

# 空间外差光谱仪实验室定标技术研究

李志伟 熊 伟 施海亮 王先华 叶函函 韦秋叶 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 针对空间外差光谱仪(SHS)超光谱分辨率、空间干涉形式及窄带光谱范围的特点,分析了定标原理及要求,确定了单色可调均匀面光源的光谱定标和积分球辐射定标系统的绝对辐射定标方法,搭建了定标系统,实现了对光谱仪的光谱定标和辐射定标,并对定标的不确定度进行了分析,得出空间外差光谱仪的光谱定标不确定度为  $0.015 \text{ cm}^{-1}$ ,辐射定标不确定度为  $4.02\%$ ,满足给定的技术指标要求。通过对大气中  $\text{CO}_2$  吸收谱的实际测量对定标结果进行验证,结果表明实测谱与模拟谱吸收峰位置对应准确,辐射亮度吻合理想,为  $\text{CO}_2$  的定量反演奠定了基础。

**关键词** 光谱学;空间外差光谱仪;光谱定标;辐射定标;定标不确定度

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0430002

## Study on Laboratory Calibration of Spatial Heterodyne Spectrometer

Li Zhiwei Xiong Wei Shi Hailiang Wang Xianhua Ye Hanhan Wei Qiuye Qiao Yanli

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** According to the characteristics of super-resolution, spatial interference and narrow bandwidth of spatial heterodyne spectrometer (SHS), the principle and requirement of calibration are analyzed, the methods of spectral calibration using tunable uniform planar radiances and the radiometric calibration with sphere are presented, the calibration systems are built, the spectral and radiometric calibrations of the spectrometer are fulfilled, and the calibration uncertainty is analyzed. The spectral calibration uncertainty is  $0.015 \text{ cm}^{-1}$ , and the radiometric calibration uncertainty is  $4.02\%$ . The calibration uncertainty meets the given requirements. The calibration results are verified by measuring the actual atmospheric  $\text{CO}_2$  absorption spectra. The results show that the positions of the absorption peaks and the radiance brightness values fit well between the measured and the simulated spectra, which provides a foundation for quantitative inversion of  $\text{CO}_2$ .

**Key words** spectroscopy; spatial heterodyne spectrometer; spectral calibration; radiometric calibration; calibration uncertainty

**OCIS codes** 120.3180; 010.1120

## 1 引 言

大气中的  $\text{CO}_2$  作为主要的温室气体,已有研究表明只有优于  $1\%$  的测量精度才能对其进行“源”与“汇”的分析。美国的光栅光谱仪(OCO)和日本的时间型迈克耳孙干涉光谱仪(GOSAT)都选择相对“洁净”的  $1.575 \mu\text{m}$  吸收带并辅助其他通道对大气中  $\text{CO}_2$  进行探测<sup>[1-3]</sup>,但对于高速运行的卫星及复

杂的空间环境,光栅光谱仪体积大、对温度敏感,时间干涉型光谱仪的运动部件、干涉数据采集时间长都是巨大的问题。空间外差光谱技术(SHS)因其体积小、无运动部件、超光谱分辨率及所有干涉数据点信号同时采集等优点得到迅速发展<sup>[4-5]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所作为国内最早开展空间外差光谱技术研究的单位,已研制出用于  $1.575 \mu\text{m}$  吸收大

**收稿日期**: 2013-11-19; **收到修改稿日期**: 2013-12-06

**基金项目**: 国家自然科学基金(41301373)

**作者简介**: 李志伟(1985—),男,博士研究生,主要从事超光谱数据修正及处理算法方面的研究。

E-mail: zhiwli@163.com

**导师简介**: 熊 伟(1975—),男,博士,研究员,主要从事超光谱大气遥感方面的研究。E-mail: frank@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

气中 CO<sub>2</sub> 探测的空间外差光谱仪原理样机<sup>[6-7]</sup>。

定标是光谱仪定量反演的前提,其精度直接影响着最终产品的数据精度。实验室定标可以验证光谱仪的各项技术指标是否满足设计要求,并且是以后仪器测量数据的重要参考。现阶段空间外差光谱仪的定标技术仍不成熟,国外相关研究单位仍采用传统定标方式,Harlander 等<sup>[8]</sup>用 MnNe 以及 Zn 谱线灯对基于空间外差光谱技术所研制的中高层大气羟基空间外差成像仪(SHIMMER)系统进行光谱定标。辐射定标采用开口直径为 20 cm 的内置卤钨灯积分球,标准传递采用标准灯。加拿大约克大学 Lin 等<sup>[9]</sup>利用元素谱线灯(Kr、Xe)对研制的水汽探测实验装置空间外差水汽探测仪(SHOW)进行光谱定标。相关报道中都没有对定标不确定度进行分析。针对空间外差光谱仪超光谱分辨率、空间干涉形式及窄带光谱范围的特点,本文提出了相应的实验室定标方法,搭建了相应的装置,完成了仪器的光谱定标和辐射定标,并分析了定标不确定度。最后利用实测大气中 CO<sub>2</sub> 吸收光谱的方法对定标结果进行了验证。

