

# 中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪

罗海燕<sup>1,2</sup>, 方雪静<sup>1,2,3</sup>, 胡广晓<sup>1,2,3</sup>, 施海亮<sup>1,2</sup>, 熊伟<sup>1,2\*</sup>

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

<sup>2</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;

<sup>3</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 针对中高层大气 OH 自由基的星载探测应用, 给出一种基于空间外差光谱技术的临边探测方案。借助卫星平台的运动, 呈正交布置的双通道光谱仪可以分时获取同一区域的一系列视线观测辐亮度, 最终反演 OH 自由基密度的三维分布。每个通道均包含柱面望远、准直镜头、一体化空间干涉组件和成像镜头, 可以同时探测不同高度层的 OH 自由基辐亮度, 具有光通量大、结构稳定、小型化等特点。以紫外波段(308.2~309.8 nm)和光谱分辨率优于 0.01 nm 的要求进行中高层大气 OH 自由基临边探测为例, 给出了光学系统设计的过程和结果, 并利用太阳跟踪器进行了地基太阳光谱观测实验。结果表明: 光学系统设计可满足探测指标的要求, 实测太阳光谱与理论光谱特征一致性较好, 为星载中高层大气遥感探测技术提供了参考。

**关键词** 光谱学; 空间外差光谱仪; 超分辨紫外光谱; OH 自由基; 中高层大气

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0630003

## Hyper-Resolution Spatial Heterodyne Spectrometer for Hydroxyl Radical OH

Luo Haiyan<sup>1,2</sup>, Fang Xuejing<sup>1,2,3</sup>, Hu Guangxiao<sup>1,2,3</sup>, Shi Hailiang<sup>1,2</sup>, Xiong Wei<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** A hyper-resolution spatial heterodyne spectrometer (SHS) used for hydroxyl radical OH detection with limb observations from a satellite is presented. The SHS instrument, consisting of two 1-D imaging channels in two orthogonal observation directions at different time for the same volume with the aid of the movement of the satellite platform, can get the three-dimensional distribution of OH with a series of observation radiation intensities. Each channel, including cylindrical telescope, collimating lens, a monolithic spatial interference unit and imaging lens, has vertical spatial resolution without scanning parts, and it can be field widened with prisms in the interferometer arms to increase the throughput of the instrument. An optical system for measuring mesospheric OH with a spectral resolution of 0.01 nm over the 1.6 nm ultraviolet passband 308.2-309.8 nm is designed, and its optimizing process and results are shown. The ground-based experiment with the prototype instrument is carried out with the use of the light from the sun tracker. The measurement results show that the optical system design meet the needs of OH detection requirements, and the instrument experimental performances are in agreement with the theoretical spectral characteristics. Our research provides a basis for remote sensing of mesospheric atmosphere detection in satellite.

**Key words** spectroscopy; spatial heterodyne spectrometer; hyper-resolution ultraviolet spectrum; hydroxyl radical OH; mesospheric atmosphere

**OCIS codes** 300.6540; 300.6320; 010.0280; 120.6200

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(41605014, 11703061)、合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201607)、实验室创新基金(CXJJ-17S002)、遥感科学国家重点实验室开放基金(Y7Y00100KZ)

作者简介: 罗海燕(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事高光谱遥感仪器光机设计及机理方面的研究。

E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: frank@aiofm.ac.cn

# 1 引 言

中高层大气(距地面 20~100 km)中存在着复杂的光化学现象和动力学过程,该区域的大气参数不仅直接影响飞行器的安全和轨道控制精度,而且对研究中长期天气预报也具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。中高层大气中的 OH 自由基作为一种“氧化剂”,对研究臭氧层的破坏和中间顶层水汽浓度的反演具有重要意义。

