J]. *Infrared*, 2006, 27(3): 32-38. (in Chinese)
- [4] 李聪,王咏梅. 用 PtNe 灯对大气紫外成像光谱仪进行光谱定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3302-3305. LI C, WANG Y M. Spectral calibration of the atmosphere ultraviolet imaging spectrograph using a PtNe lamp [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 3302-3305. (in Chinese)
- [5] J. Mirapeix, ACobo, AM Cubillas, *et al.*. In-process automatic wavelength calibration for CCD-spectrometers [J]. *SPIE*, 2008, 7003: 70031T-1-70031T-8.
- [6] 齐向东, 撤芄芄, 潘明忠, 等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2870-2876. QI X D, HAN P P, PAN M ZH, *et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2870-2876. (in Chinese)
- [7] 刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制和应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 52-57. LIU Y J, CUI J CH, BAYANHESHIG, *et al.*. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese)
- [8] 郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. 空间 CCD 相机的定标方法研究[J]. 光学技术, 2007, 33(增刊): 237-238. GUO Y, LIU X P, YANG H. Analysis of calibration for space CCD camera [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(supp.): 237-238. (in Chinese)
- [9] 方薇, 张冬英, 钱玮, 等. LCTF 调谐的高光谱成像系统辐射定标方法研究[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 359-362. FANG W, ZHANG D Y, QIANG W, *et al.*. Radiometric calibration method for LCTF hyperspectral image [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 359-362. (in Chinese)
- [10] 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373. XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese)
- [11] 刘伟峰, 赵国民, 王雷, 等. 天空光辐射亮度测量系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 455-458. LIU W F, ZHAO G M, WANG L, *et al.*. Design of sky-light radiation luminance measurement system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 455-458. (in Chinese)
- [12] 王立朋. 成像光谱仪辐射定标概览[J]. 光机电子信息, 2011, 28(12): 73-77. WANG L P. Overview of radiometric calibration of imaging spectrometer [J]. *OME Information*, 2011, 28(12): 73-77. (in Chinese)
- [13] 谢萍, 吴浩宇, 郑小兵, 等. 大口径积分球方向辐射特性自动测试系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1943-1949. XIE P, WU H Y, ZHENG X B, *et al.*. Automatic directional radiometric testing system for large aperture integrating spheres [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1943-1949. (in Chinese)

- [14] 李幼平, 高秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 822-828.

LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measure-

ment chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)

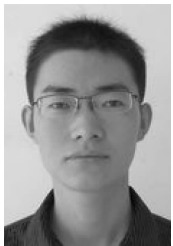
作者简介:



赵敏杰(1987—),男,河南商丘人,博士研究生,2012年于中科院安徽光机所获得硕士学位,主要从事光电测试和光谱仪器定标问题的研究。E-mail: mjzhao@aiofm. ac. cn



江宇(1976—),男,江苏扬州人,硕士,工程师,2005年于中科院安徽光机所获得硕士学位,主要从事环境光学仪器研发,包括光学系统设计、加工、检测等方面的研究。E-mail: yjiang@aiofm. ac. cn



周海金(1986—),男,山东聊城人,博士研究生,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学系统设计和杂散光问题的研究。E-mail: hjzhou@aiofm. ac. cn



汪世美(1972—),男,安徽桐城人,硕士,副研究员,2005年于中科院安徽光机所获得硕士学位,主要从事环境光学检测技术的研究。E-mail: wsm@aiofm. ac. cn



刘文清(1954—),男,安徽蚌埠人,博士,研究员,博士生导师,1978年于中国科学技术大学获得学士学位,1989年于中科院安徽光机所获得硕士学位,1995年于希腊克里特大学获得博士学位,主要从事环境光学特性、有害痕量气体光学与光谱学监测方法、新型环境监测技术的研究。E-mail: wqliu@aiofm. ac. cn

导师简介:



司福祺(1977—),男,安徽蚌埠人,博士,研究员,博士生导师,2000年于安徽大学获得学士学位,2003年,2006年于中科院安徽光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事光信息处理、痕量气体光学与光谱学监测方法等研究。E-mail: sifuqi@aiofm. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)