

# 基于空间外差光谱技术的紫外高分辨率 太阳直射光谱测量

方雪静<sup>1,2,3</sup>, 罗海燕<sup>1,3</sup>, 施海亮<sup>1,3</sup>, 李志伟<sup>1,3</sup>, 胡广晓<sup>1,2,3</sup>, 金伟<sup>1,2,3</sup>, 张纪承<sup>1,2,3</sup>, 熊伟<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>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** 利用基于空间外差光谱技术的中高层大气 OH 自由基甚高光谱探测仪, 配合太阳跟踪器, 对晴空太阳直射光谱进行测量, 获得了 308 nm 波段高分辨率的太阳直射光谱。对干涉数据进行去暗电流、去基线、相位校正和傅里叶变换等处理, 得到最终的干涉光谱图。利用辐射传输模型模拟理论上到达地面的光谱, 将实测结果与理论模拟结果进行比对发现, 光谱匹配一致, 这在轨探测高分辨率太阳光谱与目标散射信号提供了实验数据。

**关键词** 大气光学; 空间外差光谱技术; 太阳光谱; 高分辨率; OH 自由基

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0601001

## High Resolution Ultraviolet Direct Solar Spectrum Measurement Based on Spatial Heterodyne Spectroscopy

Fang Xuejing<sup>1,2,3</sup>, Luo Haiyan<sup>1,3</sup>, Shi Hailiang<sup>1,3</sup>, Li Zhiwei<sup>1,3</sup>, Hu Guangxiao<sup>1,2,3</sup>,  
Jin Wei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jicheng<sup>1,2,3</sup>, Xiong Wei<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** We use an ultra-spectral resolution spectrometer for mesospheric OH radicals to obtain a high resolution direct solar spectrum in the wavelength of 308 nm based on spatial heterodyne spectroscopy techniques and the sun direction equipment. By removing the dark current and baseline, phase correction and Fourier transform, we get spectra from interferogram data. The results are in good agreement with radiative transfer model simulation. These results provide experimental data for orbital high resolution solar spectra and scattering signal detection.

**Key words** atmospheric optics; spatial heterodyne spectroscopy; solar spectrum; high resolution; OH radicals

**OCIS codes** 010.0280; 010.1310; 010.620; 120.0280; 300.6540

## 1 引 言

在全球气候观测领域, 太阳辐射是地球能量的最主要来源, 它是大气圈、水圈和陆圈中各种物理过程和各种生命活动的基本动力, 精确的太阳辐射观

测数据能有效评估太阳辐射变化在长期的全球气候和环境变化中所起的作用。太阳辐射与其光谱分布密切相关, 并且太阳能量经过大气时的散射与吸收也影响着天气与气候的变化, 因此对太阳精细光谱的探测具有重要的意义<sup>[1]</sup>。羟基(OH)对于理解中

收稿日期: 2017-11-07; 收到修改稿日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(11703061)、合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201607)、实验室创新基金(CXJJ-17S002)

作者简介: 方雪静(1991—), 女, 博士研究生, 主要从事高光谱数据处理及数据反演方面的研究。

E-mail: fxj126@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 熊伟(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高光谱技术方面的研究。E-mail: frank@aiofm.ac.cn(通信联系人)

间层大气化学成分非常重要,OH 自由基在大气光化学反应中起初始化作用,其浓度变化决定了大气中臭氧浓度的变化、对流层水汽的波动、NO<sub>x</sub> 和 CO 及其他温室气体排放的改变,以及气候的变化。

美国国家天文台(NSO)太阳光谱数据是美国地基太阳光谱观测的 Kurucz 太阳光谱,利用傅里叶变换光谱仪获得了光谱分辨率为  $9 \times 10^{-4}$  nm 的可见及近红外太阳光谱<sup>[2]</sup>,在轨仪器 ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment-Fourier Transform Spectrometer)采用掩星观测模式获得了光谱分辨率为  $0.02 \text{ cm}^{-1}$  的大气顶层太阳光谱,但国内尚未获得过高分辨率的太阳光谱。

20 世纪 90 年代以来,国外相继出现对中高层大气即 50~90 km 的 OH 自由基进行探测的仪器,如: MAHRSI<sup>[3]</sup> (Middle Atmosphere High-Resolution Spectrograph Investigation)、MLS<sup>[4]</sup> (Microwave Limb Sounder)、SHIMMER<sup>[5]</sup> (Spatial Heterodyne Imager for Mesospheric Radicals) 等。其中,MAHRSI 与 SHIMMER 探测 OH  $A^2 \Sigma^+ - X^2 \Pi(0,0) 308 \text{ nm}$  波段太阳共振荧光发射光谱。MAHRSI 首次得到 OH 自由基全球分布,而基于空间外差光谱(SHS)技术的 SHIMMER 验证了 MAHRSI 的探测结果并加以修正,得到了更接近光化学模型的 OH 自由基空间分布。

