

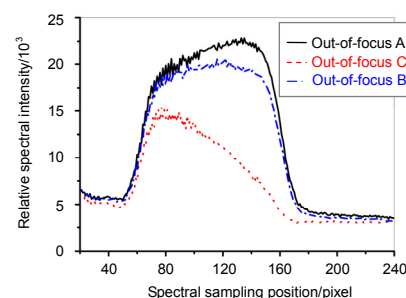


## 热真空环境对空间外差光谱仪复原光谱的影响

叶擎昊<sup>1</sup>, 姜通<sup>1</sup>, 代海山<sup>1</sup>, 熊伟<sup>2</sup>, 施海亮<sup>2</sup>,  
罗海燕<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>上海卫星工程研究所, 上海 200240;

<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用定标与表征重点实验室, 合肥 230031



**摘要:** 热真空环境适应性是空间光学遥感仪器的关键性能之一, 对超光谱 CO<sub>2</sub> 监测仪的复原光谱精度尤为重要。基于空间外差干涉技术原理, 采用理论分析和试验手段对仪器热真空环境适应性进行了讨论。理论分析了热真空环境对准直光束发散角、扩视场空间外差干涉仪组件基频波长、成像镜头离焦和缩放比等因素的改变对复原光谱的影响, 并基于 CS-800 型热真空模拟设备开展了测量实验。实验结果表明, 理论分析得到的系统基频波长与实验数据吻合, 复原光谱廓线形状与理论分析一致。当干涉仪组件均采用熔融石英(SiLiCa), 热控精度优于 1.1 °C 时, 仪器可具有 0.01 nm 的光谱稳定度, 该分析为空间外差干涉光谱仪各功能组件的热控要求、地基常压条件下基频的选定等问题提供了理论依据。

**关键词:** 空间外差干涉光谱仪; 热真空环境; 基频波长; 复原光谱

**中图分类号:** TH744.1

**文献标志码:** A

## Influence of thermal-vacuum environment on the recovered spectrum of spatial heterodyne spectrometer

Qinghao Ye<sup>1</sup>, Tong Jiang<sup>1</sup>, Haishan Dai<sup>1</sup>, Wei Xiong<sup>2</sup>, Hailiang Shi<sup>2</sup> and Haiyan Luo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract:** Thermal-vacuum environment adaptability is one of the key performances of space optical instruments, especially for hyper-spectral instrument, and spatial heterodyne spectrometer (SHS) should provide high spectral stability for the detection of atmosphere CO<sub>2</sub>. Based on the research of the spatial heterodyne interference principle, simulation test in thermal-vacuum environment and quantitative analyses are carried out. The relationship among environment changes and the divergence half-angle of collimating lens, Littrow wavelength of field widened interferometer, different defocusing amount and pantograph ratio of imaging lens are analyzed. In order to verify the theoretical analysis, thermal-vacuum experiment is performed. The results show that the spectral deviation and profile are matched with theoretical analysis, and spectral stability is less than  $\pm 0.01$  nm under the temperature from 19 °C to 21.2 °C by the substrates made of fused Silica (Corning 7980 0F). Quantitative analyses provide theoretical basis for the thermal control requirement and Littrow wavelength selection in normal atmospheric pressure.

收稿日期: 2017-04-05; 收到修改稿日期: 2017-05-19

\*E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

**Keywords:** spatial heterodyne spectrometer(SHS); thermal-vacuum environment; littrow wavelength; recovered spectrum

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.07.007

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(7): 710–718

## 1 引言

空间外差干涉光谱技术(Spatial heterodyne spectroscopy, SHS)从上世纪七十年代提出以来,以其光通量大、灵敏度高、波段范围广、结构紧凑等优点,正在或计划作为空间光学遥感仪器,用于大气 OH 自由基、水汽以及大气主要温室气体含量等成分的精细探测<sup>[1-3]</sup>。2007年,美国 Harlander 等人研制的 SHIMMER 系统搭载 STPSat-1 卫星,以临边观测方式探测全球中高层大气 OH 自由基垂直廓线<sup>[4]</sup>,其观测结果与光化学模型数据相当吻合;2014年,加拿大 Fabien Dupont 等人研制的 SHOW 系统搭载高空气球,进行了 14 km 大气高度层内水汽含量的探测<sup>[5]</sup>;2011年, SRI International Rick Doe 等人提出基于该技术研制的 CM2 系统,计划搭载微小卫星,用于中高层大气温度及重力波的探测<sup>[6]</sup>。

在国内,安徽光机所、西安光机所等单位也积极开展空间外差干涉光谱技术的研究,并致力于该技术的空间应用,以获取大气主要温室气体 CO<sub>2</sub> 的柱浓度<sup>[7]</sup>。高精度大气温室气体反演数据,在要求仪器具备高光谱分辨、高信噪比等特性的同时,还需具备高稳定性和空间环境适应性,才能实现仪器的复原光谱范围、复原光谱强度等信息的精确表征。

热真空环境的变化引起光学材料折射率、光栅刻线周期、成像镜头畸变和缩放比等参数改变,使得仪器产生光谱漂移和光谱廓线形变,从而恶化地面环境下对仪器的定标精度。本研究主要针对本单位研制的超光谱 CO<sub>2</sub> 监测仪的 O<sub>2</sub>-A 波段通道光谱仪,展开理论分析和热真空试验验证。通过理论分析,合理选用干涉仪组件内扩视场棱镜和光栅基底材料、光栅刻线周期等仪器参数,并对光谱仪内各功能组件提出温控要求与反馈精度,从而获得高精度的仪器先验信息,为遥感在轨复原光谱的精确表征奠定基础<sup>[8]</sup>。