美国海军实验室的 Harlander 等<sup>[3-4]</sup>设计了一种中高层 OH 自由基空间外差成像仪(SHIMMER),并于几年后搭载 STPSat-1 进行了全球中高层大气 OH 自由基的探测,所获取的观测结果与微波临边探测仪(MLS)实测结果、标准光化学反应理论模型结果比较符合<sup>[5]</sup>。在国内,针对中高层大气的探测设备和相关研究报道主要集中在地基探测模式上<sup>[6-7]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所进行了空间外差光谱技术的研究<sup>[8]</sup>,以大气中的主要温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>为探测对象,通过获取各气体吸收光谱信息,反演大尺度范围内大气主要温室气体的柱总量,从而为污染减排、环境外交等服务<sup>[9-10]</sup>,但针对星载中高层大气的超光谱探测目前仍处于起步阶段。

针对中高层大气 OH 自由基的三维层析探测,

本课题组设计了一种基于双通道视场配准的中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪,该系统具有同时探测不同高度层(15~85 km)大气 OH 自由基数密度的能力。每个通道的光学原理和详细设计一致,通过平台运动呈正交布局的两通道可以获取同一观测区域的一系列视角的观测值,并利用观测值修正、迭代反演过程中的先验信息,提高了层析探测精度。本文首先介绍了空间外差光谱仪分视场同时成像的技术原理,针对 308.2~309.8 nm 工作波段的需求,设置参考波长为 307 nm,着重分析了各功能组件基本参数之间的关系,完成了全系统的光学设计及优化,最后通过实测太阳直射光谱验证了系统的探测能力。

# 2 空间外差分视场同时成像技术原理

分视场同时成像空间外差干涉光谱技术是在传统空间外差技术基础上发展起来的,对前置功能镜头或后置成像镜头的子午面和弧矢面分别进行光束整形,从而满足在子午面上一维成像、弧矢面均匀照明的需求。图 1 所示为采用前置功能镜头实现空间外差分视场同时成像的工作原理图,每个通道的光谱仪均由柱面望远、准直镜头、空间干涉组件、成像镜头和探测器组成,前置功能镜头由柱面望远和准直镜头组成。

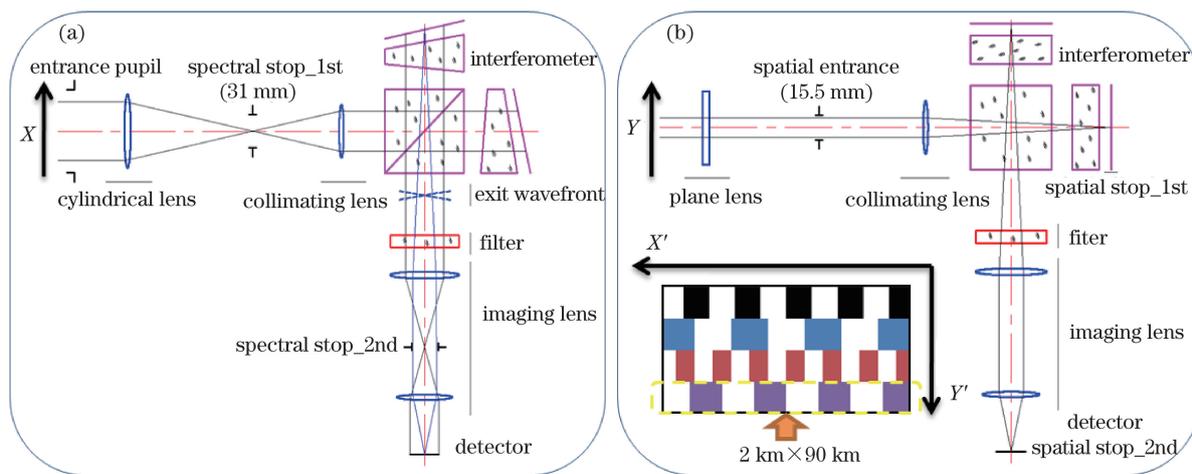


图 1 (a)色散主截面光学原理示意图及(b)分视场成像方向光学原理示意图  
Fig. 1 (a) Schematic of principle of optics in dispersive cross section and (b) schematic of principle of optics in 1-D imaging direction