## 2 空间外差光谱仪简介

空间外差光谱仪的光学系统结构如图 1 所示<sup>[10]</sup>,两个衍射光栅 G1、G2 代替了迈克耳孙干涉仪中的两个平面反射镜,相干光形成的干涉条纹由 L2 和 L3 组成的光学系统成像于探测器上。分束器出射的两强度相等的相干光分别经两光栅衍射返回后发生干涉。空间外差光谱仪的理论设计参数:光谱范围为 6310~6375 cm<sup>-1</sup>;光谱分辨率为 0.42 cm<sup>-1</sup>;视场为 6°。

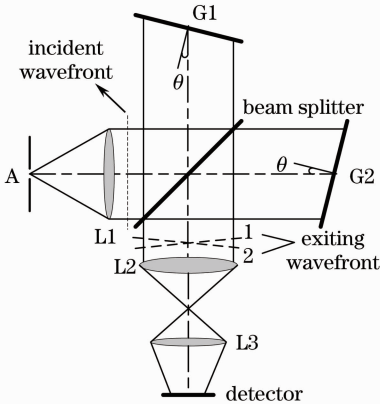


图 1 空间外差光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SHS

## 3 实验室定标及不确定度分析

空间外差光谱仪实验室定标包括光谱定标和辐射定标。为了满足仪器对 CO<sub>2</sub> 探测精度优于 1% 的要求,光谱定标精度需要优于 0.1 cm<sup>-1</sup>,辐射定标不确定度应小于 5%。

### 3.1 光谱定标原理

对于色散型光谱仪而言,其探测器各像素对应不同的波长,光谱定标就是确定每个探测器像素对应的中心波长及仪器线型函数(ILS)<sup>[11-12]</sup>。而空间外差光谱仪其探测器任一像素输出数值是仪器探测光谱范围内各波长响应的综合结果。单色光入射时,探测器直接采集干涉数据,需经傅里叶变换复原光谱,光谱的峰值点即干涉条纹频率,因此空间外差光谱仪光谱定标需要确定干涉条纹的空间频率与入射波长的关系及仪器线型函数。

干涉光谱仪是波数等间隔的,传统的干涉光谱仪干涉条纹零空间频率对应零波数,空间外差光谱仪干涉条纹频率  $f_x$  与入射波数  $\sigma$  之间的关系为<sup>[13]</sup>

$$f_x = 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta, \quad (1)$$

式中  $\sigma_0$  对应干涉条纹零空间频率,为系统基频, $\theta$  为光栅利特罗角。干涉条纹频率随入射波数与基频波数差的增大而增大。

由于干涉图的最大光程差受到限制,干涉数据复原光谱  $B'(\sigma)$  为入射光谱  $B(\sigma)$  与仪器线型函数  $W_{\text{ILS}}$  的卷积,即

$$B'(\sigma) = B(\sigma) \otimes W_{\text{ILS}}. \quad (2)$$

理想的单色光干涉数据相当于矩形窗自然切趾,由傅里叶变换的原理可知复原光谱为 sinc 函数,以极大值为中心呈振荡衰减,逐渐趋于零。因此空间外差光谱仪的仪器线型函数可以通过单色光入射仪器,复原光谱测量 ILS,ILS 的半峰全宽体现了仪器对光谱的展宽作用,其大小可以作为仪器的光谱分辨率。

#### 3.1.1 光谱定标方案选择及结果

常用的光谱定标方法有单色仪法和标准谱线法,光谱定标要求光源的波长不确定度小、稳定性好,在仪器光谱范围内有多个谱线且均匀分布,谱线宽度远小于仪器光谱分辨率,并且谱线强度满足仪器信噪比的要求。空间外差光谱仪属于超分辨分光技术,光谱分辨率约为 0.1 nm,单色仪的能量及谱线宽度均不能满足上述要求。仪器的带宽较窄,只有十几纳米,查询美国国家标准技术研究所(NIST)的标准数据库可知只有镁灯满足要求,但在仪器光谱范围内只有三条谱线,用三个特征谱线对仪器进行光谱定标数量明显不足。因此最终确定可

