

利用空间外差光谱技术进行紫外高分辨率大气散射信号探测

方雪静^{1, 2, 3}, 罗海燕^{1, 3}, 施海亮^{1, 3}, 李志伟^{1, 3}, 胡广骁^{1, 2, 3},
金伟^{1, 2, 3}, 张纪承^{1, 2, 3}, 熊伟^{1, 2, 3*}

1. 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
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026
3. 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 羟基 OH 对于人类理解中间层化学成分非常重要, 它是大气光化学反应中重要的氧化剂, OH 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。为了探测中间层大气中 OH 自由基的紫外共振荧光发射信号, 从复杂背景信号中分离目标信号, 研制了中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪, 光谱范围为 308.2~309.8 nm, 光谱分辨率为 0.008 25 nm。临边观测主要探测大气散射信号, 能量来源为大气中的粒子, 包括大气分子与气溶胶、云等对太阳能量的散射作用。中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪基于空间外差光谱技术, 可以在设计的闪耀波长范围内获得极高的光谱分辨率, 适用于大气成分的精细探测。通过在前置或后置光学系统中加入柱面镜, 总视场内的场景被分成多个视场切片, 每一个视场切片的干涉图分别成像到对应的探测器行上。利用空间外差光谱仪具有空间维分层成像功能, 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, 无需像传统临边探测遥感器在不同高度层进行扫描来获取大气高度维的廓线信息。为了验证中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的临边散射信号探测能力与对观测几何的敏感性, 进行了地面临边观测实验, 探测紫外 308 nm 波段大气散射信号。模拟临边观测几何, 选取晴朗无云的一天, 在空旷场地对大气散射信号进行观测。由于仪器基于空间外差光谱技术, 需要对干涉数据进行干涉误差修正与光谱复原。对一段观测时间内间隔 10 分钟的干涉数据进行光谱复原并定标, 得到最终临边观测光谱。由于散射信号的主要来源为大气分子对太阳光的散射作用, 因此光谱中应包含太阳光谱高分辨率精细特征信息。从高分辨率太阳光谱中选取三个特征信息窗, 分析观测光谱中对应波段, 三个特征信息窗完全匹配, 验证了中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的超高分辨率光谱探测能力和光谱精细信息提取能力。将太阳辐射计实时测量获得的气溶胶光学厚度及根据观测时间计算的太阳天顶角与太阳方位角输入辐射传输模型 SCIATRAN, 结合对应日期与经纬度的大气廓线数据库, 得到模拟光谱, 将实测结果与辐射传输模型结果进行比对, 两者残差较小。实测结果与模拟结果存在的残差, 可能是由于大气环境参数并没有完全符合实测状态, 后续可使用当地实时温湿压廓线对模拟数据库进行替换, 使辐射传输模型更接近实际状态。与辐射传输模型对比的结果验证了中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的散射信号探测能力与对观测几何的敏感性, 验证了在轨探测多谱段、宽谱段大气散射光谱与 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。

关键词 空间外差光谱技术; 临边; 大气散射; 高分辨率 SCIATRAN

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0357-06

收稿日期: 2018-01-24, 修订日期: 2018-04-15

基金项目: 合肥物质科学研究院院长基金项目(YZJJ201607), 国家自然科学基金项目(11703061, 41605014), 遥感科学国家重点实验室开放基金项目(Y7Y00100KZ)资助

作者简介: 方雪静, 女, 1991年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: fxj126@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: frank@aiofm.ac.cn