## 2 扩视场空间外差干涉光谱技术理论

空间光学遥感仪器所处的热真空环境十分恶劣,其热状态受到多种外热流的复合耦合作用。图 1 所示

为超光谱 CO<sub>2</sub> 监测仪的 O<sub>2</sub>-A 波段光谱仪原理图,太阳辐射经一次大气路径吸收、地表反射、二次大气路径吸收后进入监测仪离轴反射准直系统,经分色反射镜选通 O<sub>2</sub>-A 波段光谱范围;中继准直镜头将离轴反射准直系统出瞳成像在光栅处,并均匀照明光栅;干涉仪组件对入射光波进行空间调制形成定域干涉条纹,干涉条纹经成像镜头比例缩放成像在探测器面上。

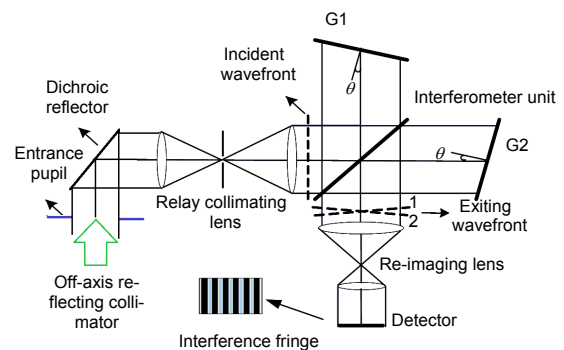


图 1 监测仪 O<sub>2</sub>-A 波段光谱仪原理图。

Fig. 1 Schematic diagram of O<sub>2</sub>-A waveband spectrometer.

干涉表达式为

$$I(x) = B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi(\sigma - \sigma_0)4x \tan \theta]\}, \quad (1)$$

其中:  $\sigma$  为入射光波数、 $\sigma_0$  为基频波数(Littrow wave number)、 $\theta$  为 Littrow 角。波数  $\sigma_0$  的光以  $\theta$  角入射两臂光栅时,光线沿原光路返回,即衍射角为零;任意波数  $\sigma$  的光入射两臂光栅时,经光栅衍射在干涉条纹的定域面处形成具有一定夹角的相干波面。干涉条纹频率  $f_\sigma$  与波面夹角  $\delta$  的关系:

$$f_\sigma = 2\sigma \sin \delta \approx 4(\sigma \pm \sigma_0) \tan \theta_L, \quad (2)$$

$$\delta_\sigma = 2\pi(\sigma - \sigma_0)4x \tan \theta. \quad (3)$$

当干涉仪组件内使用棱镜对其进行视场扩展时,式(2)和式(3)则扩展为式(4)和式(5):

$$f_{\Omega,\sigma} = 4 \left[ \sigma \left( 1 - \frac{\Omega C(n, \gamma)}{2\pi \tan \theta} \right) - \sigma_0 \right] \tan \theta, \quad (4)$$

$$\delta_{\Omega,\sigma} = \delta_\sigma + 2\pi x \left[ 2\beta^2 \left( \frac{2(n^2 - 1) \tan \gamma}{n^2 \cos^2(\alpha/2)} - \tan \theta \right) + 2\phi^2 \left( \frac{(n^2 - 1)(2n^2 - \sin^2 \gamma) \tan \gamma}{n^2(n^2 - \sin^2 \gamma)} - \tan \theta \right) + \dots \right], \quad (5)$$

其中:  $n$  为扩视场棱镜折射率,  $\gamma$  为扩视场棱镜入射

面相对光轴的倾角,  $\alpha$  为扩视场棱镜顶角,  $\Omega = \pi\beta^2 = 2\pi/R$  为未经扩视场时干涉仪组件所能接收到的极限立体角。此时, 干涉条纹表达式为

$$I_{\Omega}(x) = kB(\sigma) \left\{ 1 + \operatorname{sinc} \left( \frac{u\sigma\Omega C(n,\gamma)}{2\pi \tan \theta} \right) \cdot \cos \left[ 2\pi u \left( \sigma \left( 1 - \frac{\Omega C(n,\gamma)}{2\pi \tan \theta} \right) - \sigma_0 \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

其中:  $C(n,\gamma) = \frac{2(n^2 - 1) \tan \gamma}{n^2 \cos^2(\alpha/2)} - \tan \theta$ ,  $u = 4x \tan \theta$ 。

基于上述扩视场空间外差干涉光谱技术原理, 以干涉仪为核心组件的超光谱 CO<sub>2</sub> 监测仪的 O<sub>2</sub>-A 波段光谱仪中, 除了讨论热真空环境导致的准直镜头出射光束波前与光束发散角发生的改变, 以及成像系统畸变、缩放比和调制传递函数 MTF 的改变等因素, 进而影响复原光谱分辨率及复原光谱精度外, 其核心干涉仪组件中的扩视场棱镜、光栅等元件受热真空环境导致的基频波长漂移、光谱分辨率改变也在一定程度上影响光谱仪的复原光谱精度。通过计算空间热真空环境对准直功能镜头输出波面质量、成像镜头畸变、MTF 曲线及离焦量、核心干涉仪组件内扩视场棱镜折射率  $n$  和光栅刻线密度等参数的变化对复原光谱的影响, 提出各功能组件合理的温控范围, 从而完成监测仪的高精度光谱探测。