调谐激光器加消散斑积分球系统的光谱定标方案。选用 SANTEC 公司的 TSL-510C 型可调谐激光器作为定标光源,该仪器可以在仪器光谱范围内输出连续可调单色光(1 pm 间隔),并且线宽小于 1 pm,波长绝对精度优于 5 pm,输出功率也满足空间外差光谱仪的要求。激光器输出的光导入积分球后提供充满仪器视场的均匀面光源,积分球内壁激光光斑直接照明小区域采用旋转漫反射板的方法消除激光空间相干性产生的散斑<sup>[14-15]</sup>。

调节激光器在仪器的光谱范围内输出不同波长

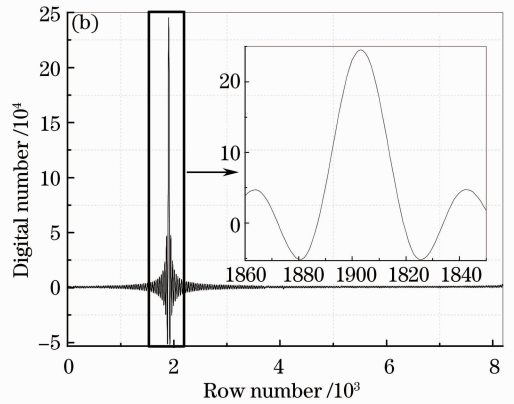
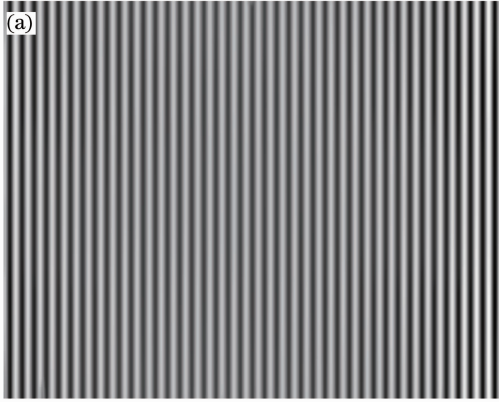


图 2 (a) 6351.22 cm<sup>-1</sup> 预处理后的干涉图; (b) 干涉图充零后复原光谱

Fig. 2 (a) Interferogram of 6351.22 cm<sup>-1</sup> after preliminary processing; (b) recovered spectrum of interferogram after zero filling

由傅里叶变换后光谱的对称性可知,复原光谱坐标点有效的为 8192(2<sup>14</sup>/2)个。部分入射复原光谱结果如图 3 所示,不同的入射波数对应充零后不同的干涉条纹频率。

由(1)式可知干涉条纹频率与入射光波长呈线

性关系,因此建立如下光谱定标方程模型:

$$\sigma_i = \sigma_0 + k \cdot f_i, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} k &= \frac{\sum_{i=1}^M (f_i - \bar{f})(\sigma_i - \bar{\sigma})}{\sum_{i=1}^M (f_i - \bar{f})^2}, \\ \sigma_0 &= \bar{\sigma} - k \cdot \bar{f} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