本文基于空间外差光谱技术,使用中高层大气 OH 自由基甚高光谱探测仪获得 308 nm 波段高分辨率地面太阳直射光谱,为在轨探测高分辨率太阳光谱和 OH 自由基目标散射信号提供了理论与实验基础。

## 2 仪器与原理

精确反演大气气体成分需要很高的光谱分辨率,特别是在复杂背景下获取微量气体的特征光谱辐射信息。空间外差光谱技术是近年来发展应用的一项新技术,其具有闪耀光栅衍射和干涉相结合的特点,可以在设计的闪耀波长范围内获得极高的光谱分辨率,特别适用于大气成分的精细探测。应用于中高层大气 OH 自由基探测的空间外差光谱技术,发挥了其极高分辨率的优点,可对窄谱段内的发射信号进行探测。

空间外差光谱技术将光栅及无动镜干涉技术合为一体,具有干涉仪的高通量和光栅空间的衍射特点,在已确定的中心波长范围内,可以获得极高的光谱分辨率<sup>[6]</sup>。

空间外差光谱仪光学系统结构如图 1 所示<sup>[7]</sup>,衍射光栅 G1、G2 代替了传统迈克耳孙干涉仪中的 2 个平面反射镜。光束进入光阑 A,经透镜 L1 准直后入射到分束器上,分束器将入射光分为强度相等的 2 束相干光:一束经分束器反射后入射到光栅 G1 上,并经光栅 G1 衍射后返回分束器;另一束透过分束器入射到光栅 G2 上,经光栅 G2 衍射后反射回到分束器。2 束射光束在出射面上形成干涉条纹,并由光学成像系统 L2、L3 成像记录于探测器上。记录不同位置的干涉条纹函数,通过一定的算法即可恢复出待测的光谱曲线。

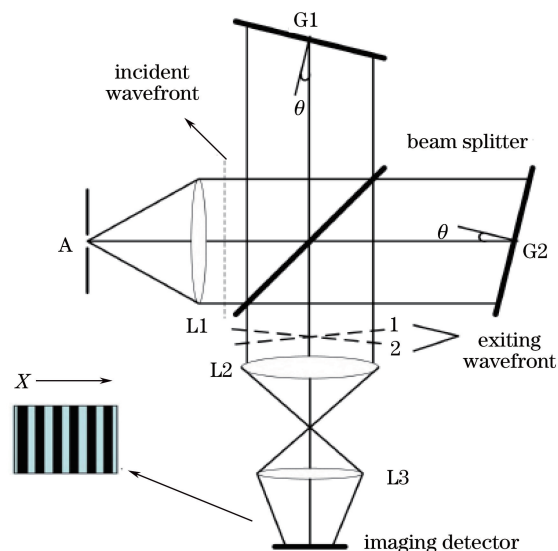


图 1 空间外差光谱仪结构原理图

Fig. 1 Structure schematic diagram of SHS

空间外差光谱技术不仅可以获取一维光谱信息,而且可以应用二维探测技术获得一维空间分布信息。在前置光学系统中加入柱面镜,总视场内的场景被分为多个(小于或等于焦平面阵列的行数)视场切片,每一个视场切片的干涉图分别成像到对应的探测器上,如图 2 所示。探测器上的一行对应视场内一个分层的光谱信息。

中高层大气 OH 自由基甚高光谱探测仪的 35 个分视场可以覆盖 70 km 高度范围(1 个分视场 2 km,即廓线分辨率为 2 km),拟采用临边观测模式对 15~85 km 高度大气进行探测,该观测模式具有垂直分辨率高、空间覆盖范围广等特点<sup>[7]</sup>,其观测几何示意图如图 3 所示。

空间外差光谱仪具有空间维分层成像功能,因此临边观测时可以同时获取不同高度层大气吸收光谱的散射辐射信号,无须像传统临边探测遥感器那样,扫描不同高度层来获取大气高度维的廓线信息。