### 3 系统热真空效应分析

针对监测仪的 O<sub>2</sub>-A 波段光谱仪展开分析, 在图 1 所示的出瞳面与中继准直镜头之间布置有窄带滤光片, 有效光谱范围包含 759 nm~769 nm, 其光谱仪详细设计参数如表 1 所示。根据光谱仪光学系统设计,

分别对准直镜头、核心干涉仪组件和成像镜头受空间环境下的温度和真空度的变化进行分析。根据复原光谱精度合理选择光学元件的材料及参数, 并对光谱仪各功能组件提出合理的温控范围。

#### 3.1 准直镜头热真空效应分析

准直功能镜头为干涉仪组件提供具有一定视场的平行光理想平面波, 受像差、环境等的影响对光谱仪主要产生三方面的影响: 1) 波前函数沿光栅色散  $x$  方向对采样点进行调制  $h(x)$ , 即干涉条纹发生空间调制的波面不再是理想平面波; 2) 准直光束入射至光栅面的光束发散角发生改变; 3) 理论基频波长发生改变。

1) 受准直系统出射波前的影响, 产生干涉条纹的波面夹角表达式:

$$\delta = 2\pi\sigma(\beta_{1f}(x) - \beta_{2f}(x))h(x), \quad (7)$$

其中:  $\beta_{1f}$ ,  $\beta_{2f}$  为干涉仪组件两臂光波经光栅衍射后的出射角度, 如图 2 所示。由上述章节理论分析可知, 准直出射光束波前质量与干涉条纹质量无关, 对于入射波前引起的相位差  $\beta_{1f}$ ,  $\beta_{2f}$  在不同光程差点可进行补偿。

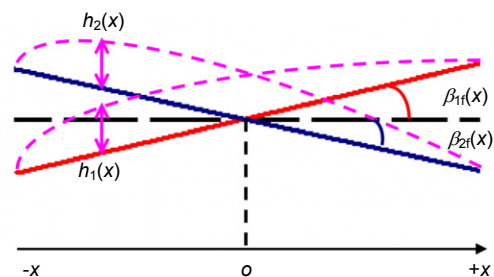


图 2 非基频波长经干涉仪后出射波前。  
Fig. 2 Exiting wave fronts of other wavelengths.

表 1 监测仪的 O<sub>2</sub>-A 波段光谱仪设计参数。

Table 1 Design specifications of SHS for O<sub>2</sub>-A waveband.

No.	Aspect	Attribute	Design (Temperature: 20 °C, 1ATM)
1	Functional unit	Narrow band filter	759 nm~769 nm full width at half maximum
		Collimating lens	Entrance diameter 21 mm; IFOV 73 mrad
		Imaging lens	6-element relay system
		Detector	1024×1024, 13 μm×13 μm CCD
2	Interferometer	Gratings	Clear aperture 22.12 mm×22.12 mm; 600 gr/mm; Littrow wavelength 756.5 nm; Substrates material SiLiCa
		Field-widening prisms	Wedge angle 17.0736°; Incident angle 12.4657°; Material SiLiCa
		Beam splitter	Clear aperture 35 mm×35 mm
		Spectral resolution	0.6 cm <sup>-1</sup> @756.5 nm
3	Performance	Achieved spectral range	Filter limited

2) 理论上空间外差干涉光谱仪的光谱分辨率由最大光程差决定,在实际应用过程中,影响干涉条纹调制度的参数,如扩展光源、干涉仪元件面形状等都会导致光谱分辨率下降,且复原光谱强度降低。如图3所示为中继准直镜头的光路图,由前后两组透镜组成,当温度和真空度发生改变时,其出射光发散角也会发生改变,如表2所示。

当对空间外差干涉光谱仪进行扩视场后,扩展光源经由扩视场空间干涉组件调制形成的干涉条纹表达式(6)可知,干涉调制度表达式为

$$V = \text{sinc}\left(\frac{u\sigma\Omega C(n,\gamma)}{2\pi \tan \theta}\right). \quad (8)$$

表2中热真空环境导致出射发散角变化量角度最大为 $0.04^\circ$ 以内,计算可得当入射发散半角分别为 $2^\circ$ 和 $1.96^\circ$ 时,对应的干涉条纹调制度分别为0.972和0.9746。

如图4为准直镜头出射发散角与干涉条纹调制度关系曲线,热真空环境导致准直系统出射光发散角发生改变,影响干涉条纹调制度,即复原光谱强度发生改变;且热真空环境导致准直系统发散角变化基线应

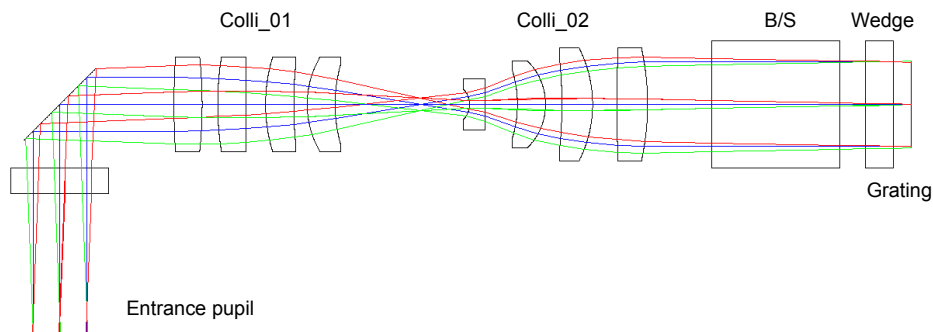


图3 中继准直镜头光路图(材料: 融石英)

Fig. 3 Ray trace of the relay collimating lens (Substrate: SiLiCa).