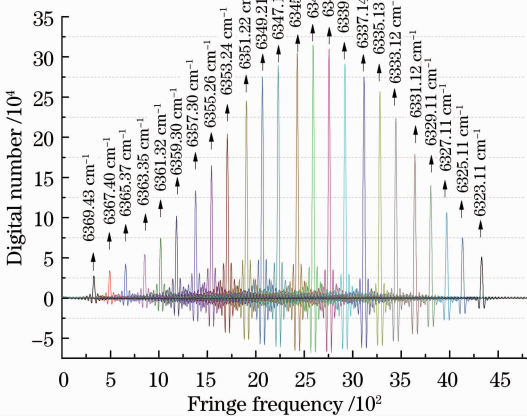


图 3 不同波数的干涉图复原光谱

Fig. 3 Spectra recovered of interferograms with different wavenumbers

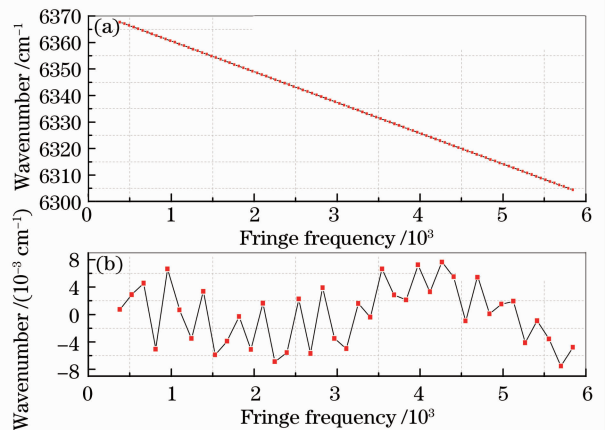


图 4 (a) 光谱定标拟合及 (b) 残差

Fig. 4 (a) Fit of spectral calibration and (b) residue

式中  $\sigma_i$  和  $f_i$  分别为激光器输出波数与对应的干涉条纹频率值,共  $M$  组数据, $\bar{\sigma}$  和  $\bar{f}$  分别为激光器输出波数与干涉条纹频率的平均值。

拟合后光谱定标结果和拟合残差如图 4 所示。相关系数  $R^2=1$ ,说明入射波数和干涉条纹频率线性关系极好。拟合残差极小并且围绕 0 上下波动,表明拟合效果良好,不存在异常数据点。最终确定光谱定标方程为

$$\sigma = -0.0116i + 6372.2587, \quad (5)$$

式中光谱坐标点  $i=0\sim 8191$ 。平均拟合残差为  $0.0037\text{ cm}^{-1}$ 。

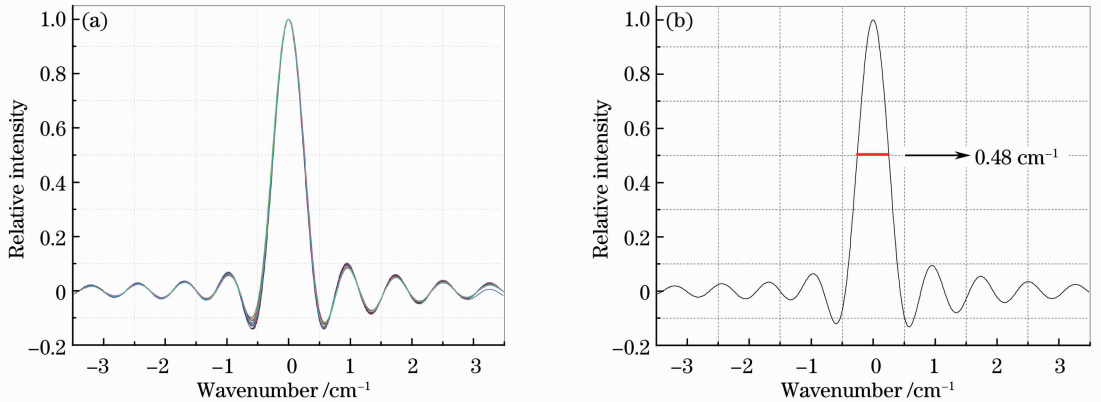


图 5 (a)不同波数的 ILS; (b)平均 ILS

Fig. 5 (a) ILS versus wavenumber; (b) mean ILS

### 3.1.2 光谱定标不确定度分析

空间外差光谱仪光谱定标过程中的不确定度主要包括定标光源的不确定度、干涉条纹频率值的不确定度和回归分析的不确定度。具体内容如下:

1) 定标光源的不确定度。激光器输出波长的不确定,由激光器技术手册给出,在环境温度变化小于  $\pm 1^\circ$  时,输出波长的不确定度为  $0.01\text{ cm}^{-1}$ 。

2) 干涉条纹频率值的不确定度。采用充零复原光谱的方法使干涉条纹频率值的定位精度大大提高,峰值点定位精度误差小于一个光谱点间隔,约为  $0.01\text{ cm}^{-1}$ 。

3) 回归分析的不确定度。回归过程的不确定度由回归直线与标准值之差决定,可用残差标准差来确定回归不确定度的大小,约为  $0.0037\text{ cm}^{-1}$ 。在本文方法与谱线灯方法每个波数测量值与实际值的偏差都相同的情形下,若用残差标准差表示拟合精度,则本文用 40 个点拟合的方法相比与谱线灯 3 个点拟合方法精度将会提高  $\sqrt{40}/\sqrt{3}=3.65$  倍。

最终空间外差光谱仪光谱定标的合成不确定度为  $0.015\text{ cm}^{-1}$ ,远优于给定的  $0.1\text{ cm}^{-1}$  的光谱定标