空间干涉组件是仪器的核心元件,迈克耳孙干涉仪两臂中的平面反射镜分别用衍射光栅代替,系统的参考波长  $\lambda_L$  由光栅衍射角  $\theta_L$ 、衍射级次  $m$  和刻线密度  $d$  确定,光谱分辨率  $\delta_\sigma$  由光栅色散方向尺寸  $W$  和衍射角  $\theta_L$  决定:

$$2d \sin \theta_L = m\lambda_L, \quad (1)$$

$$\delta_\sigma = \frac{W \sin \theta_L}{4}. \quad (2)$$

在色散主截面内,参考波长  $\lambda_L$  经分束器以光栅衍射角  $\theta_L$  入射至两臂光栅后沿原光路返回,两臂光

束在出射面形成的波面夹角为零;非参考波长  $\lambda$  入射至光栅,并遵循光栅衍射方程出射,两臂光束在出射面上形成一定的波面夹角,该夹角与干涉条纹频率  $f_\sigma$  相关。当在空间维  $Y$  方向上设置不同的输入波长  $\sigma$  时,在探测器  $Y'$  方向不同行上调制出不同空间频率  $f_\sigma$  的干涉条纹:

$$f_\sigma = 4(\sigma - \sigma_L) \tan \theta_L. \quad (3)$$

对于入射光谱辐亮度  $B(\sigma)$ ,其任意光程差采样点  $x$  处,干涉强度表达式  $I(x)$  为

$$I(x) = B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi 4(\sigma - \sigma_L)x \tan \theta_L]\}, \quad (4)$$

式中:  $\sigma, \sigma_L$  分别为  $\lambda, \lambda_L$  对应的波数。

中高层大气 OH 自由基数密度随着高度层变化而变化,即对应于如图 1 所示  $Y$  方向上分布的入射光谱辐亮度  $B(\sigma)$  变化;通过柱面望远和准直镜头参数匹配设计,同时完成在  $Y$  方向上分视场成像和  $X$  方向上均匀照明的功能;最终通过干涉图像复原光谱算法解析 OH 自由基数密度的垂直廓线。如图 1(b) 所示探测器面的干涉图像,经 22.75 个像元合并后的一条干涉图对应的垂直与水平大气范围为  $2 \text{ km} \times 90 \text{ km}$ 。

### 3 光学系统设计

光学系统设计需要根据中高层大气 OH 自由基探测仪的光谱范围、光谱分辨率、信噪比、空间分辨率和卫星平台所处的轨道高度等参数来确定系统初始的光学输入。参考文献[3-5]已指出,反演所需的光谱范围为  $308.2 \sim 309.6 \text{ nm}$ ,光谱分辨率为  $0.024 \text{ nm}$ ,信噪比为  $100 \sim 200$ 。基于中国科学院安徽光学精密机械研究所在空间外差干涉光谱复原方法和 OH 荧光发射信号有效波段方面的研究,光谱分辨率和光谱带宽均得到了相应改善,分别达到了  $0.0085 \text{ nm}$  和  $308.2 \sim 309.8 \text{ nm}$ 。假设仪器位于距地面  $500 \text{ km}$  处的太阳同步轨道,探测垂直空间分辨率为  $2 \text{ km}$ ,同时考虑在空间维方向上利用探测器一定行数进行暗电流监测等要求,将以上参数作为光学系统设计的初始参数。

#### 3.1 空间干涉组件

考虑到干涉图像复原光谱数据过程中的切趾函数,光谱分辨率的设计值应是所需光谱分辨率的 2.4 倍(以满足有限光程差矩形切趾 1.2 倍展宽和 2 倍采样的要求),进而实现反演所需光谱分辨率为  $0.024 \text{ nm}$  的目标。因此,由空间干涉组件决定的理论光谱分辨率应优于  $0.01 \text{ nm}$ 。