表2 中继准直镜头出射发散半角。

Table 2 Divergence half-angles of the relay collimating lens.

No.	Pressure, Temperature	Divergence half-angle	No.	Pressure, Temperature	Divergence half-angle
1	1 ATM, 30 °C	1.9829°	6	0 ATM, 30 °C	1.9600°
2	1 ATM, 25 °C	1.9859°	7	0 ATM, 25 °C	1.9626°
3	1 ATM, 20 °C	1.9890°	8	0 ATM, 20 °C	1.9651°
4	1 ATM, 15 °C	1.9918°	9	0 ATM, 15 °C	1.9677°
5	1 ATM, 10 °C	1.9947°	10	0 ATM, 10 °C	1.9702°

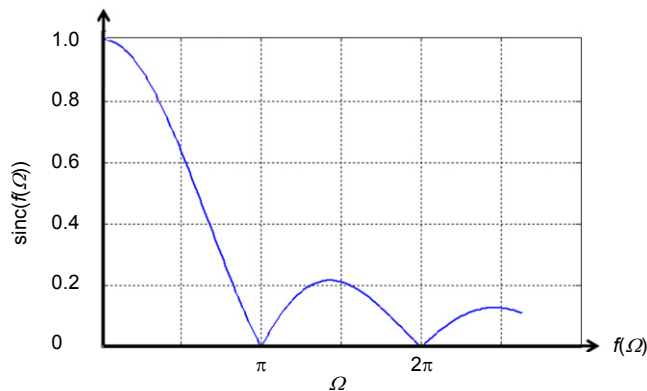


图4 立体角与干涉条纹调制度关系曲线。

Fig. 4 Relationship curve between solid angle and modulation degree of fringe.

尽可能控制在 sinc 函数较为平缓的区域。根据表 2 及式(8)可知,常压状态 10 °C 与真空状态 30 °C 条件下,复原光谱强度变化约为 0.26%。

3) 经扩视场棱镜后,仪器对应的孔径立体角增大为原来的  $\tan \theta_L / C(n, \gamma)$  倍,且经扩视场棱镜后单色光对应的空间频率也将发生改变,不同光源类型对仪器性能参数影响如表 3 所示。

空间外差干涉光谱仪在利用扩视场棱镜进行光源扩展后,其空间频率和基频波长均与理想点光源所获得的仪器参数不同,对于超光谱 CO<sub>2</sub> 监测仪的光谱定标尤为重要。如图 5 所示为 2° 发散半角入射干涉仪系统,不同光源下产生的基频波长平移量。理论计算得到的理想点光源单色光波数与空间频率解析表达式,在实际应用过程中需要进行一定量的移动才能与实际光谱谱线相对应。

同时,由于环境温度和压力变化会导致准直镜头焦距改变,如常压 20 °C 前后镜组焦距分别为  $F_{\text{Colli}_01}$  63 mm 和  $F_{\text{Colli}_02}$  99.22 mm; 真空 20 °C 状态下,前后镜组焦距分别为  $F_{\text{Colli}_01}$  62.95 mm 和  $F_{\text{Colli}_02}$  98.87 mm, 准直

镜头焦距由  $4.85 \times 10^5$  mm 变化为  $4.08 \times 10^4$  mm, 出瞳大小在光栅色散方向上变化约 0.02 mm。通常,为减少光栅装调和胶合的难度,前置准直照明设计出瞳远大于光栅有效照明区域,故环境变化导致出瞳大小的改变远小于设计余量,且监测仪光谱分辨率保持不变。

### 3.2 干涉仪组件热真空效应

核心干涉仪组件的热真空效应主要有: 1) 温度变化导致除光栅外的干涉仪元件中心厚度发生变化; 2) 热真空环境下干涉仪各元件,尤其是扩视场棱镜(field widened wedge, FW)元件相对折射率的变化,以及光栅基材受热环境变化热膨胀导致刻线密度的改变。

1) 由于环境温度的改变对于无焦的各棱镜元件而言,只能引起其光轴上中心厚度的变化以及径向尺寸的改变。对于  $(20 \pm 5)$  °C 干涉仪组件(材料 SiLiCa)单臂形成的光程变化为 4.438 μm, 双臂在温度梯度最恶劣条件下导致的光程差变化不大于 9 μm, 远小于“干涉仪元件中心厚度加工误差  $\pm 20 \mu\text{m}$ ”<sup>[8]</sup>, 因此,该影响可以忽略不计。

表 3 不同光源类型对空间外差光谱仪性能的影响。

Table 3 The parameters of SHS used in different types of sources.