由前文分析可知,可以通过仪器测量单色光数据确定 ILS。理论上需要确定各入射波数下的 ILS。实际处理中将各单色光光谱归一化后,极大值移到同一点,结果如图 5(a)所示,发现各波数下的 ILS 基本重合,这是因为仪器的光谱范围较窄,在光谱范围内 ILS 的变化也很小,因此可以将各波数下平均的 ILS 作为整个光谱范围的 ILS,结果如图 5(b)所示。仪器的半峰全宽为  $0.48\text{ cm}^{-1}$  (约  $0.13\text{ nm}$ ),略大于仪器的设计值,这是因为光栅的刻画面积没有完全利用,可以通过对成像系统的调整在后续部分进行改善。

精度指标。这是由于在空间外差光谱仪范围内选取了多个入射波长作为定标数据点,激光器输出波长确定,仪器在窄带光谱范围内线性度极好,并且光源能量足够,可以使仪器一直工作在较高的信噪比状态,同时严格控制环境及仪器温度,大大提高了光谱定标的精度。

### 3.2 辐射定标原理

空间外差光谱仪直接获取的是探测器输出的數位值(DN,  $V_{DN}$ ),而辐射定标的目的就是建立仪器的输出信号和输入光谱辐射亮度之间的定量关系。辐射定标包括相对辐射定标和绝对辐射定标。对于非干涉形式的光谱仪而言,在均匀面光源照射的情况下,其探测器各像素输出 DN 值应该相同。实际中探测器自身响应的非均匀性、光学器件的不理想及边缘视场效应等因素造成探测器输出数值不一致。整个系统的相对辐射定标系数可以通过均匀面光源入射求得。但是这种方法不适用于干涉光谱仪的相对辐射定标。空间外差光谱仪的平场效果只有在有无误差装调下,基频波数入射情形下才能产生,现实中是无法做到的。Englert 等<sup>[16]</sup>针对空间外差光谱仪的平场

提出了挡光臂法,通过对光栅两臂分别挡住其一的输出信号的测量求出平场校正系数。但平场校正系数需要在干涉仪胶合前确定,而干涉仪胶合后两光栅相对位置的变化会导致平场校正系数的不匹配。

在均匀光照下,空间外差光谱仪探测器输出 DN 值为干涉数据,如图 6 所示,其中行方向为干涉维,列方向为空间维。对于探测器的一列来说,其输出 DN 值应该相同,因此可以对干涉数据进行相对辐射定标。

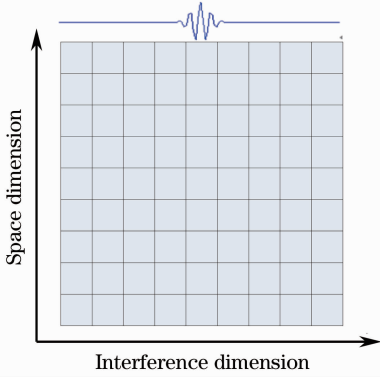


图 6 SHS 干涉图

Fig. 6 Interferogram of SHS

经相对辐射定标校正后的空间外差光谱仪的干涉数据可以表示为

$$I(x) = \int B(\sigma)R(\sigma) \cos(2\pi)[4x(\sigma - \sigma_0) \tan \theta] d\sigma, \quad (6)$$

式中  $I(x)$  为输出干涉图信号强度,  $B(\sigma)$  为入射光谱辐射亮度,  $R(\sigma)$  为绝对光谱响应系数。

干涉数据经傅里叶变换后为

$$S(\sigma) = \int I(x) \cos(2\pi)\sigma x dx = B(\sigma)R(\sigma), \quad (7)$$

式中  $S(\sigma)$  为复原光谱, 则

$$R(\sigma) = S(\sigma)/B(\sigma). \quad (8)$$

由(8)式可知在仪器响应满足线性关系时,可以通过单一已知光谱辐射亮度的均匀面光源可实现 SHS 绝对辐射定标。实际上由于定标源的不稳定、探测器的噪声及杂散光等的影响,仪器响应并不是理想线性关系,采用对多个已知辐射亮度等级的光谱测量,在每一个波数下进行线性拟合的方法,建立如下的拟合关系:

$$S_\sigma = L_\sigma \cdot R_\sigma + \epsilon_\sigma, \quad (9)$$

式中  $L_\sigma$  为入射光谱辐射亮度,  $S_\sigma$  为 SHS 输出的波数  $\sigma$  处光谱 DN 值,  $R_\sigma$  为绝对辐射定标系数,  $\epsilon_\sigma$  为定标源、仪器自身及杂散光造成的偏置。