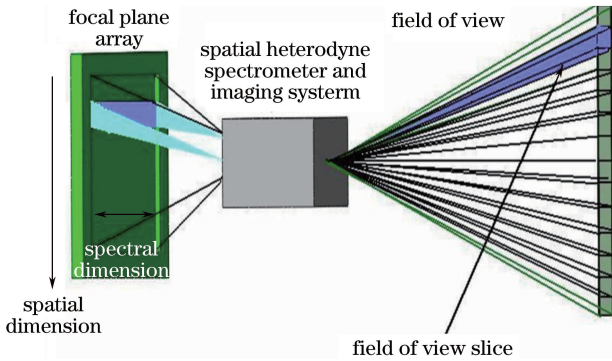


图 2 空间外差光谱仪分层成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layered imaging of SHS

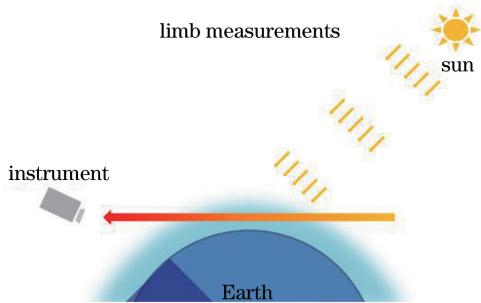


图 3 临边观测几何示意图

Fig. 3 Schematic diagram of limb mode geometry

OH 自由基在 308 nm 波段受到太阳能量激发, 发射出  $\text{OH } A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0,0)$  荧光信号, 可能发生的能级跃迁如图 4 所示<sup>[8]</sup>, 因此中高层大气 OH 自由基基高光谱探测仪的波段范围被设计为 308.2~309.8 nm。

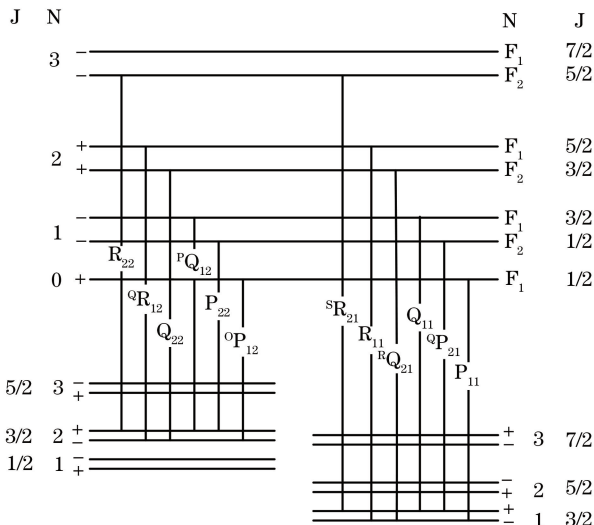


图 4 OH  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0,0)$  跃迁示意图

Fig. 4 OH  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0,0)$  allowed transition diagram

仪器在轨的观测信号包含背景散射信号与目标散射信号, 背景散射信号即大气对太阳辐射能量的吸收与散射信号, 目标散射信号即 OH 自由基受到

太阳能量激发后发出的荧光散射信号。地面大气瑞利散射背景信号远大于 OH 自由基荧光散射信号, 因此, 在地基探测时, 无法观测到 OH 自由基发射信号, 只能通过测量太阳直射信号与大气瑞利散射信号来验证仪器性能与探测能力。为满足该探测需求, 仪器的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 中高层大气 OH 自由基基高光谱探测仪主要性能指标

Table 1 Major performance indexes of ultra-spectral resolution spectrometer for mesospheric OH radicals

Parameter	Performance index
Spectral range /nm	308.2-309.8
Spectral resolution /nm	0.00825
Spectral stability /nm	0.005
Field of view /( $^{\circ}$ )	2(35 split-field of view)
Signal to noise ratio	100-200
Observe mode	Limb
Profile resolution /km	2

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验过程

为了验证中高层大气 OH 自由基基高光谱探测仪的探测能力及性能, 于 2017 年 9 月 25 日上午在中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心进行了外场实验, 大气中高层 OH 自由基基高光谱探测仪配合太阳跟踪器对太阳进行追踪, 实时获取 308 nm 波段到达地面的光谱。使用吉林风云公司生产的全自动太阳光导向系统, 实时跟踪太阳位置, 使探测仪能实时观测太阳。导向系统实时跟踪太阳光, 将光线导入探测仪入瞳处, 如图 5 所示。临边观测模式主要探测大气散射信号, 而此次直视太阳实验探测的是透射信号, 虽然观测模式不同, 但此次实验的目的是验证仪器对 308 nm 波段信号的探测能力以及对太阳直射能量的测量, 在后续实验中将进行散射信号的探测。