由(1)式和(2)式可知,光谱分辨率由光栅色散方向尺寸  $W$ 、参考波长  $\lambda_L$  和光栅刻线密度  $d$  决定,并依据光谱分辨率  $\delta_\sigma$  和信噪比要求来确定是否需要扩视场。如图 2 所示为空间干涉组件透射臂光楔主截面的光路图,入射光束被分束器(BS)分成强度相等的两束光,参考波长  $\lambda_L$  轴上光线与光楔法面夹角  $\gamma$ 、光楔顶角  $\alpha$  以及光栅转角  $\omega$  满足以下关系:

$$2(n_\lambda^2 - 1) \text{tg } \gamma = n_\lambda^2 \text{tg } \theta_L, \quad (5)$$

$$n_\lambda \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \gamma, \quad (6)$$

$$n \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \left( \frac{\alpha + \delta_m}{2} \right), \quad (7)$$

$$\omega = \delta_m - \theta_L, \quad (8)$$

式中:  $n_\lambda$  和  $\delta_m$  分别为扩视场光楔棱镜的折射率和光束最小偏向角。当光栅附近的空气隔片 AS2 的顶角很小时,可以修正光楔出射面对应的角度与光楔顶角,使 AS2 为平板玻璃,降低加工难度和胶合光程中易出现的失误。空间干涉组件的扩视场能力主要取决于光楔的折射率,因此,在考虑光机结构稳定的前提下,尽可能选取较大折射率的基材,以满足仪器高信噪比的要求。

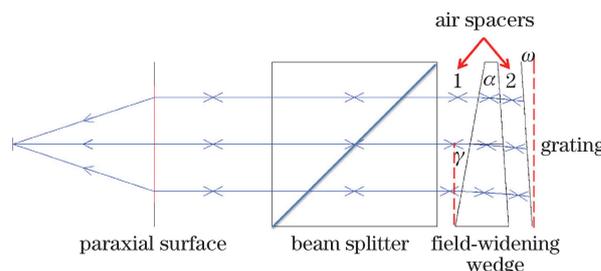


图 2 透射臂光楔主截面的光路图

Fig. 2 Ray trace of transmission arm in wedge principle section

#### 3.2 光学系统详细设计

假定卫星平台处于轨道高度  $500 \text{ km}$ ,对大气层  $15 \sim 85 \text{ km}$  高度处的 OH 自由基进行探测,有效的光谱范围为  $308.2 \sim 309.8 \text{ nm}$ ,垂直廓线分辨率为  $2 \text{ km}$ ,水平幅宽为  $90 \text{ km}$ 。拟采用紫外增强型 CCD47-20 探测器,像元数为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,像元尺寸  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ ,实际使用像元数为  $797 \text{ pixel}(\text{空间/垂直}) \times 1024 \text{ pixel}(\text{光谱/水平})$ ,空间  $Y'$  方向将 22.75 个像元融合作为一个像元使用。当不同高度层对应的辐射强度或信噪比满足反演要求的条件时,可适当减少像元融合行数,利用单行或多行(每行对应空间分辨率为  $0.088 \text{ km}$ )的干涉数据反演 OH 数密度,从而进一步有效提高垂直方向的空间分辨率。

设置参考波长 307 nm,光楔材料为融石英,根据(5)~(7)式得到的空间干涉组件系统参数如表 1

所示,同时给出了光楔顶角修正后的空间干涉组件参数对比。

表 1 空间外差干涉组件参数

Table 1 Parameters of spatial heterodyne interference unit

Parameter	Original value	Corrected value
Littrow wavelength	307 nm	307 nm
Grating	Ruled area: $12.02 \times 15.44 \text{ mm}^2$	Ruled area: $12.02 \times 15.44 \text{ mm}^2$
	Groove density: $1200 \text{ l} \cdot \text{mm}^{-1}$	Groove density: $1200 \text{ l} \cdot \text{mm}^{-1}$
	Rotation angle: $4.223^\circ$	Rotation angle: $3.924^\circ$
Air spacer 1	Apex angle: $9.719^\circ$	Apex angle: $9.719^\circ$
Field-widening wedge	Apex angle: $13.048^\circ$	Apex angle: $13.644^\circ$
	Material: F_SiLiCa	Material: F_SiLiCa
Air spacer 2	Apex angle: $0.895^\circ$	Apex angle: $0^\circ$
Beam splitter	Size: $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$	Size: $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$
	Material: F_SiLiCa	Material: F_SiLiCa