引言

大气遥感探测主要有天底观测、临边观测、掩星观测等观测模式。天底观测具有高水平空间覆盖范围与分辨率，但通常不具有垂直分辨能力；掩星观测具有高垂直空间分辨率；而将两者结合的临边观测既具有高垂直空间分辨率，又具有高水平空间覆盖范围^[1]。临边观测主要探测大气散射信号，能量来源为大气中的粒子，包括大气分子与气溶胶、云等对太阳能量的散射作用。利用探测到的散射光谱，可获得痕量气体、气溶胶和云等的垂直分布信息。国外在紫外波段具有临边观测模式的载荷有 SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography)^[1]、OSIRIS (optical spectrograph and infrared imager system)^[2-3]、SHIMMER^[4] (spatial heterodyne imager for mesospheric radicals) 等。其中 SCIAMACHY 在紫外波段的光谱分辨率为 0.25 nm，而 OSIRIS 在紫外波段的光谱分辨率约为 1 nm。基于空间外差光谱技术的 SHIMMER 探测 OH $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0,0)$ 308 nm 波段太阳共振荧光发射光谱，其光谱分辨率为 0.024 nm，并由在轨数据反演得到了更接近光化学模型的 OH 自由基空间分布。对于光谱分辨率为 1 nm 的 OSIRIS，难以将目标信号从大气背景散射信号里分离出来；而对于探测中层大气的光谱分辨率为 0.024 nm 的 SHIMMER，可以轻易将 OH 信号与大气背景散射信号分离。由于光谱分辨率的限制，从光谱信息中解析有效目标信息的能力有限，因此，需要更高分辨率的临边观测仪器来对大气进行临边探测，从而获取更精细的观测信息。

本文基于空间外差光谱技术设计的中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪获得 308 nm 波段高分辨率大气散射光谱，在该波段光谱分辨率达到 0.1 Å，为在轨临边精细探测高分辨率散射光谱提供了理论与实验基础。

1 实验部分

中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪基于空间外差光谱技术，可以在设计的闪耀波长范围内获得极高的光谱分辨率，适用于大气成分的精细探测。

非成像空间外差光谱仪光学系统结构如图 1 所示^[9]，衍射光栅 grating1, grating2 代替了传统迈克尔逊干涉仪中的两个平面反射镜。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两束相干光：一束经分束器反射后入射到光栅 grating1 上，并经光栅 grating1 衍射后返回分束器；另一束透过分束器入射到光栅 grating2 上，经光栅 grating2 衍射后反射回到分束器上。两出射光束在出射面上形成干涉条纹，并由光学成像系统 L2 和 L3 成像记录于探测器上。记录不同光程差处的干涉条纹函数，并通过一定的算法即可复原待测的光谱曲线。

通过在前置或后置光学系统中加入柱面镜，总视场内的场景被分成多个(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行上，如

图 2 所示。探测器上若干行对应于视场内一个分层的光谱信息。

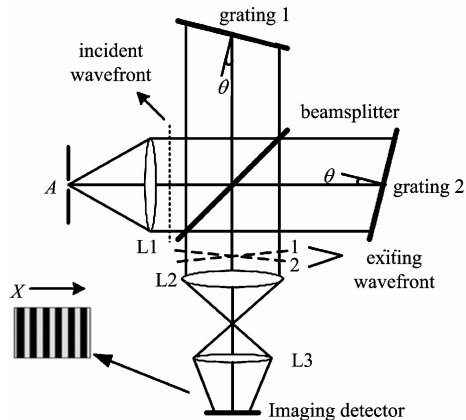


图 1 空间外差光谱仪结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SHS

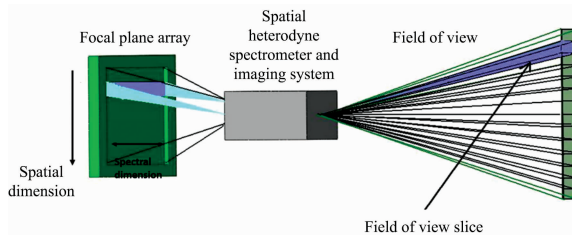


图 2 空间外差光谱仪分层成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layered imaging of SHS