Source type	Solid angle	Modulation	Fringe frequency	Littrow wavelength shift
Point	0	1	$4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L$	0
Extend	$\frac{2\pi}{R}$	$\geq 0.63$	$4[\sigma(1 - \frac{\Omega_{m1}}{4\pi}) - \sigma_0] \tan \theta_L$	$(1 - \frac{\Omega_{m1}}{4\pi})\sigma$
Field widened	$\frac{2\pi \tan \theta_L}{R C(n, \gamma)}$	$\geq 0.63$	$4[\sigma(1 - \frac{\Omega_{m1} C(n, \gamma)}{2\pi \tan \theta_L}) - \sigma_0] \tan \theta_L$	$(1 - \frac{\Omega_{m1} C(n, \gamma)}{2\pi \tan \theta_L})\sigma$

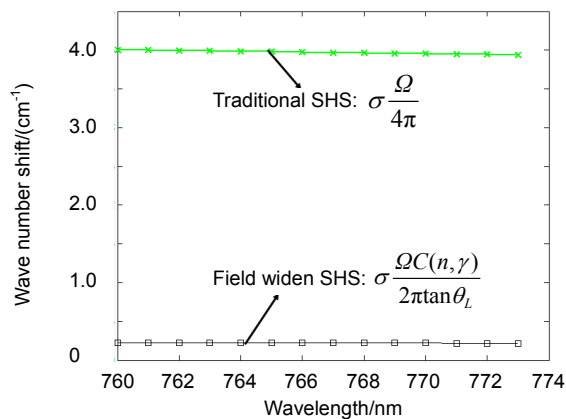


图 5 光源类型与基频波长平移量变化。

Fig. 5 The variation between source types and shift of Littrow wavelength.

2) 对于光栅, 光栅刻线周期与干涉仪基频关系:

$$2d\sin\theta = k\lambda, \quad (9)$$

其中:  $k$  为光栅的衍射级数,  $d$  为光栅刻线周期,  $\lambda$  为干涉仪基频波长,  $\theta$  为基频波长对应的 Littrow 角。由于高温膨胀其刻线密度会随之较小, 相应地, 低温收缩其刻线密度会相应增大。由于探测器大小和成像镜头的缩放比决定了光谱维光栅有效区域  $W$ , 因此, 当高温刻线密度下降时, 基频向长波方向移动, 光谱分辨能力随之降低; 反之, 当温度降低时, 基频向短波移动, 光谱分辨能力提高。如图 6(a) 为常压状态下, 不同光栅基材仅温度改变导致的基频变化曲线。假设基频变化不大于  $\pm 0.005$  nm, 则 BK7 光栅基材允许的温度变化范围约为  $19^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$ , SiLiCa 光栅基材允许的温度变化范围约为  $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 。

在选择低膨胀系数光栅基材的基础上, 将扩视场棱镜热折变与光栅刻线周期二者因受环境变化, 对于

涉仪基频产生的影响进行综合定量评估, 如图 6(b) 所示, 当干涉仪元件均采用 SiLiCa 时, 扩视场棱镜热折变导致基频波长的改变量远大于光栅刻线周期对其的影响。

理论上, 干涉仪组件内元件材料应选择低热膨胀系数材料(如 SiLiCa)作为光栅基材, 低热折变系数材料(如 BK7)作为扩视场棱镜最为合理, 但在实际应用过程中一般选取同一种低热膨胀系数材料 SiLiCa 作为核心干涉仪组件进行光胶, 如图 7 所示为相同工作温度  $20^\circ\text{C}$  时, 常压与真空状态下 SiLiCa 波长与折射率的变化曲线。因此, 监测仪由于热真空环境导致的基频波长变化, 通常需要在轨的光谱定标或相应的波长系数误差修正算法加以校正<sup>[9,10]</sup>。

### 3.3 成像镜头热真空效应分析

成像镜头采用前后镜组的方式对定域面干涉条纹

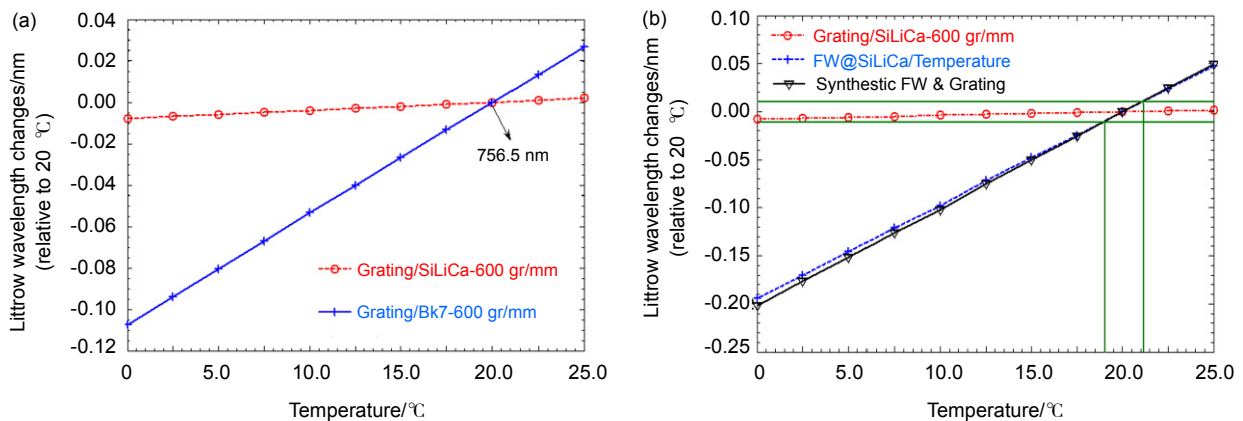


图 6 (a) 光栅刻线周期受温度改变与基频的变化关系(常压). (b) 扩视场棱镜及光栅受温度改变与基频的变化关系曲线(常压).

