

空间外差光谱仪干涉仪组件的容差分析

罗海燕 施海亮 李 双 熊 伟 洪 津

(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 利用空间外差光谱仪理论模型对由两臂分束器、光楔隔片、光楔、光栅隔片及光栅组成的十胶合干涉仪组件各元件容差进行模拟,采用非序列仿真获取干涉图,经傅里叶变换后得到仪器入射光谱曲线,分析干涉仪组件中元件容差对系统性能指标产生的影响,指出了空间外差干涉仪各元件的加工和胶合容差。各元件的角度容差、中心厚度容差、光栅刻线密度、光栅刻线方向转角容差以及光谱仪两臂的一致性都会对系统性能指标产生影响。同时,根据上述容差约束制造的空间外差光谱仪样机经定标获取的系统性能指标与其理论设计一致性很好,满足系统的容差范围。

关键词 光谱学;空间外差光谱仪;系统指标;元件容差;干涉图

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0330002

Study on the Performance Indexes of Spatial Heterodyne Spectrometer Influenced by Elements Tolerances

Luo Haiyan Shi Hailiang Li Shuang Xiong Wei Hong Jin

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The system performance index of spatial heterodyne spectrometer (SHS) influenced by elements tolerances, which include the angle tolerances, thickness tolerances, index of inconsistency and so on, is analyzed through processing interference images with non-sequence model of spatial heterodyne spectroscopy. Following the grade of the manufacturing tolerance put forward by non-sequence model, and incident spectrum of SHS recovered by Fourier transformation, the prototype instrument of SHS is built and tested in the laboratory, and the performance characteristics are verified. The goal is to design an interferometer that all components do not need any further position or angle adjustment. According to distribution results of tolerance by analysis, the instrument is produced, and the results show that the instrument performance indexes are in agreement with the theoretical characterization.

Key words spectroscopy; spatial heterodyne spectrometer; performance index; elements tolerances; interference image

OCIS codes 120.4570; 120.4820; 280.4788; 300.6320

1 引 言

1990 年 Harlander 等^[1-2]开始采用 CCD 探测器进行实用型空间外差式光谱仪研究,积极发展空间外差光谱技术,经过多年发展,空间外差光谱技术凭借其光通量大、无运动部件、结构紧凑、适用于任

何波段等优势^[3-6]已成功应用在天文学领域。2000 年,Englert 等^[7-9]开始研制 Spatial Heterodyne IMager for MEsospheric Radicals (SHIMMER) 系统用于发展星载遥感系统对大气进行全球探测。加拿大航天局(CSA)于 2004 年进行 Spatial Heterodyne

收稿日期: 2013-09-02; **收到修改稿日期**: 2013-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)、中国科学院合肥物质科学研究院青年人才专项(Y03RC21123)

作者简介: 罗海燕(1982—),女,博士研究生,主要从事超高光谱遥感探测器光机设计技术方面的研究。

E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

导师简介: 洪 津(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学及偏振遥感等方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

Observations of Water(SHOW)项目的研究工作^[10],目标是发展星载红外 SHS 光谱仪系统对 15~85 km 高度大气层中的水汽进行全球监测,该项目的主要任务是用于验证 SHS 系统探测平流层水汽的能力。

中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2006 年开始进行空间外差光谱技术研究^[11-13],主要用于高光谱气候与环境监测,以大气中主要的温室气体为探测对象,通过获取的各气体的吸收光谱信息,反演大气主要温室气体浓度。其中发展的 O₂ 通道为辅助探测通道,选择 0.759 μm 较为洁净的吸收带作为探测波段,只有少量气体吸收干扰,且可见波段对光学材料和探测器的要求相对较低。本文针对该通道建立非序列仿真模型,对干涉仪组件容差进行分析,将依据容差分析结果加工得到的样机性能与仿真结果比较,验证了干涉仪容差分配的合理性。

2 系统结构与基本原理

理论上,空间外差光谱技术可以适用于任何波段,即选定一个参考波长,形成可测的低频空间干涉条纹,为定标及评价和验证系统性能指标提供依据。光源或目标经准直镜头被具有一定物方数值孔径的透镜转化为具有一定视场角的平行光束入射至分束器,经分光后成为能量近似的两束相干光束,经两臂光栅衍射后光束返回至分束器,在光栅面,即定域面上形成干涉条纹,最后经成像镜头比例缩放后被探测器接收。