在本设计中,选用 JOBIN YVON 53022 型闪耀光栅,在波段范围 305~315 nm 内,-1 级平均衍射效率优于 60%,设计理论光谱分辨率(即光谱分辨间隔)为 0.0085 nm。为最大程度地保证核心空间干涉组件的稳定性,各元件基材均采用融石英;根据通光口径和各元件顶角的设计值,兼顾光学元件的角度和面形加工精度,各元件间的中心厚度设置在 5~7 mm 范围内。

根据上述设计的系统参数确定成像镜头缩放比为 -0.8622:1。成像镜头采用前后镜组实现双远心成像,物方数值孔径为 0.045,光栅有效区域对角线大小决定物高为 22 mm,前后镜组  $F/\# = 3.15$ ,如图 3 所示为成像镜头光路图。



图 3 成像镜头光路图

Fig. 3 Ray trace of imaging lens

成像镜头后截距为 76.1 mm,可以满足精密调焦、芯片制冷等操作空间的需求。图 4 为成像镜头的畸变曲线和点列图,最大畸变位于 X/Y 归一化光瞳的  $\pm 0.707$  倍光瞳处,且小于 0.05%;各视场弥散斑尺寸均小于单像元尺寸。

如图 5 所示为前置镜头的光路,准直镜头视场角为  $\pm 0.78^\circ$ ,焦距为 445 mm,  $F/\# = 14.35$ ,对应沿光栅刻线方向上的像高为 12.02 mm;柱面望远镜视场角  $\pm 1^\circ$  对应仪器的水平幅宽 90 km、焦距 888 mm、 $F/\# = 14.35$  与准直镜头匹配设计;X 方向上柱面望远镜视场光阑与 Y 方向上准直镜头的

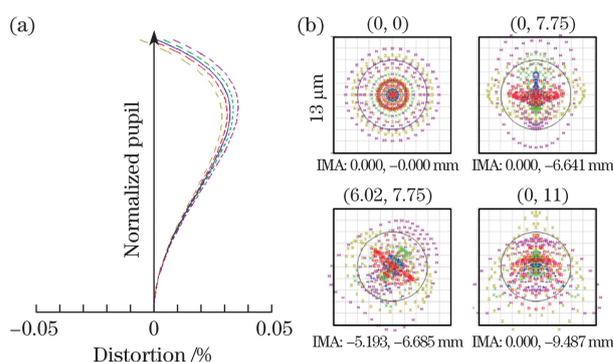


图 4 (a)成像镜头的相对畸变及(b)点列图

Fig. 4 (a) Distortion and (b) spot diagram of imaging lens

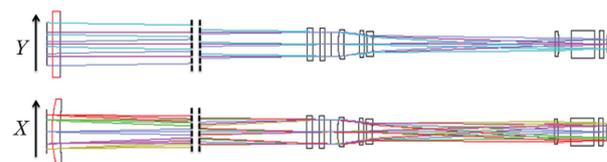


图 5 前置柱面和准直镜头光路图

Fig. 5 Ray trace of fore cylindrical lens and collimating lens

孔径光阑光学位置重合。

对于像元尺寸为  $13 \mu\text{m}$ 、成像缩放比为 -0.8622:1、空间维数据融合的光学系统,前置镜头的成像探测极限和奈奎斯特频率分别为  $15 \mu\text{m}$  和  $33 \text{ lp/mm}$ ,由图 6 前置镜头空间维成像的点列图可知,前置镜头空间维像点优于  $15 \mu\text{m}$  就可满足探测器每一行实现分视场同时成像。图 7 为前置镜头空间维调制传递函数,在奈奎斯特频率处,各视场传递函数值均优于 0.7,可以满足空间维 22.75 像元融合对光学系统传递函数的要求。