Fig. 6 (a) Relationship between temperature and Littrow wavelength in normal pressure. (b) Temperature effect on Littrow wavelength (FW and grating).

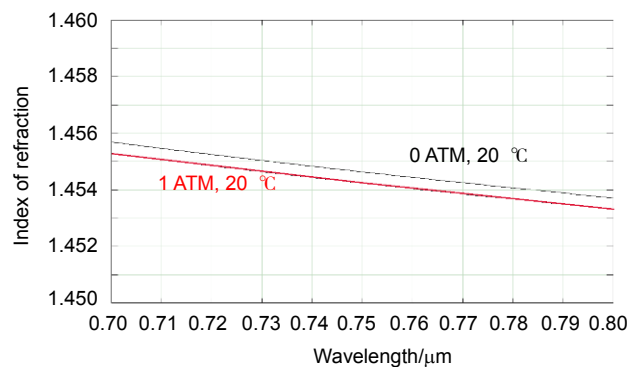


图 7 真空与常压下融石英折射率变化.

Fig. 7 Refractive index change in normal pressure and vacuum environment.

进行比例缩放,受热真空环境变化的影响主要有两方面因素:1) 离焦导致光学系统传递函数 MTF 变化; 2) 缩放比改变。

1) 根据成像镜头设计文件,在环境温度 20 °C 常压和真空状态下,其 MTF 变化曲线如图 8 所示。成像镜头离焦导致不同空间频率的干涉条纹对比度发生变化,且在截止频率处,即监测仪有效波段内远离基频波长最远工作波数产生的干涉条纹对比度下降约 11.3%,不同频率空间干涉条纹对比度的变化最终会导致复原光谱廓线形状的变化。

2) 由于环境温度和压力变化会导致成像镜头焦距改变,常压 20 °C 时前后镜组焦距分别为  $F_{\text{Ima}_01}$  64.14 mm 和  $F_{\text{Ima}_02}$  29.81 mm; 真空 20 °C 状态下,前后镜组焦距分别为:  $F_{\text{Ima}_01}$  63.95 mm 和  $F_{\text{Ima}_02}$  29.78 mm,成像镜头缩放比由 -0.62099:1 变化为 -0.62088:1,镜头缩放比改变导致仪器光谱分辨率发生变化,如式(10):

$$\delta\sigma = \frac{1}{2 \times 4x_{\text{max}} \tan\theta} = \frac{1}{tN \cdot \beta \sin\theta}, \quad (10)$$

其中:  $x_{\text{max}}$  为光栅色散方向上最大值,  $t$  为探测器像元尺寸,  $N$  为光谱维有效采样点数,  $\beta$  为成像系统缩放比,即色散方向上光栅有效长度与探测器光谱维尺寸之比。可知,成像镜头在真空状态下,缩放比改变使得光谱分辨能力相应提高约 0.018%,同时,在探测器像元数目一定的条件下,仪器有效光谱带宽也会相应减少。因此,成像镜头应尽可能采用双远心的光路形式,避免由于离焦导致缩放比发生较大变化。

### 4 试验验证

对基于空间外差干涉光谱技术的超光谱 CO<sub>2</sub> 监测仪的 O<sub>2</sub>-A 波段光谱仪进行了实验,实验布局如图 9 所示。针对空间环境载荷热真空环境适应性需求研制的 CS-800 型热真空模拟设备,利用该设备可对监测仪

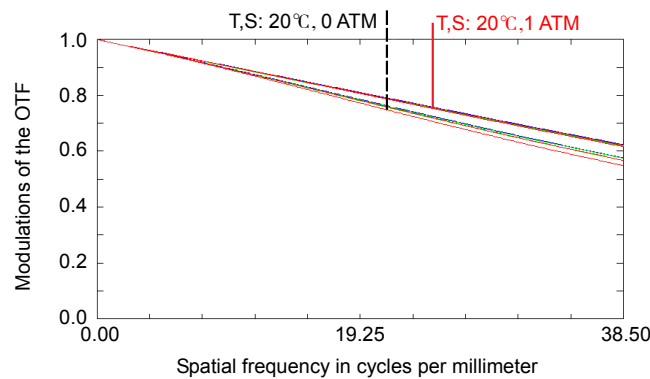


图 8 不同压力下成像镜头 MTF 曲线。

Fig. 8 MTF curves of imaging lens at different pressures.

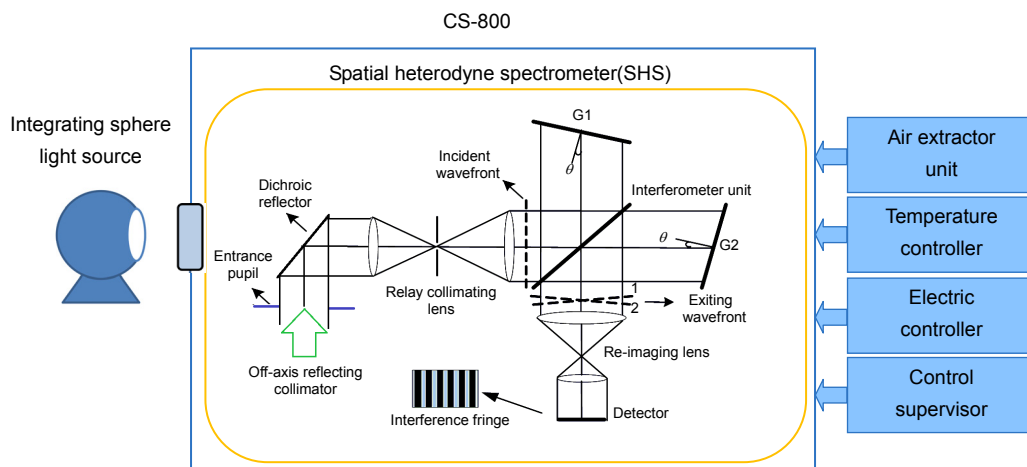


图 9 实验布局示意图。

Fig. 9 Schematic diagram of experiment at layout.