实验场地位于合肥西北郊, 离市区约 10 km, 场区四周湖水环抱, 远离影响大气反演的污染源。场地四周开阔, 实验期间无对阳光产生遮挡的物体。场区的地理位置为北纬  $31^{\circ}54'$ , 东经  $117^{\circ}09'$ 。

根据实验时间与当地经纬度计算太阳天顶角与方位角, 得到实验参数如表 2 所示。

#### 3.2 数据处理

干涉型光谱仪直接得到的是干涉数据, 需要对干涉数据进行误差修正与光谱复原, 得到最终光谱数据<sup>[9]</sup>。探测到的原始干涉图如图 6(a)所示, 直接

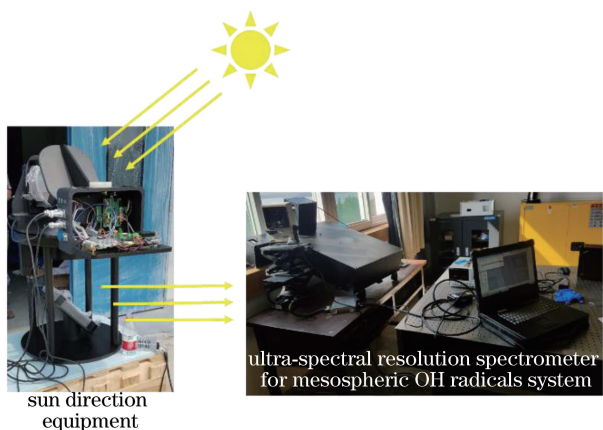


图 5 中高层大气 OH 自由基基高光谱探测仪太阳观测系统  
 Fig. 5 Ultra-spectral resolution spectrometer for mesospheric OH radical for sun-observing system

表 2 实验相关参数表

Table 2 Experiment parameters

Parameter	Performance index
Time	2017-09-25T11:30:00
Latitude, longitude	31°54'N, 117°09'E
Solar zenith angle	45.07°
Solar azimuth angle	171.26°
Weather	Clear sky

观测太阳时,太阳光线发散角小于仪器视场角,使得太阳不能充满整个视场,因此在  $1024 \times 1024$  的探测器面上只有约 300 行可视有效信号区,将这一区域截取出来作为有效干涉数据进行处理。图 6(b) 为原始单行干涉数据和经过去暗电流、去基线后的干涉数据, DN 为遥感影像像元亮度值,记录地物的灰度值。

对图 6(b)的干涉数据进行相位校正<sup>[10]</sup>和充零傅里叶变换,得到定标前的光谱,如图 7(a)所示。对该光谱加载光谱定标系数与辐射定标系数,得到如图 7(b)所示的定标后光谱。

### 3.3 辐射传输模拟

利用德国 Bremen 大学遥感研究所针对 SCIAMACHY 开发的大气辐射传输软件 SCIATRAN 进行计算,软件版本型号为 SCIATRAN 3.3.2。该软件可模拟波段范围为  $175.44 \text{ nm} \sim 40 \mu\text{m}$ ,包含了 23 种相关大气痕量气体的吸收特征(其中包括所需要研究的 OH 自由基),并拥有稳定的输入参数,如中性大气成分、太阳光谱、吸收截面和大气微量成分的垂直廓线。而且,还包含了气溶胶、地表反照率模型和适合的仪器响应函数,在反演计算模块中能快速运行<sup>[11-12]</sup>。

输入的太阳光谱为 ACE-FTS 在轨获得的高分

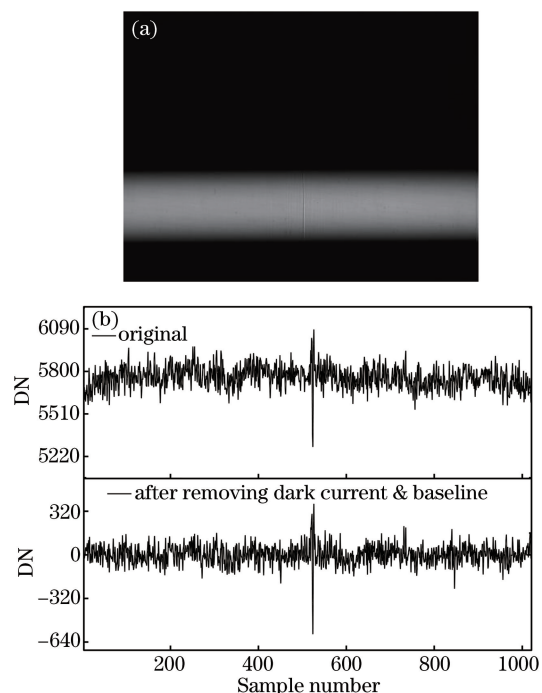


图 6 (a)原始干涉图;(b)原始单行干涉图与去暗电流、去基线处理后单行干涉图

Fig. 6 (a) Original interferogram; (b) original row interferogram and row interferogram after removing dark current and baseline