假设仪器位于 500 km 在轨轨道高度进行临边观测模式，中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的 35 个分视场可以覆盖约 70 km 高度范围(1 个分视场 2 km，即廓线分辨率为 2 km)。利用空间外差光谱仪具有空间维分层成像功能，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，无需像传统临边探测遥感器在不同高度层进行扫描来获取大气高度维的廓线信息。散射能量的来源主要包括大气分子对太阳能量的单次散射与多次散射、来自地表的反射与散射等，其观测几何与散射能量主要来源如图 3 所示。

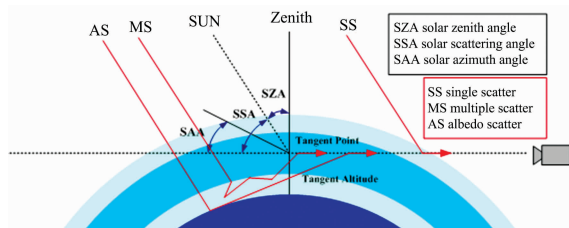


图 3 临边观测几何与散射能量来源

Fig. 3 Schematic diagram of limb mode geometry and source of scattered radiation

该探测仪的目标物质为羟基(OH)，OH 在 308 nm 波段受到太阳能量激发，发射出 OH $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0,0)$ 荧光信

号^[6], 因此中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的波段范围设计为 308.2~309.8 nm。

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发射散射信号。在 30 km 以下, 大气瑞利散射背景信号远大于 OH 自由基荧光散射信号^[6], 因此, 在地基观测时, 无法从信号光谱中分离出目标 OH 自由基发射信号, 只能通过测量大气瑞利散射即背景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 自由基超分辨空间外差光谱仪主要性能指标

Table 1 Major performances of hyper-spectral resolution spectrometer for mesospheric OH radical

Parameters	Performance index
Spectral range	308.2~309.8 nm
Spectral resolution	0.008 25 nm
Spectral stability	0.005 nm
Field of view	$\pm 0.78^\circ$ (35 split-fields of view)
SNR(Signal to noise ratio)	100~200
Observation Mode	Limb
Profile resolution	2 km

2 结果与讨论

为了验证中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的探测能力及性能, 于 2017 年 10 月 28 日上午在位于安徽合肥的安徽光学精密机械研究所进行了大气临边散射光观测实验。实验场地位于合肥西北郊, 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, 适合进行临边观测。临边观测模式主要探测大气散射信号, 实验的目的是验证仪器对 308 nm 波段范围散射信号的探测能力。实验中还使用 CE318 太阳辐射计来获得实时气溶胶光学厚度, 使辐射传输模拟更接近实际状态。实验现场如图 4 所示, 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。



图 4 中高层大气 OH 自由基超光谱探测仪大气散射观测实验
Fig. 4 Scattered radiation observation by hyper-resolution spectrometer for mesospheric OH radical

表 2 实验相关参数表

Table 2 Experiment parameters

Parameters	Values
Time	2017.10.28 10:40—12:00
Latitude, Longitude	117°09'E, 31°54'N
Solar zenith angle	48.18°~45.01°
Solar azimuth angle	155.04°~181.61°
Weather	Clear sky