### 3.2.1 辐射定标方案选择及结果

常用的辐射定标方法有标准灯加漫反射板和积分球系统。灯板系统中漫反射板反射的辐亮度大小由其距标准灯的距离决定,距离远时无法满足空间外差光谱仪对入射光谱亮度的要求,距离近时反射光的朗伯性变差,并且杂散光严重。而积分球辐射定标系统可以提供大动态范围的稳定的均匀面光源,因而最终采用积分球辐射定标系统方案对空间外差光谱仪进行绝对辐射定标。实验中使用的积分球为中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感中心生产的 IS2500-1000 型积分球,其直径为 2.5 m, 开口直径为 1 m, 内置 64 盏卤钨灯。通过控制开启不同盏数的灯调节积分球输出的辐射亮度等级。保证积分球辐射亮度覆盖仪器的响应动态范围,并且在响应范围内测量多个辐射亮度等级。SHS 测量的积分球光谱如图 7(a)所示,积分球输出光谱辐射亮度由标准光谱辐射计测得,光谱辐射计的型号为 ASD-VNIR。标准光谱辐射计输出的辐射亮度值间隔为 1 nm。由于空间外差光谱仪的带宽较窄,卤钨

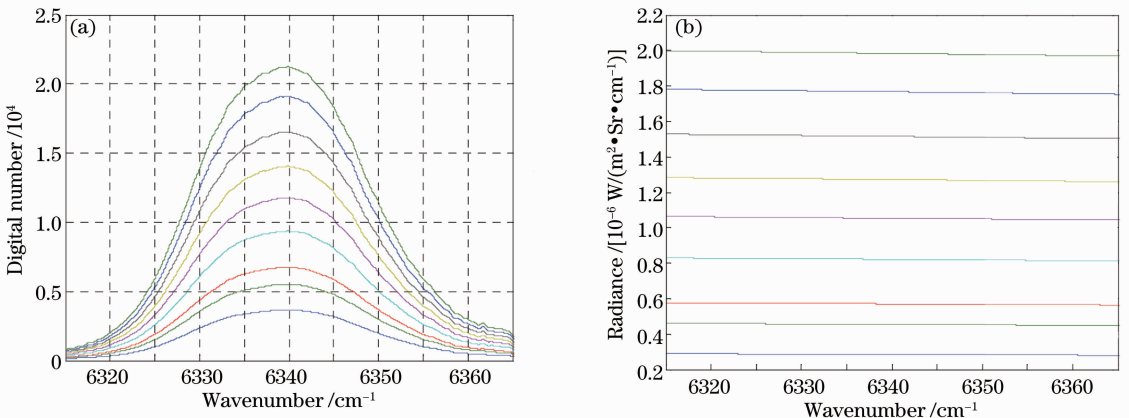


图 7 (a) SHS 测量的积分球的光谱; (b) ASD-VNIR 测量积分球的辐射亮度

Fig. 7 (a) Spectra of sphere measured by SHS; (b) radiances of sphere measured by ASD-VNIR

灯的光谱在仪器的窄带光谱范围内平缓变化,可以用线性插值法得出其他波长所对应的辐射亮度值,并且 ASD-VNIR 测量光谱的辐射亮度是波长单位  $[W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)]$ ,需要转换成波数单位  $[W/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})]$ ,结果如图 7(b)所示。

仪器部分光谱点的响应关系如图 8 所示,可见仪器响应线性关系良好,可以通过(9)式对仪器进行绝对辐射定标。定标结果如图 9 所示,仪器的偏置远远小于定标系数及探测的 DN 的量化位数(14位),说明定标光源、仪器自身噪声及杂散光等对仪器的影响较小,符合实际情况。

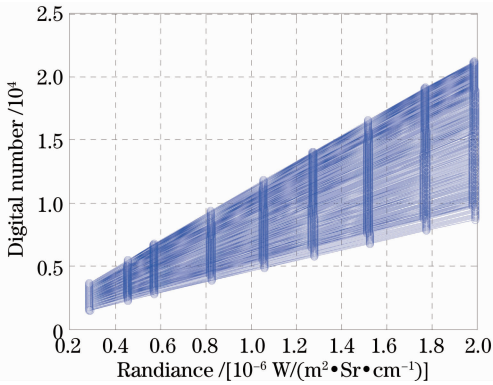


图 8 SHS 输出 DN 值与输入亮度之间的线性关系  
Fig. 8 Linearity between the output DN of SHS and the input radiance

