

文章编号: 0253-2239(2010)05-1511-05

# 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究

熊 伟 施海亮 汪元钧 罗海燕 方勇华 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** 介绍了基于 940 nm 水汽弱吸收带的空间外差光谱探测系统。通过对水汽探测的光谱分辨率和光谱范围需求分析,进行了系统参数设计与实验装置的研制。利用可调谐激光器和元素谱线灯分别对实验装置进行了性能测试,选择少云晴朗天气,对实验装置进行了室外水汽探测实验。实验结果表明,实验装置性能指标与理论设计值一致,水汽实测谱与理论谱吻合,表明了空间外差光谱技术在水汽探测和信息反演方面的优越性。

**关键词** 遥感;温室气体;空间外差光谱(SHS);水汽

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1511

## Study on Near-Infrared Spatial Heterodyne Spectrometer and Detection of Water Vapor

Xiong Wei Shi Hailiang Wang Yuanjun Luo Haiyan Fang Yonghua 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** Spatial heterodyne spectroscopy (SHS) experimental system based on 940 nm water vapor absorption band is introduced. According to analysis of spectral resolution and bandwidth for water vapor detection, the system parameters are designed and the experimental equipment is developed. The performance test using tunable laser and cathode hollow lamp, and water vapor detection in the clear weather is conducted. The results show that the experimental equipment's practical capability is in agreement with theoretical index. Moreover, the observed and the theoretical water vapor spectrum are also coincident. Those demonstrate the superiority of SHS technique in water vapor detection and retrieval.

**Key words** remote sensing; greenhouse gas; spatial heterodyne spectroscopy (SHS); water vapor

### 1 引 言

水汽是地球大气中主要温室气体之一,其定量探测和时空变化的监测是现代环境遥感技术研究的重点。已有研究表明,利用 940 nm 波段进行水汽探测有着重要的作用<sup>[1,2]</sup>,定量探测和解析水汽信息需要很高的光谱分辨率,如优于 0.1 nm 等。空间外差光谱(SHS)技术<sup>[3,4]</sup>是一种新型超光谱技术。与 Michelson 干涉仪相比空间外差光谱仪有其自身的优点:系统无扫描部件,能同时获取所有光谱组元在不同位置的干涉图,保证了信号的一致性;比传统的 Michelson 干涉仪更容易获得高光谱分辨率;光

通量大,为传统色散型光谱仪的几百倍;此外,还具有体积小、功耗低等优点。美国已将该技术应用于高层大气 OH 自由基和星际介质的观测<sup>[5~8]</sup>,加拿大也将这一技术应用于大气水汽的探测研究<sup>[9]</sup>。国内于 2005 年开始进行这一技术的研究,目前已在近红外波段的 SHS 系统研制方面取得进展<sup>[10~12]</sup>。

本文介绍了基于水汽的 940 nm 吸收带,应用 SHS 技术实现了光谱分辨率达 0.05 nm 的超光谱探测水平,并设计研制了实验光谱仪。通过室外实验验证了该技术在定量解析大气水汽含量方面的能力。

收稿日期: 2009-06-05; 收到修改稿日期: 2009-07-17

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z131)和中国科学院重要方向项目(KGCX2-YW-418)资助课题。

作者简介: 熊 伟(1975—),男,博士,助理研究员,主要从事高分辨率光谱仪遥感技术方面的研究。

E-mail: frank@aiofm.ac.cn

## 2 水汽空间外差光谱仪

空间外差光谱仪采用两个衍射光栅代替传统 Michelson 干涉仪中两个平面反射镜,如图 1 所示。已有相关的文献对 SHS 的原理和干涉信息解析进行了详细分析<sup>[13,14]</sup>,在此不再赘述。对于波数为  $\sigma$

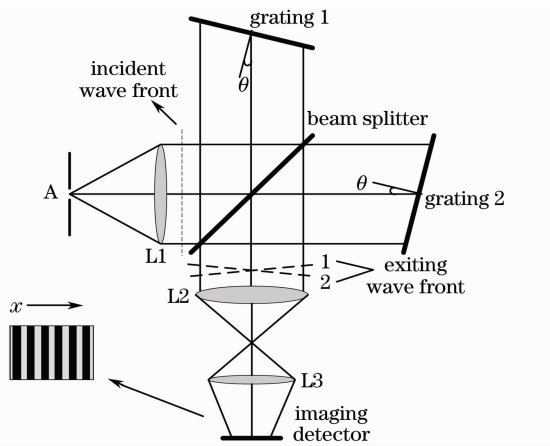


图 1 空间外差光谱仪结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the basic SHS configuration

的两束光进入 SHS 后干涉空间频率为

$$f = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta.$$

当入射光为  $B(\sigma)$  时,所得到的干涉图为

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi 4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta]\} d\sigma.$$