进行热真空、高低温等环境下的光学性能测试。该设备主要技术参数如下：真空室热沉净尺寸为 $\phi 825 \times 1100$  mm；极限真空度 $\leq 6.7 \times 10^{-6}$  Pa；恢复真空时间 2 hour 内 $\leq 8.0 \times 10^{-5}$  Pa；控制温度范围 $-175$  °C $\sim$  $+125$  °C；升/降温速率 2 °C/min；控温稳定性 2 °C/hour。

实验过程中，设置真空度  $3.9 \times 10^{-6}$  Pa 条件下，不同环境温度(20 °C、10 °C、0 °C)使得成像镜头处于三

种不同的离焦状态，且调节过程中积分球输出亮度不变，获得三种调制度下的干涉图，分别获得其原始干涉图、单行干涉图曲线以及复原光谱如图 10(a)、10(b) 和 10(c)所示。由于系统基频波长选择在短波方向，据图 8 可知，离焦时远离基频波长处对应的干涉条纹对比度下降明显，故图 10(c)中远离基频波长对应的光谱采样点其复原光谱强度下降也较为明显。

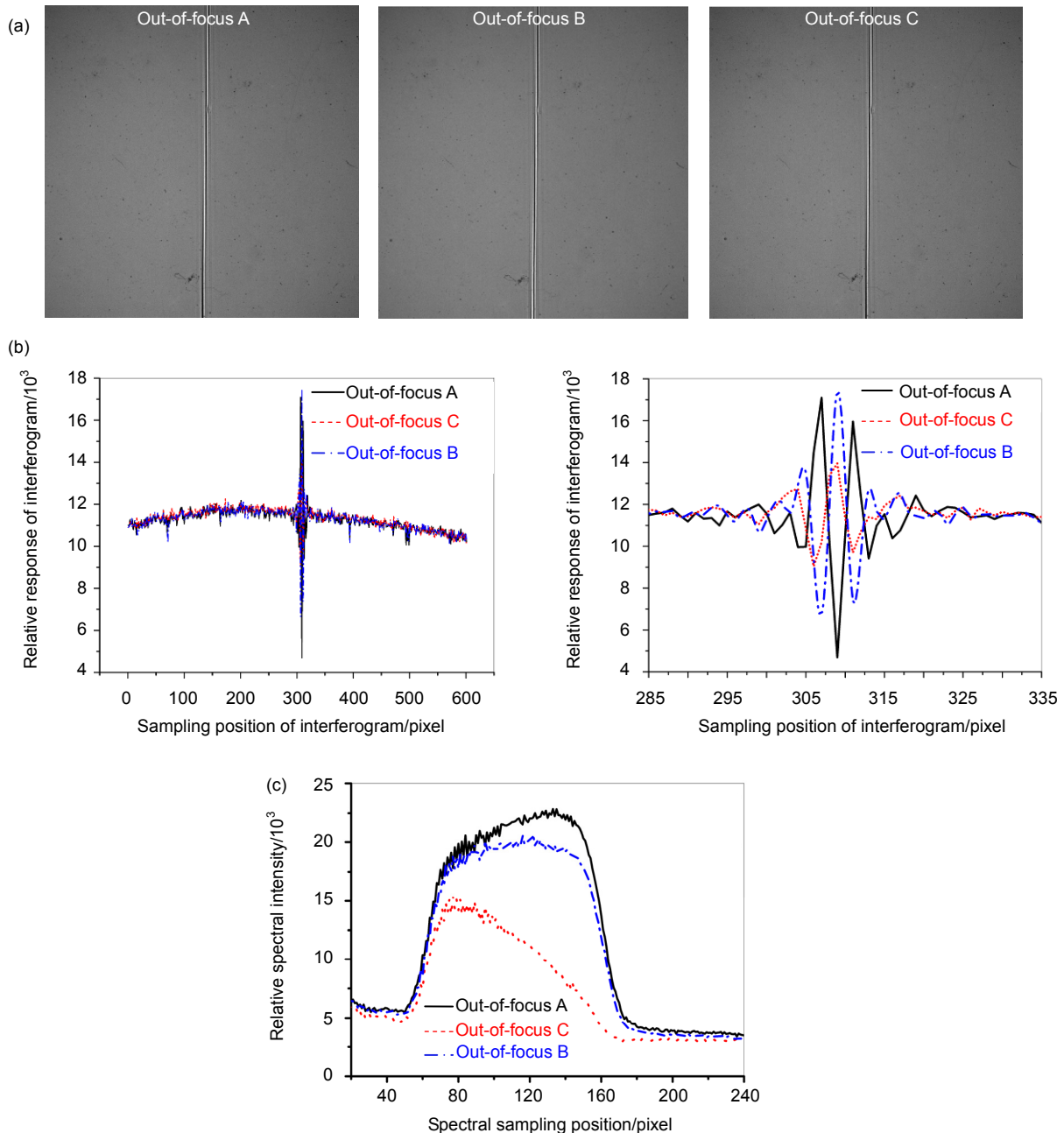


图 10 (a) 不同离焦状态下原始干涉图. (b) 第 300 行原始干涉及局部放大图. (c) 第 300 行原始干涉图复原光谱.