在 10:40—12:00 时间段连续探测, 其中一幅原始干涉图与单行干涉数据如图 5 所示。

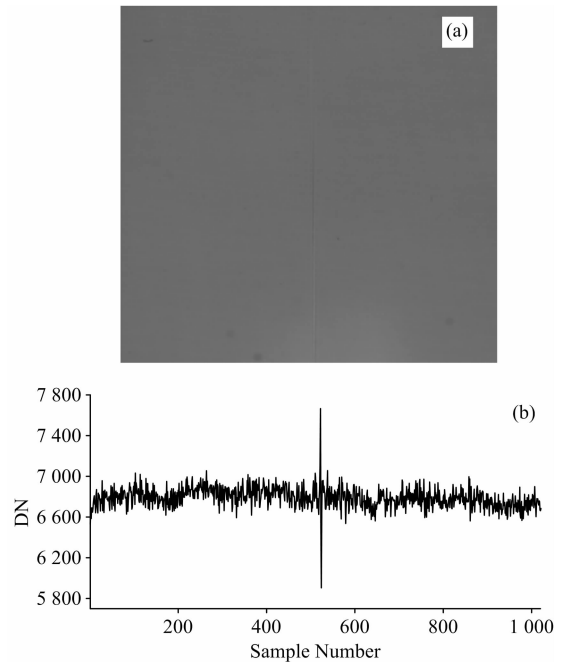


图 5 (a) 原始干涉图; (b) 原始单行干涉图

Fig. 5 (a) Original interferogram; (b) Original row interferogram

由于探测仪基于空间外差光谱技术, 因此采用干涉数据光谱复原方法, 对干涉数据进行去基线、相位校正、充零傅里叶变换等处理, 得到最终光谱数据^[7-8]。

在地面实验中我们获得了一系列数据, 其数据处理具有相似性, 这里取 2017 年 10 月 28 日上午 10:45—11:55, 间隔 10 min 选取一副干涉图像进行处理, 得到定标前与定标后的观测光谱分别如图 6 所示。

由于太阳与仪器相对位置的变化以及云的运动, 造成不同时刻的信号大小不同。

选取观测时间为 11:30 的一条光谱, 根据实测数据实时环境与 CE318 太阳辐射计实时气溶胶光学厚度数据, 利用 Bremen 大学开发的 SCIATRAN 辐射传输模型进行模拟^[9-11], 辐射传输设置如表 3 所示。

输入的太阳光谱为 ACE-FTS^[12] (atmospheric chemistry experiment-Fourier transform spectrometer) 在轨获得的高分辨率太阳光谱, 在模拟的 308~310 nm 波段具有较高的光谱分辨率, 所用太阳光谱数据如图 7 所示。由于大气散射能量

的主要来源为大气分子对太阳光的散射作用，并且在 308 nm 波段仅有 O₃ 的连续吸收，对太阳特征谱线没有影响，因此选取太阳光谱 308 nm 波段部分特征信息区域 A, B 和 C 作为判断仪器探测能力的依据，验证仪器高分辨率探测结果对重要特征信息的保留程度。

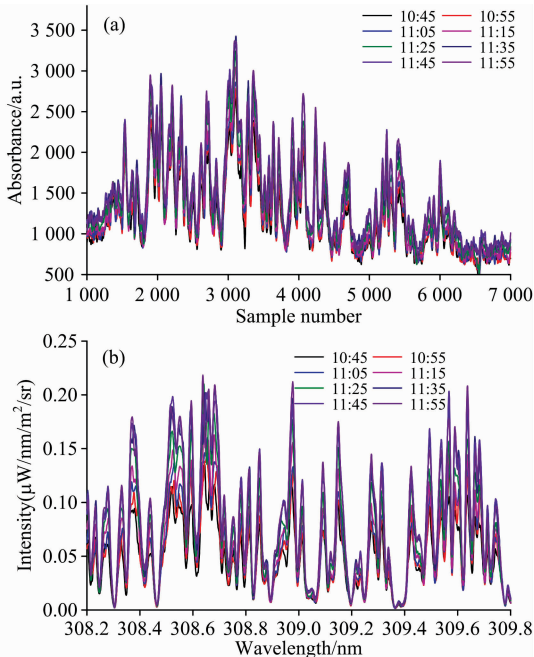


图 6 (a) 定标前; (b) 定标后不同时刻观测光谱
Fig. 6 Spectrum in different time (a) before calibration (b) after calibration

表 3 主要辐射传输设置参数

Table 3 Main settings in radiative transfer model

Parameters	Settings
Spectral range	308.2~309.8 nm
Spectral step	0.000 1 nm
HWHM (half width at half maximum) of ILS	0.004 1 nm
Solar zenith angle	45.40°
Azimuth angle	171.34°
Observe mode	Zenith
Atmospheric model	Bremen 2D model
Atmospheric profiles database	SCIATRAN Database in October at 30°N
Latitude, Longitude	117°09'E, 31°54'N
AOT@340 nm	0.81