水汽 SHS 探测系统结构主要由三部分组成:准直系统、干涉仪和成像系统,如图 2 所示。其中,准直系统的作用是将光源发出的辐射,经过准直透镜组变成平行光投射到干涉仪中。成像系统的作用是将干涉条纹成像到 CCD 面上。SHS 中干涉仪主要由分束器、光楔和光栅等光学元件组成,其主要目的是将准直后的入射光经过分束器和光栅衍射后,变成两束相干的光,并产生干涉条纹。分束器的作用是将入射光束分为强度相等的两束相干光。光楔起增大视场角的作用,从而增大进入 SHS 系统的辐射通量,提高系统的灵敏度。光栅的作用是将不同波长的光在空间上色散开,使干涉仪在没有动镜的情况下产生光程差。

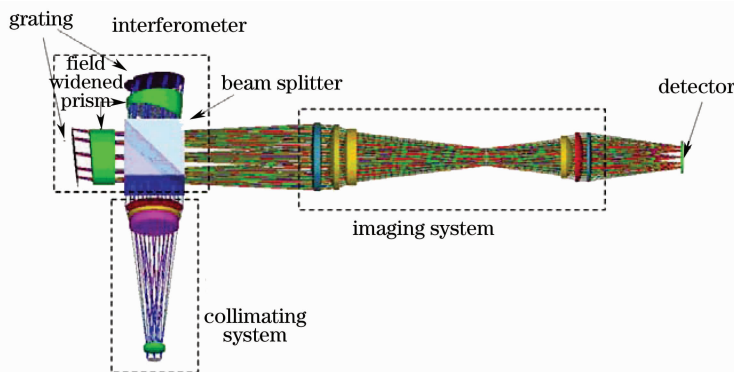


图 2 水汽 SHS 光谱仪光路图

Fig. 2 Schematic diagram of SHS spectrometer for detection of water vapor

### 2.1 系统参数设计

SHS 的整体性能指标主要有光谱分辨能力和光谱范围等,这些指标可以通过改变光栅、探测器和成像系统的参数进行调节。首先根据应用目的确定 SHS 系统的主要性能指标,如波段范围、分辨率、视场等,进而选择光栅、光楔以及探测器和成像系统的设计参数。此外,SHS 通过预滤光片可以防止“鬼线”干扰,成像系统直接影响干涉度,这些都是系统设计时必须考虑的问题。依据大气水汽反演的实际需要确定红外 SHS 的波长范围为 930~955 nm,光谱分辨率为 0.05 nm。水汽 SHS 系统参数设计如表 1 所示。

表 1 水汽 SHS 光谱仪主要技术参数

Table 1 Parameters of the experimental system of SHS for water vapor detection

Grating	groove density / (lp/mm)	600
	Littrow wavelength / nm	930
Beam splitter	size / mm	55×55×55
	material	BK7
	T/R ratio	50:50
CCD detector	pixel number / pixel	1024×1024
	pixel size / μm	13×13
Filter region / nm		930~955
Prism wedge angle / (°)		19.36
Resolution / nm		0.05

## 2.2 干涉仪胶合

干涉仪是整个系统的核心,主要由分束器、扩视场棱镜以及光栅组成。由于器件较多,而且对每一器件的调整精度要求很高(需要达到秒级),因此采用分离器件用调整机构固定调节的方式搭建干涉仪的方案是一项非常具有挑战性的工作。而且这样的方案很难保证野外实验的要求。为此,本文采用了全胶合的一体化干涉仪研制方案。这一方案中,将各器件采用光学的方法胶合成一个整体,扩视场棱镜与分束器和光栅之间利用隔片连接。那么,所有对调整的精度要求都通过对各器件的加工精度和光学元件胶合精度来保证。胶合过程中必须利用合适的夹具和监测设备监测每一器件的胶合精度。尽管这一工作非常具有挑战性,但是一旦干涉仪胶合完成,其在可靠性与稳定性方面的优势是分离元件系统无法比拟的。有关各器件参数的计算在文献[10]中已有详细的介绍,在此不再赘述。集成后的一体化干涉仪如图 3 所示。

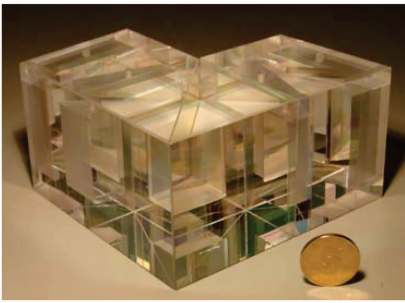


图 3 一体化干涉仪

Fig. 3 Monolithic SHS interferometer

## 2.3 系统性能测试

为了验证实验装置的性能指标,分别对系统进行了可调谐激光和元素谱线灯实验。实验过程中,将光源导入积分球,然后从积分球导入光谱仪准直系统入瞳。利用可调谐激光器设置合适的激光波长,以便于检测系统光学器件性能(图 4)。图 5 显