Fig. 10 (a) Original interferogram at different defocusing. (b) The 300th-row of original interferograms. (c) Recovered spectrums of the 300th-row from original interferograms.



从图 10(c)可知,复原光谱的相对强度和廓线形状均发生了改变:一方面由于准直系统热真空效应导致发散角增大,干涉调制度降低,复原光谱强度整体降低;另一方面由于成像系统离焦,高空间频率的干涉条纹成像对比度急剧下降,导致光谱廓线形状发生改变。

根据上述章节计算得到,由于光学材料折射率的变化所引起的基频改变为  $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,即低温导致的基频波长变化为  $-0.095 \text{ nm}$ ;由于大气压改变所引起的相对折射率变化使得基频改变量为  $+0.385 \text{ nm}$ ,故在真空热控条件为  $11.5 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,系统理论基频波长向长波漂移量约为  $+0.29 \text{ nm}$ 。实验条件真空度  $3.9 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ ,干涉仪组件内反馈温度  $11.4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 11.5 \text{ }^\circ\text{C}$  状态下,测试得到该通道光谱仪系统基频波长为  $756.1 \text{ nm}$ ,与正常大气压下利用可调谐激光器测试得到的系统基频波长  $755.78 \text{ nm}$  相吻合。

## 5 结 论

超光谱  $\text{CO}_2$  监测仪的  $\text{O}_2\text{-A}$  波段光谱仪不同工作状态下系统各功能组件,如准直镜头、干涉仪组件和成像镜头,对复原光谱的影响进行了理论分析。由于准直光束发散半角的变化导致干涉条纹调制度改变,从而影响复原光谱强度,且当准直光束发散半角变化大于  $0.04^\circ$  时,对应的复原光谱强度变化约为  $0.26\%$ ;干涉仪组件均采用同一光学材料(SiLiCa)时,由于热折射率变化导致系统基频的改变量占主导因素,且当系统光谱定标精度要求优于  $0.01 \text{ nm}$  时,对应的干涉仪组件的温控精度应优于  $19 \text{ }^\circ\text{C} \sim 21.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;成像镜头不同温度下的离焦量影响不同频率干涉条纹的对比度,进而影响复原光谱的廓线形状,且缩放比的改变同时影响系统的光谱分辨能力。

使用 CS-800 型热真空模拟设备进行了实验,并与常温常压下系统基频波长  $755.78 \text{ nm}$  相对比,结果显示,实测结果与理论值吻合,且复原光谱廓线形状随镜头不同离焦状态改变状态与理论分析相一致。

该分析为空间外差干涉光谱仪各功能组件的热控要求、地基常压条件下基频的选定等问题提供了理论依据。对于绝对辐射定标精度要求  $5\%$ ,相对辐射定标

精度  $2\%$  以及光谱定标精度优于  $5.7 \times 10^{-3} \text{ nm}@760 \text{ nm}$  的超光谱监测仪,除了在设计阶段对各功能组件的环境适应性进行控制和要求外,还需要开展新型光谱定标修正实验与方法的研究,提高地面与在轨光谱和辐射定标精度,为高精度温室气体反演工作奠定基础。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(41605014)。

## 参考文献

- 1 Harlander J M. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning[D]. USA: University of Wisconsin-Madison, 1991.
- 2 Smith B W, Harlander J M. Imaging spatial heterodyne spectroscopy: theory and practice[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3698**: 925–931.
- 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 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**(D20): D20306.
- 5 Lin Yunlong, Shepherd G, Solheim B, et al. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]. ITSC- X IV Proceedings, Beijing, China, 2005.
- 6 Doe R A, Watchorn S. Climate-monitoring CubeSat mission ( $\text{CM}^2$ ): a project for global mesopause temperature sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **8153**: 81530Q.
- 7 Shi Hailiang, Xiong Wei, Zou Mingmin, et al. Study on calibration method of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1683–1687.  
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): 1683–1687.
- 8 Luo Haiyan, Shi Hailiang, Li Shuang, et al. Study on the performance indexes of spatial heterodyne spectrometer influenced by elements tolerances[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(3): 0330002.  
罗海燕, 施海亮, 李双, 等. 空间外差光谱仪干涉仪组件的容差分析[J]. *光学学报*, 2014, **34**(3): 0330002.
- 9 Shi Hailiang, Li Zhiwei, Luo Haiyan, et al. Error correction of spectral calibration for hyper-spectral atmosphere  $\text{CO}_2$  monitoring instrument[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(7): 2296–2299.  
施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等. 超光谱大气  $\text{CO}_2$  监测仪光谱定标误差修正[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(7): 2296–2299.
- 10 Ye Qinghao, Shi Hailiang, Xiong Wei. Blind-data error correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(12): 25–29.  
叶擎昊, 施海亮, 熊伟. 空间外差光谱仪数据盲元误差修正[J]. *光电工程*, 2015, **42**(12): 25–29.