经过光谱定标与辐射定标，大气散射光谱与辐射传输模拟光谱结果对比如图 8 所示。

实测结果与模拟结果存在一定误差，可能是由于大气环境参数并没有完全符合实测状态，后续可使用当地实时温湿

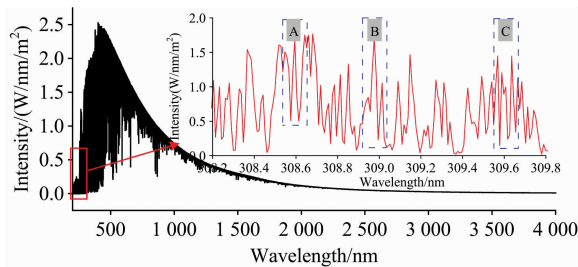


图 7 ACE-FTS 探测的太阳光谱
Fig. 7 Solar spectrum by ACE-FTS

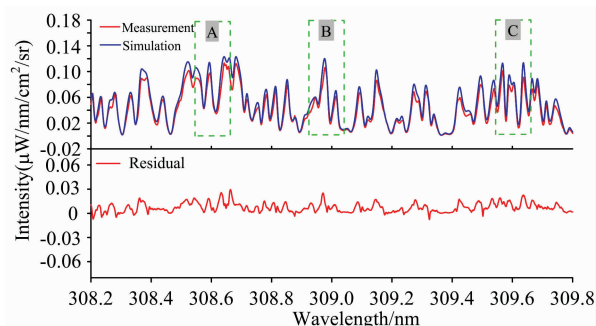


图 8 实测结果与模拟结果及残差
Fig. 8 Results of measurement, simulation and residual

压廓线对模拟数据库进行替换，使辐射传输模型更接近实际状态。实测结果与辐射传输模型结果的一致性都表明，中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪具有对大气散射信号的探测能力。辐射传输计算时，卷积的仪器线型函数为半高宽等于 0.004 1 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，因此说明实测光谱的光谱分辨率约为 $0.004 1 \times 2 = 0.008 2 \text{ nm}$ ，实现了超高光谱分辨率探测。对比从输入的太阳光谱数据中选取的 A, B 和 C 三个特征窗，从图 8 中可以看出选取的 A, B 和 C 特征线信息都完整保留，实现了高分辨率光谱特征信息的探测与提取。

3 结论

利用基于空间外差光谱技术的中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪，进行了地面观测实验，对紫外 308 nm 波段大气散射光谱进行测量，获得了紫外波段超高分辨率大气散射光谱。地面实验验证了仪器对大气散射光谱的探测能力与仪器对临边观测几何变化的敏感性。根据实测结果与模拟结果、太阳光谱的比对，特征光谱匹配一致，验证了中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪的探测能力与性能，验证了在轨探测多谱段、宽谱段大气散射光谱与 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。

References

- [1] Kaiser J W, Atmospheric Parameter Retrieval from UV-Vis-NIR Limb Scattering Measurements. Bremen: University of Bremen, 2001.
- [2] Gattinger R L, Degenstein D A, Llewellyn E J. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D13303.
- [3] Llewellyn E J, Lloyd N D, et al. *Canadian Journal of Physics*, 2004, 82: 411.
- [4] Englert C R, Stevens M H, Siskind D E, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D20306.
- [5] Hanlander J, Roesler F L. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1235: 622.
- [6] Cageao R P, Ha Y L, Jiang Y, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 1997, 57: 703.
- [7] LI Zhi-wei(李志伟). Hefei: University of Chinese Academy of Sciences(合肥: 中国科学院大学), 2015.
- [8] SHI Hai-liang, LI Zhi-wei, LUO Hai-yan, et al(施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(3): 933.
- [9] WANG Zi-jun(汪自军). Jilin: Jilin University(吉林: 吉林大学), 2011.
- [10] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, et al. *Advances in Space Research*, 2005, 36: 1015.
- [11] Rozanov V V, Rozanov A V. University of Bremen, Germany, 2013.
- [12] Marc-Andre Soucy, Francois Chateaufneuf, Christophe Deutsch, et al. *Proceedings of SPIE*, 0277-786X, 2002.