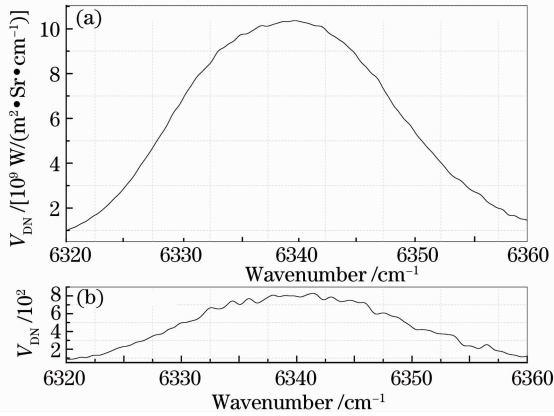


图 9 (a)绝对辐射定标系数和(b)偏差  
Fig. 9 (a) Coefficient of radiometric calibration and (b) residue

### 3.2.2 辐射定标不确定度分析

空间外差光谱仪辐射定标过程中的不确定度主要包括两部分:积分球辐射源的不确定度及仪器本身的不确定度<sup>[17]</sup>。积分球辐射定标系统的不确定度主要包括积分球的面均匀性、角均匀性、稳定性及用于辐射亮度传递的光谱辐射计等的不确定度,这些不确定度最终合成为积分球辐射源系统的总的

不确定度。仪器自身的不确定度包括响应的非线性、非稳定性及重复性。最终空间外差光谱仪辐射定标的不确定度如表 1 所示,合成的最终辐射定标不确定度为 4.02%,满足辐射定标不确定度低于 5%的技术要求。

表 1 辐射定标不确定

Table 1 Uncertainty of radiometric calibration

Source of calibration uncertainty	Value / %
Calibration uncertainty of sphere	3.74
Response nonlinearity of SHS	0.70
Response non-stability of SHS	0.95
Response repeatability of SHS	0.88
Synthetical calibration uncertainty	4.02

## 4 大气中 CO<sub>2</sub> 吸收信号定标结果验证

为了验证空间外差光谱仪实验室定标系数,于 2013/07/11 开展了大气中 CO<sub>2</sub> 吸收谱测量实验,实验场地空旷平整,当天天气状况良好。环境温度变化会导致干涉仪性能的变化,设定空间外差光谱仪的仪器控制温度与室内定标温度相同。测量结果的其中一条实测谱与模拟谱的对比如图 10 所示,其中实线为模拟谱,虚线为实测谱。分析 SHS 的实测谱与模拟谱可知,吸收峰的位置对应准确,说明波长定标结果准确,而吸收峰的深度吻合良好,则说明仪器线型函数定标结果准确。实测谱与模拟谱整体辐射亮度匹配精确说明仪器辐射定标结果准确。

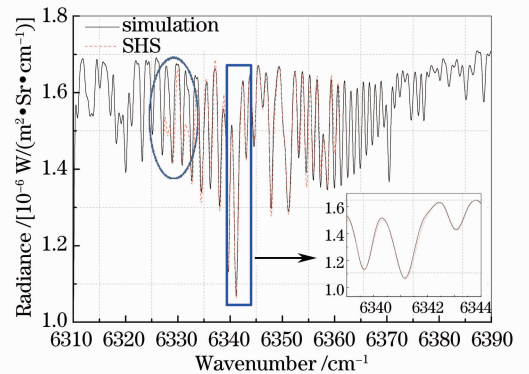


图 10 SHS 实测谱与模拟谱  
Fig. 10 Measured spectrum of SHS and simulated spectrum

实测谱与模拟谱之间微小差别,可能是在计算模拟谱时输入的 CO<sub>2</sub> 浓度及大气状况与实际存在偏差,仪器噪声等也会有影响。这正是需要反演算法予以克服的问题。注意到在 6328 cm<sup>-1</sup> 和 6333 cm<sup>-1</sup> 处(图 10 中圆形框内)实测谱的两个吸收峰较模拟谱要低。研究表明,由于模拟软件所用的太阳光谱在这

两个波段上缺少了应有的太阳弗琅禾费线,造成模拟光谱失真。温度气体观测卫星(GOSAT)的观测结果也存在类似现象<sup>[18-19]</sup>,这种情况也说明了空间外差光谱仪实验室定标结果准确,定标后的吸收谱具备反演 CO<sub>2</sub> 浓度的基本能力。