中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪光学系统设计参数如表 2 所示。

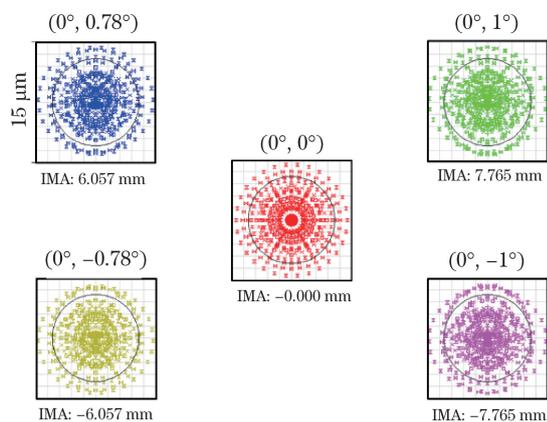


图 6 前置镜头空间成像点列图

Fig. 6 Spatial spot diagram of fore-lens

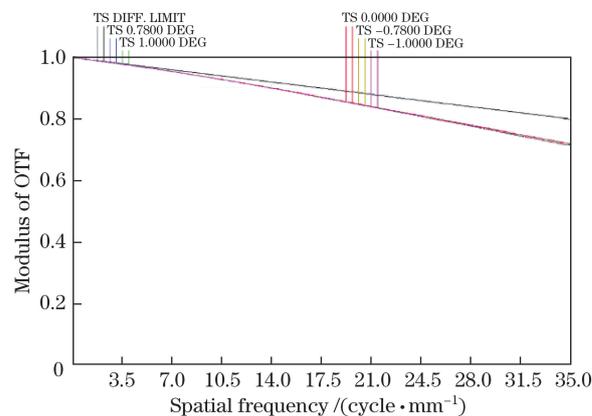


图 7 前置镜头空间调制传递函数

Fig. 7 Spatial modulation transfer function of fore-lens

表 2 光谱仪光学系统设计参数

Table 2 Design specifications of SHS for hydroxyl radical OH

Parameter	Value	
	X in dispersive cross section	Y in 1-D imaging direction
Spectral resolution /nm	0.02	
Spectral range (FWHM) /nm	308.2-309.8	
Working distance /km	2574	
Focal length /mm	380.7	
Field of limb view@500 km / (°)	+/-1.00(90 km)	+/-0.78(70 km)
Object height /km	90	2
Image height /mm	13.312(0.013×1024)	0.296(0.013×22.75)
Focal length of cylindrical lens /mm	888	∞
Focal length of collimating lens /mm	445	445
Grating size /mm	15.44	12.02
Magnification of imaging lens	-0.8622:1	
Detector size /mm	13.312(0.013×1024)	10.36(0.013×797)

## 4 实验验证

依据上述光学系统的详细设计,研制了中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪,并于 2017 年 7 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附近进行了太阳直射光谱的探测实验,验证空间维视场范围、光谱分辨率和光谱范围等指标的准确性。利用吉林风云公司的全自动太阳跟踪系统(跟踪精度优于±0.04°)将太阳直射光导入至仪器入瞳处,如图 8(a)所示。图 8(b)显示了仪器组件内部的功能布局,为减小仪器的外形尺寸,柱面望远镜使用了呈 90°布置的两反射镜进行光路折转。仪器内部双通道呈 90°正交布局,用于在轨 OH 自由基的三维层析探测。

该实验所处的地理位置离市区约 10 km,场区

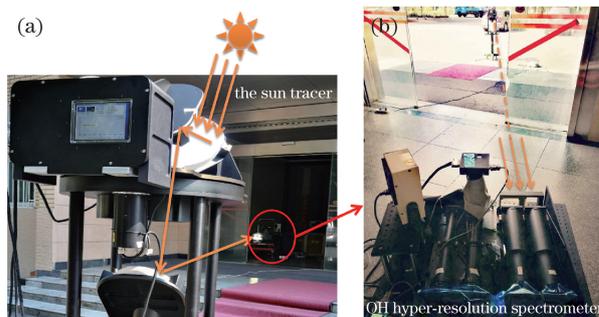


图 8 中高层大气 OH 自由基超光谱探测仪太阳观测实验  
Fig. 8 Sun observation by hyper-resolution spectrometer for mesospheric OH radical