High-Resolution Scattered Radiation Measurement in Ultraviolet Band Based on Spatial Heterodyne Spectroscopy Technique

FANG Xue-jing^{1, 2, 3}, LUO Hai-yan^{1, 3}, SHI Hai-liang^{1, 3}, LI Zhi-wei^{1, 3}, HU Guang-xiao^{1, 2, 3}, JIN Wei^{1, 2, 3}, ZHANG Ji-cheng^{1, 2, 3}, XIONG Wei^{1, 2, 3*}

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract The hydroxyl (OH) radical is the most important oxidizing agent in the photochemical reactions which helps to understand the atmospheric components and photochemistry events in mesosphere. OH radical's solar resonance fluorescence $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(0,0)$ is the excited emergent light by solar radiation around 308 nm. Hyper-spectral Resolution Spectrometer for Mesospheric OH Radical is developed to detect OH ultraviolet solar resonance fluorescence in mesosphere and separate target signal from complex background signal. The spectral range is 308.2~309.8 nm and its spectral resolution is 0.008 25 nm. Limb observation mode detects atmospheric scattering signal which consists of atmospheric molecules, aerosols and cloud scattered by solar energy. Hyper-spectral Resolution Spectrometer for Mesospheric OH Radical is based on Spatial Heterodyne Spectroscopy technique. SHS technique receives rather high spectral resolution around Littrow wavelength and is applicable to fine detection of atmospheric components. Adding cylindrical lens front or behind the optical system results in several split-fields of view. Each split corresponds line of detector imaging plane. Limb observation can obtain limb-scattered signal at different height simultaneously using layered imaging in spatial dimension with SHS technique rather than traditional limb detector scanning at different height. In order to validate detection ability and sensitivity to observation geometry of Hyper-spectral Resolution Spectrometer for Mesospheric OH Radical, a ground-based limb observation experiment is built up to detect atmospheric limb-scattered signal around 308 nm. Simulating limb mode geometry in a clear sky, limb-scattered radiation is detected in an open place. Interferogram error correction and spectrum restoration are needed due to the fact that the instrument is based on SHS. Spectrum restoration and calibration are done to a serial interferogram data at 10 min interval in a period of observation time to obtain final spectrum. The source of scattered radiation is the atmospheric molecule's scattering of sunlight, so the spectrum should contain high-resolution features information of solar spectrum. Choose 3 feature windows from high-resolution solar spectrum and analyze correspond band in observation spectrum. It turns out that the feature windows match completely. The results can validate detection ability and fine spectrum extracting ability of Hyper-spectral Resolution Spectrometer for Mesospheric OH Radical. Radiative transfer model is set using real time aerosol optical thickness measured by solar radiometer, real time solar zenith and azimuth angle and atmospheric profiles with corresponding date, longitude and latitude. A comparison is taken between simula-

tion spectrum and observation spectrum. Their residual is rather small. The residual between them due to the mismatch between atmospheric parameters setting and actual situation. Real time temperature and pressure profiles are considered to bring in radiative transfer model in the future. These results validate limb-scattered radiation detection ability and fine spectrum extracting ability and sensitivity to observation geometry of Hyper-spectral Resolution Spectrometer for Mesospheric OH Radical. The experiment results not only validate the feasibility in detecting multi-band and broad-band limb-scattered signal and OH target signal on orbit, but also provide theoretical and experimental foundation for orbital limb-scattering signal detection.

Keywords Spatial heterodyne spectroscopy technique; Limb; Scattered radiation; High resolution; SCIATRAN

(Received Jan. 24, 2018; accepted Apr. 15, 2018)

* Corresponding author