## 5 结 论

主要研究了空间外差光谱仪的实验室定标技术,介绍了对仪器进行光谱定标和辐射定标的原理、内容及相关实验,并给出了定标结果。同时分析了定标过程中的不确定因素,得出仪器的光谱定标不确定度为 0.015 cm<sup>-1</sup>,辐射定标不确定度为 4.02%,均满足技术指标要求。最后通过对大气中 CO<sub>2</sub> 吸收谱的测量对定标结果进行验证,结果表明定标结果精确可靠,为 CO<sub>2</sub> 的定量反演提供了保证。

## 参 考 文 献

- 1 Fumihiko Sakuma, Carol J Bruegge, David Rider, *et al.*. OCO/GOSAT preflight cross-calibration experiment [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 585-599.
- 2 Kei Shiomi, Shuji Kawakami, Tomoko Kina, *et al.*. Calibration plan of GOSAT sensors [C]. SPIE, 2007, 6744: 67440G.
- 3 Tomoko Kina, Kei Shiomi, Shuji Kawakami, *et al.*. Result of Calibration for Gosat Tanso [OL]. [2014-01-09]. [http://www.isprs.org/proceed-ings/xxxviii/par08/pdf/JTS51\\_20100323095437.pdf](http://www.isprs.org/proceed-ings/xxxviii/par08/pdf/JTS51_20100323095437.pdf).
- 4 J Harlander, F L Roesler, C R Englert, *et al.*. Robust monolithic ultraviolet interferometer for the SHIMMER instrument on STPSat-1 [J]. Appl Opt, 2003, 42(15): 2829-2834.
- 5 F L Roesler, J M Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric remote sensing [C]. SPIE, 1999, 3756: 337-345.
- 6 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *et al.*. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 959-964.  
叶松,方勇华,洪津,等.空间外差光谱仪系统设计[J].光学精密工程,2006,14(6):959-964.
- 7 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun, *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of watervapor [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1511-1515.  
熊伟,施海亮,汪元钧,等.近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J].光学学报,2010,30(5):1511-1515.
- 8 J Harlander, F L Roesler, J G Cardon. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere [J]. Appl Opt, 2002, 41(7): 1343-1352.
- 9 Lin Yunlong, G Shepherd, B Solheim, *et al.*. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development [C]. Proc XIV Int TOVS Study Conf, 2005.
- 10 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528002.  
施海亮,方勇华,吴军,等.新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J].光学学报,2012,32(5):0528002.
- 11 Jason O Day, Christopher W O'Dell, Randy Pollock, *et al.*. Preflight spectral calibration of the orbiting carbon observatory [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2793-2801.
- 12 Ma Liang, Wei Jun, Huang Xiaoxian, *et al.*. Laboratory spectral calibration method of granting dispersive imaging spectromete [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 023001.  
马亮,危峻,黄小仙,等.光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标方法研究[J].激光与光电子学进展,2013,50(2):023001.
- 13 Shi Hailiang, Xiong Wei, Zou Mingmin, *et al.*. Study on calibration method of spatial heterodyne spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1686-1687.  
施海亮,熊伟,邹铭敏,等.空间外差光谱仪定标方法研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(6):1686-1687.
- 14 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei, *et al.*. Advanced calibration method for sun radiometers [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1337-1342.  
徐秋云,郑小兵,张伟,等.太阳辐射计先进定标方法研究[J].光学学报,2010,30(5):1337-1342.
- 15 Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, *et al.*. Research on method of calibrating sun channels of sun radiometers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412004.  
翟文超,李健军,郑小兵,等.太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J].光学学报,2012,32(4):0412004.
- 16 Christoph R Englert, John M Harlander. Flatfielding in spatial heterodyne spectroscopy [J]. Appl Opt, 2006, 45(9): 4583-4590.
- 17 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spcetral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.  
杨小虎,王淑荣,黄煜.大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J].光学学报,2012,32(1):0101004.
- 18 Y Yoshida, Y Ota, N Eguchi, *et al.*. Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the greenhouse gases observing satellite [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(4): 717-734.
- 19 Y Yoshida, N Eguchi, Y Ota, *et al.*. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column amounts retrieval from GOSAT TANSO-FTS SWIR [J]. NIES, GOSAT Project Document (NIES-GOSAT-PO-014) Version, 2010, 1: 1-77.

栏目编辑:史敏