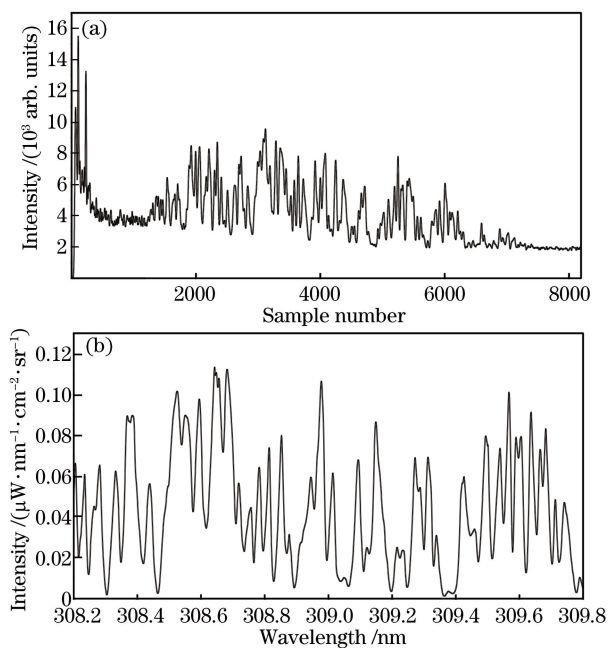


图 7 (a)定标前光谱;(b)定标后光谱

Fig. 7 (a)Spectrum before calibration; (b)spectrum after calibration

辨率太阳光谱,在模拟所需的  $308 \sim 310 \text{ nm}$  波段具有较高的光谱分辨率,所用太阳光谱数据如图 8 所示。

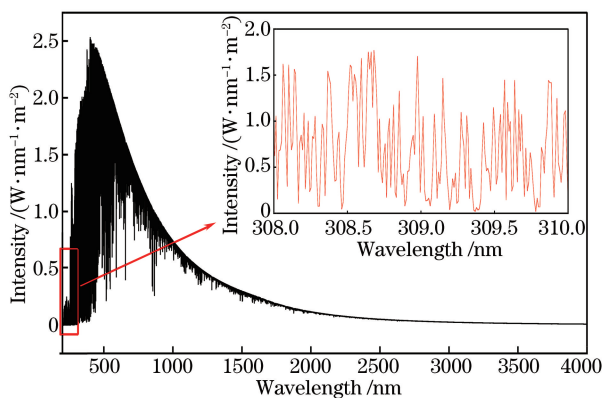


图 8 太阳光谱  
Fig. 8 Solar spectrum

根据实验相关参数,对辐射传输模型设置<sup>[13]</sup>如表 3 所示。

表 3 主要辐射传输设置参数

Table 3 Main setting in radiative transfer model

Parameter	Performance index
Spectral range /nm	308.2-309.8
Spectral step /nm	0.0001
Half width at half maximum of ILS /nm	0.0041
Solar zenith angle / (°)	45.07
Solar azimuth angle / (°)	171.26
Observe mode	Zenith
Atmospheric model	Bremen 2D model
Atmospheric profiles database	SCIATRAN Database in October at 30°N
Latitude, longitude	31°54'N, 117°09'E
Boundary layer aerosol type	Rural

Note: ILS is instrument line shape

### 3.4 实验结果对比

经过定标后的观测太阳光谱与理论上地面接收的太阳光谱比较如图 9 所示。

由图 9 可知,模拟光谱强度略大于实测光谱强度,这可能是由于辐射传输设置并未完全符合实际测量状态,如气溶胶类型不能完全反映大气气溶胶状态,后续研究将考虑使用当地实时温湿压数据与全自动太阳光度计(CE318)测得的实时气溶胶光学厚度数据对相关参数进行替换,使模拟结果更加准确。辐射传输计算时,卷积的仪器线型函数为半峰全宽(HWHM)等于 0.0041 nm 的高斯函数,可以看出模拟光谱与实测光谱线型匹配较好,说明实测光谱的光谱分辨率约为  $0.0041 \times 2 = 0.0082$  nm。结果显示,实测结果与模拟结果的特征光谱一致,匹配度很高。