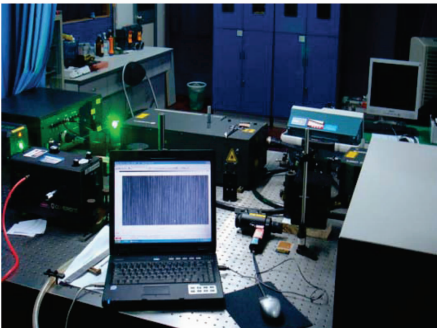


图 4 实验室测试

Fig. 4 Laboratory setup

示了单波长激光的干涉效果,笔直、均匀的干涉条纹显示了光学器件良好的表面平整度和系统均匀性。图 6 和图 7 分别显示了氖灯元素谱线灯作为光源的干涉图和傅里叶变换光谱,其中光谱未经辐射定标,其中几条能量较弱的谱线均被检测出,说明实验装置的探测灵敏度较高。

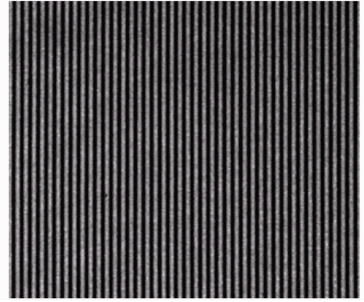


图 5 激光干涉图

Fig. 5 Laser interferogram

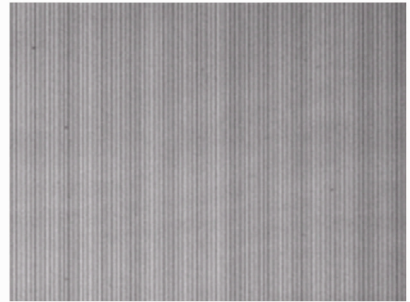


图 6 氖灯干涉图

Fig. 6 Neon interferogram

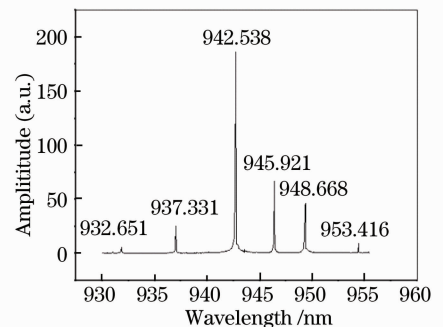


图 7 氖灯光谱

Fig. 7 Neon spectrum

利用氖灯光谱中在这一波段内的多条发射谱线,可以对光谱进行准确的波长定标。根据各条发射谱线的波长间隔与所对应的光谱点数间隔,来计算实验装置的光谱分辨率和光谱范围。结果表明,空间外差光谱仪的实际光谱分辨率为 0.049 nm,光谱范围为 930.5~955.5 nm,与理论设计值有较小的差别。导致系统分辨率改变的原因主要是由于成像系统因加工装调等因素导致放大倍率变化引起

的<sup>[15]</sup>;系统光谱范围的变化主要是由于干涉仪隔片、棱镜等加工误差导致光栅偏角改变引起的,但是这样的误差不会影响系统的使用。

### 3 水汽空间外差光谱仪地基探测实验

为了便于水汽定量反演计算<sup>[16~18]</sup>,选择晴空少云天气进行室外地基观测,观测点位于合肥西郊科学岛,观测过程中同时进行光谱定标工作。图 8 显示了水汽干涉效果。