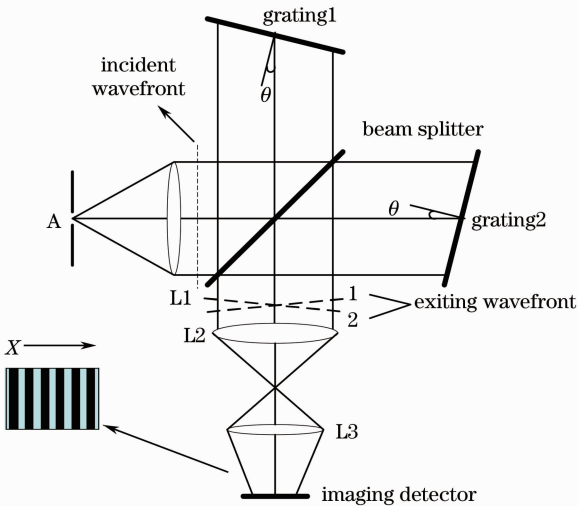


图 1 空间外差光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of basic SHS configuration

原理如图 1 所示,其中以参考波长入射的光经光栅后不发生衍射,此时入射光与光栅法线夹角为利特罗(Littrow)角;非参考波长的光入射至干涉仪形成干涉条纹,干涉条纹经傅里叶变换后可得到输

入光谱。

3 模型容差仿真分析

空间外差干涉原理属于扩展光源的定域干涉,入射至干涉仪各视场角的平面波形成的干涉条纹进行非相干叠加,因此在准直镜头出瞳位置,即光栅附近并非处处能观察到干涉条纹。干涉条纹反衬度最大的位置为定域中心,定域中心前后可看到条纹的范围的线度为定域深度。

利用系统分辨本领的要求来确定光栅的分辨本领,依据分辨本领和信噪比来确定是否需要扩视场,然后综合考虑约束条件确定光栅的刻线数,即光栅的有效尺寸,进而确定准直单元输出的光束尺寸。最终确定如下参数^[14-15]:

依据光谱分辨率和光谱范围选定基频,

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

式中 d 为光栅刻线周期, k 为光栅衍射级数, λ_L 为利特罗波长, θ_L 为利特罗角,光轴与扩视场光劈法线交角 γ ,

$$2(n_\lambda^2 - 1) \tan \gamma = n_\lambda^2 \tan \theta_L, \quad (2)$$

式中 n_λ 为光楔材料对利特罗波长的折射率,光劈顶角 α 可表示为

$$n_\lambda \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \gamma, \quad (3)$$

光束经光楔棱镜的最小偏向角 δ_m 和光栅转角 ω 可分别表示为

$$n \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right), \quad (4)$$

$$\omega = \delta_m - \theta_L. \quad (5)$$

干涉仪所能接收的视场角是由有效波数 σ 和分辨率 $\delta\sigma$ 共同决定的。光源经过准直镜头形成具有一定视场角的光束入射至干涉仪,形成干涉后经成像镜头将光栅位置附近的干涉条纹成比例缩放放在探测器面上。较为洁净笔直的干涉条纹表明干涉仪各元件面型精度和材料的均匀性很好。其中,一体化胶合干涉仪性能指标主要包含:基频波长、光栅倾角、条纹对比度以及光谱分辨能力。转化为光谱图与理论值对比,分析得到干涉仪十胶合件的元件制造容差、光栅胶合装调机构的调整范围和调节精度。

建立非序列仿真模型如图 2 所示,其详细设计参数如表 1 所示。

理想模型对应单色光 σ 干涉条纹计算公式如下:

$$L_{\text{number}} = f \times w \times \beta, \quad (6)$$

式中 f 为波数为 σ 时的空间频率, L_{number} 为条纹数, w 为探测器光谱维宽度, β 为放大倍率。

表 1 氧气通道干涉仪组件设计参数表

Table 1 Design indexes of interferometer unit on O₂ channel

No.	Parameters	Performance index
1	Littrow wavelength	757 nm
2	Ruled area	32 mm×26 mm
3	Groove density	600 groove/mm
4	Littrow angle θ_L	13.126°
5	Resolution	0.5 cm ⁻¹
6	Detector	1024×1024@13 μm
7	Beam splitter	50 mm×50 mm
8	Field of angle	2.5°
9	Image optics ratio	0.6207