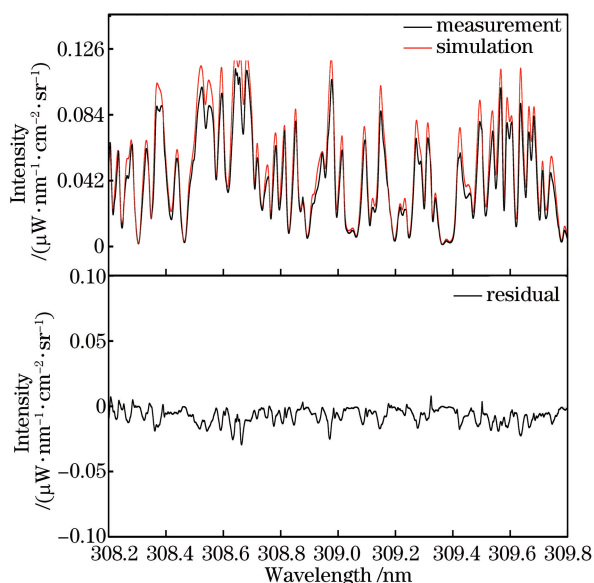


图 9 实测光谱与模拟光谱比较

Fig. 9 Comparison between measurement and simulation

## 4 结 论

利用基于空间外差光谱技术的中高层大气 OH 自由基甚高光谱探测仪,对紫外 308 nm 波段太阳直射光谱进行测量,在国内获得了紫外波段高分辨率太阳光谱。实测结果与模拟结果比对可知,特征光谱匹配一致,验证了中高层大气 OH 自由基甚高光谱探测仪的探测能力与性能,验证了在轨探测多谱段、宽谱段太阳光谱与 OH 目标信号的可行性,为在轨探测 OH 目标信号提供了理论与实验基础。由于该谱段大气吸收较为单一,主要为臭氧吸收,因此在后续的研究中,可以通过剔除臭氧吸收等方法反推大气层顶太阳光谱,获得高分辨率大气层顶太阳光谱数据,为地基、天基探测的辐射传输计算提供可靠的输入光源数据。

### 参 考 文 献

- [1] Zheng R. Research on solar radiation observation instrument and the calibration technique[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015.  
郑茹. 太阳辐射观测仪及其标定技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [2] Cageao R P, Ha Y L, Jiang Y, et al. Calculated hydroxyl  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0, 0)$  band emission rate factors applicable to atmospheric spectroscopy [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer, 1997, 57(5): 703-713.
- [3] Conway R R, Stevens M H, Brown C M, et al.

- Middle atmosphere high resolution spectrograph investigation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(13): 16327-16348.
- [4] Waters J W, Froidevaux L, Harwood R S, *et al.* The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the Aura satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1075-1092.
- [5] Englert C R, Stevens M H, Siskind D E, *et al.* Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D20306): 1-20.
- [6] Hanlander J, Roesler F L. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for ground-based and space astronomy[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1990, 1235: 622-633.
- [7] Kaiser J W. Atmospheric parameter retrieval from UV-vis-NIR limb scattering measurements[D]. Bremen: University of Bremen, 2001.
- [8] Anderson J G. Rocket-Born ultraviolet spectrometer measurement of OH resonance fluorescence with a diffusive transport model for mesospheric photochemistry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76: 4634-4652.
- [9] Li Z W. Key techniques of spectral reconstruction applied for spatial heterodyne spectrometer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
李志伟. 空间外差光谱仪光谱重构关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [10] Shi H L, Xiong W, Li Z W, *et al.* Phase error correction of spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0330003.  
施海亮, 熊伟, 李志伟, 等. 空间外差光谱仪相位误差修正[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0330003.
- [11] Wang Z J. Study on retrieval of atmospheric trace gas concentrations from satellite based limb radiance[D]. Changchun: Jilin University, 2011.  
汪自军. 基于卫星临边辐射的大气痕量气体含量反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [12] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, *et al.* SCIATRAN 2.0: A new radiative transfer model for geophysical applications in the 175-2400 nm spectral region[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(5):1015-1019.
- [13] Rovarov V V, Rozanov A V. User's guide for the software package SCIATRAN: version 3.2, institute of remote sensing[D]. Bremen: University of Bremen, 2013.