四周为湖水环绕,远离影响大气反演的污染源。实验获取的原始干涉图像如图 9(a)所示,干涉有效照明区域约为 270 行,依据远日点太阳视角 0.532°计算可知,1.56°对应干涉有效照明行数为 792 行,实

测空间维视场与理论设计不一致性为 0.6%，满足焦距误差 1% 的控制要求，其余 232 行可用于监测探测器暗电流的变化；同时，光谱维实现了对干涉图像的均匀照明功能。经过光谱定标、辐射定标和数据处理<sup>[11-12]</sup>后，观测太阳光谱与理论地面接收的太阳光谱曲线如图 9(b)所示，模拟光谱与实测光谱特征

曲线一致性良好，实测光谱分辨间隔为 0.0082 nm，有效光谱分辨率优于 0.02 nm。图 10 给出了实测与模拟光谱曲线的局部放大细节，可知各特征谱峰位置吻合良好，光谱强度残差的主要来源为辐射定标误差，这是由紫外辐射定标光源的非稳定性和非均匀性造成的，相关内容还有待进一步研究。

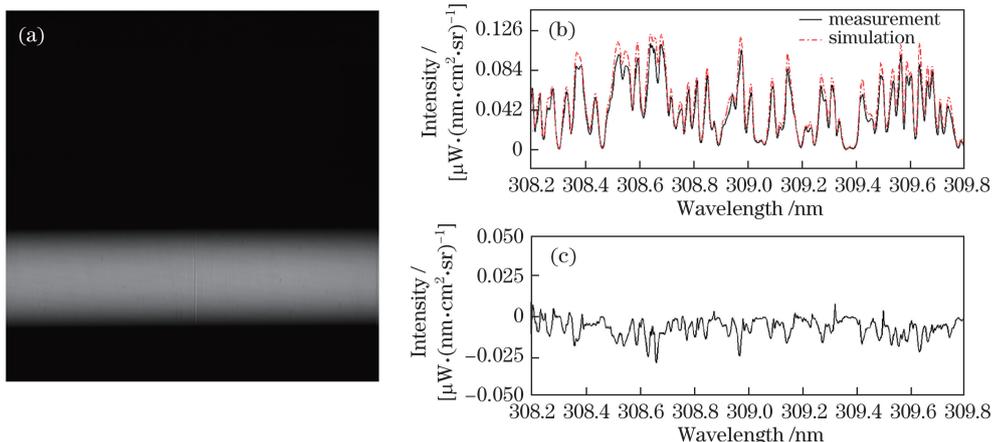


图 9 (a)原始干涉图;(b)实测与模拟复原光谱曲线;(c)实测与模拟复原光谱的残差

Fig. 9 (a) Original interferogram; (b) experimental and simulated spectra; (c) residual of experimental and simulated spectra