图 9 为根据实测干涉图复原的水汽吸收光谱,图 10 为空间外差光谱仪探测到的水汽吸收光谱与

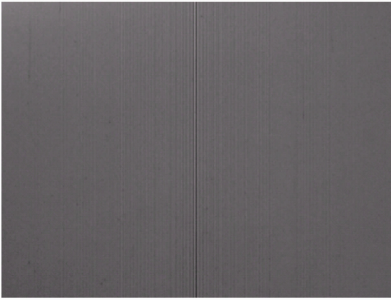


图 8 水汽实测干涉图

Fig. 8 Measured water vapor interferogram

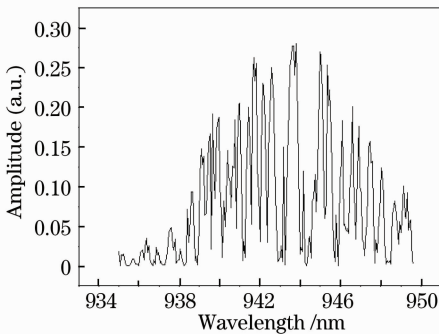


图 9 水汽实测光谱图

Fig. 9 Measured Fourier transform spectrum of water vapor

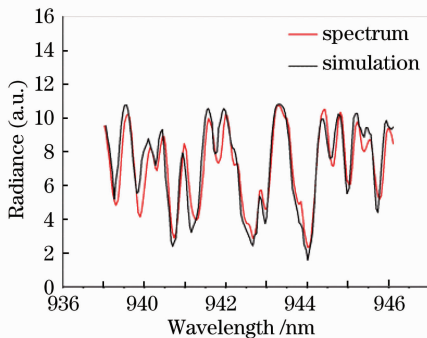


图 10 定标后的水汽实测值与理论值比较

Fig. 10 Comparison of the simulatant spectrum with water vapor spectrum after calibrated

该波段理论水汽吸收光谱的叠加,两者十分吻合。实验结果表明,SHS 技术在探测水汽的应用中的效果非常理想,初步验证了 SHS 实验装置的实际工作能力。

### 4 结 论

SHS 具有高灵敏度(高通量)、高光谱分辨率等优势,特别适用于大气中微量气体的精细光谱分析,进行微量气体成份的浓度探测,对了解大气环境、光化学过程、气候变迁和天气预报等具有重要的意义。本文选取大气主要温室气体之一的水汽作为探测对象,进行了近红外波段 SHS 系统参数的设计和光谱仪研制,通过地基水汽观测实验验证了该技术在水汽探测应用方面的可行性。

### 参 考 文 献

- 1 R. Frouin, P. Y. Deschamps, P. Hecomte. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940 nm: theory and airborne verification[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1990, **29**(6): 448~460
- 2 B. C. Gao, A. F. H. Goetz. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(4): 3549~3564
- 3 Dohi, Suzuki. Attainment of high resolution holographic Fourier transform spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(5): 1137~1140
- 4 J. Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy, interferometric performance at and wavelength without scanning[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1991
- 5 F. L. Roesler, J. Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric remote sensing [C]. *SPIE*, 1999, **3756**: 337~345
- 6 J. Harlander, F. L. Roesler, J. G. Cardon *et al.*. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth's middle atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(7): 1343~1352
- 7 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
- 8 J. G. Cardon, C. R. Englert, J. Harlander *et al.*. SHIMMER on STS-112: development and proof-of-concept flight[C]. Space 2003 (American Institute of Aeronautics and Astronautics) AIAA 2003~6224
- 9 Yunlong Lin, G. Shepherd, B. Solheim *et al.*. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]. ITSC - XIV Proceedings Beijing, China, 2005
- 10 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
- 11 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Xiong Wei *et al.*. Simulation of spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(12): 34~39

- 施海亮, 方勇华, 熊 伟 等. 空间外差光谱技术仿真研究 [J]. 光电工程, 2008, **35**(12): 34~39
- 12 Ye Song, Xiong Wei, Qiao Yanli *et al.*. Data processing for interferogram of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(3): 848~852
- 叶 松, 熊 伟, 乔延利 等. 空间外差光谱仪干涉图数据处理 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(3): 848~852
- 13 F. L. Roesler, J. Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [C]. *SPIE*, 1990, **1318**: 234~243
- 14 J. Harlander, F. L. Roesler, S. Chakrabarti. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for the FUV[C]. *SPIE*, 1990, **1344**: 120~131
- 15 Luo Haiyan, Xiong Wei, Shi Hailiang *et al.*. Tolerance simulation and analyses of spatial heterodyne interferometer[C]. Photonics Forum of Yangtze River Delta Region, 2009
- 罗海燕, 熊 伟, 施海亮 等. 空间外差干涉仪公差仿真与分析 [C]. 长三角光子科技论坛, 2009
- 16 Zou Mingmin, Fang Yonghua, Xiong Wei *et al.*. A line-by-line retrieval calculation of water vapor based on the observation of SHS. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1701~1705
- 邹铭敏, 方勇华, 熊 伟 等. 一种基于空间外差光谱技术观测的水汽浓度逐线积分反演方法 [J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1701~1705
- 17 Chen Hongbing, Gao Junyi, Ding Qiang *et al.*. High resolution absorption spectroscopy of water vapor at 917 ~ 945 nm: measurement of line strengths and air broadening[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(11): 1619~1625
- 陈红兵, 高军毅, 丁 强 等. 917~945 nm 水汽吸收线强度和空气加宽系数测量 [J]. 光学学报, 1996, **16**(11): 1619~1625
- 18 Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun *et al.*. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmospheric absorption spectral [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 165~169
- 魏合理, 邬承就, 马志军 等. 提高大气吸收光谱测量分辨率的新方法 [J]. 光学学报, 2002, **22**(2): 165~169