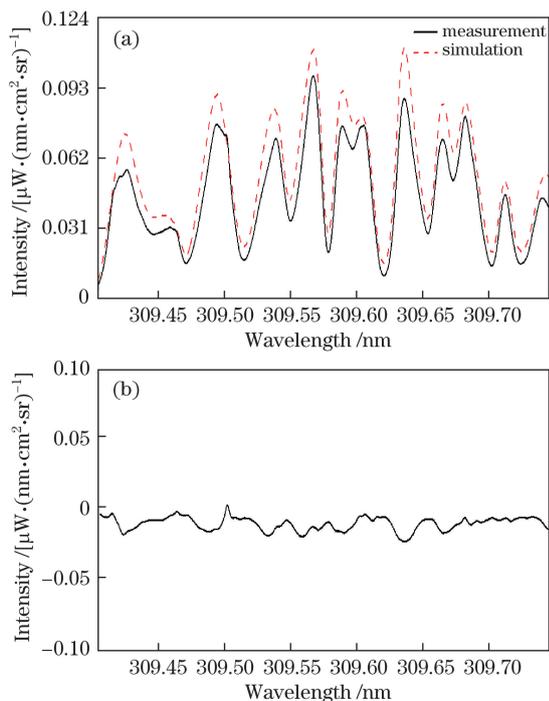


图 10 (a)实测与模拟复原光谱及(b)残差的局部放大图

Fig. 10 Enlarged (a) spectra and (b) residual of experimental and simulated spectra

## 5 结 论

设计了一种适合星载应用的中高层大气 OH 自由基超分辨外差光谱仪光学系统，分析了基于

应用目标的设计输入参数与光学功能组件之间的定量关系。针对 OH 自由基荧光发射谱段(308.2~309.8 nm)的应用给出了光学系统设计，通过实验验证了仪器的空间维视场范围、光谱采样间隔和光谱范围等指标的准确性，以及空间维静态分视场同时成像技术的有效性。实测结果与光学设计理论值一致性良好，表明了设计合理有效，为星载中高层大气 OH 自由基临边探测系统的实现提供了有效可行的技术方案。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y M, Fu L P, Du S S, *et al.* Development for detecting upper atmospheric wind and temperature from satellite[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(1): 1-5.  
王咏梅, 付利平, 杜述松, 等. 中高层大气风场和温度场星载探测技术研究进展[J]. 空间科学学报, 2009, 29(1): 1-5.
- [2] Chen H B. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(3): 229-241.  
陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3): 229-241.
- [3] Harlander J M, Roesler F L, Cardon J G, *et al.* SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth's middle atmosphere[J].

- Applied Optics, 2002, 41(7): 1343-1352.
- [4] Cardon J G, Englert C R, Harlander J M, *et al.* SHIMMER on STS-112: development and proof-of-concept flight[C]. AIAA Space 2003-Conference and Exposition, Long Beach (California), 2003: 23-25.
- [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 Atmospheres, 2010, 115(D20): D20306.
- [6] Jiang G Y, Xu J Y, Shi J K, *et al.* The first observation of the atmospheric tides in the mesosphere and lower the rmosphere over Hainan, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(11): 1059-1066.  
姜国英, 徐寄遥, 史建魁, 等. 我国海南上空中高层大气潮汐风场的首次观测分析[J]. 科学通报, 2010, 55(11): 1059-1066.
- [7] Yi W, Chen J S, Ma C B, *et al.* Observation of upper atmospheric temperature by Kunming all-sky meteor radar[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2423-2432.  
易稳, 陈金松, 马春波, 等. 昆明全天空流星雷达观测中高层大气温度[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2423-2432.
- [8] Ye S, Fang Y H, Hong J, *et al.* Experimental study on spatial heterodyne spectroscopy[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(5): 84-88.  
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱技术实验研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 84-88.
- [9] Qiu Z W. Study on spatial heterodyne ultrahigh spectroscopic technology and its application in space atmosphere remote sensing[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2013.  
裘桢炜. 空间外差超分辨率光谱技术及星载大气遥感应用研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2013.
- [10] Jin W, Chen D H, Li Z W, *et al.* Screening and testing method of satellite-borne detectors for spatial heterodyne spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904004.  
金伟, 陈迪虎, 李志伟, 等. 星载空间外差光谱仪探测器筛选测试方法[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904004.
- [11] Li Z W. Key techniques of spectral reconstruction applied for spatial heterodyne spectrometer[D]. Hefei: 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]. 合肥: 中国科学院大学, 2015.
- [12] Shi H L, Li Z W, Luo H Y, *et al.* Non-uniformity of optical field after filter in spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1123001.  
施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等. 空间外差光谱仪滤光片光场非均匀性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1123001.