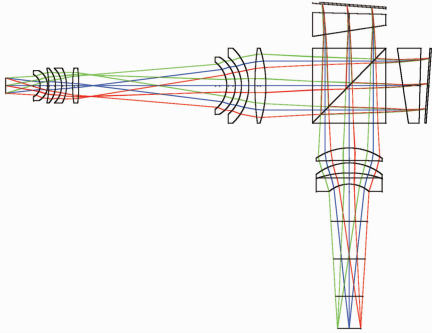


图 2 氧气通道理想干涉仪模型

Fig. 2 Ideal model of interferometer about O₂ channel

对于一定的单色光谱输入 $B(\sigma)$ ，探测器在干涉组件光栅衍射方向 x 上获取的干涉图信号为

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4x(\sigma - \sigma_0)\tan\theta]\}\} d\sigma, \quad (7)$$

式中 σ 为入射光波数， σ_0 为利特罗波数， θ 为轴向光入射的光栅上的角度。则任意波数 σ 单色光入射至光谱仪，在干涉条纹定域面上产生夹角为 2γ 的出射光束波面，故产生的干涉条纹空间频率为

$$f_x = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta. \quad (8)$$

干涉组件各元件的中心厚度误差所引起的两臂厚度不一致性会引起光谱仪零光程差点位置 x 的改变，角度误差即为(8)式中 θ 值，且干涉组件各元件误差相互独立。根据仪器要求的光谱带宽指标分配零光程差点容差，即各元件中心厚度在光栅衍射方向的偏差，同时根据基频及光谱分辨率指标来限定各元件角度加工误差^[16]。通过计算可知，757.5 nm 波长对应干涉条纹数为 17.96，如图 3 所示。

如上所述，干涉仪组件中两臂光栅理论转角为 84.8638°、174.8638°，分别将两臂光栅转角改变 2"，即 84.8643°和 174.8643°。将 756 nm 和 765.6 nm 波长的单色光入射至光栅转角误差的干涉仪内，进行图谱分析后得到的光谱与理想模型复原光谱对比

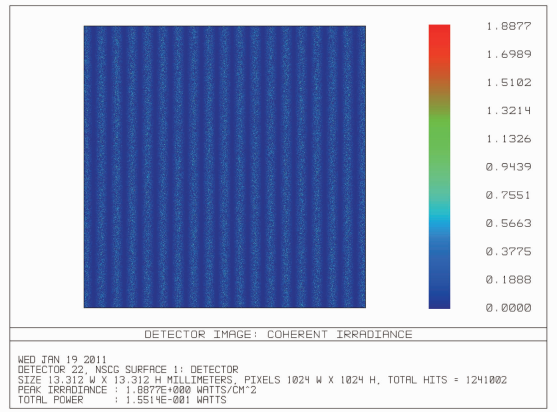


图 3 单波长 757.5 nm 模型仿真干涉图

Fig. 3 Interferometric fringe about laser of 757.5 nm

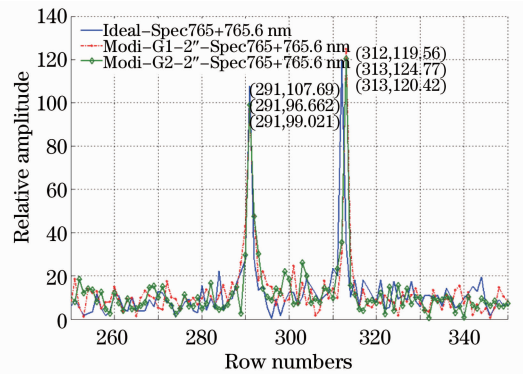


图 4 两臂光栅转角不一致性容差分析

Fig. 4 Effect of gratings angle error on spectrum 如图 4 所示。

通过反演光谱图可知，两臂光栅转角的不一致性会导致光栅基频的改变，且改变量对相对基频不同位置处谱峰的位置影响也不尽相同。上述模型中涉及的分束器、隔片以及光楔加工造成的角度误差最终都会反映在两臂光栅转角上，因此对两臂光栅转角的不一致性控制的容差范围应在该波段内起始波长峰值对应的采样点位置不变的前提下，保证最大波长处对应的谱峰位置在探测器采样极限内，并将上述容差分解至干涉仪组件各单元。

干涉主体两臂厚度不一致性会导致单臂波面处于离焦状态，由于棱镜及光栅转角未发生改变，因此厚度不一致性误差的引入不会改变分束器出射面处两臂产生的波面夹角的改变，即基频不变，但是由于单臂的波面图像不清晰，会导致整体图像的干涉度降低，反演的光谱图信噪比下降。干涉仪组件存在中心厚度误差反演所得光谱与理想模型复原光谱对比如图 5 所示。

因此评估干涉主体厚度不一致性容差指标，应以信噪比作为约束条件。保证由于厚度误差引起的

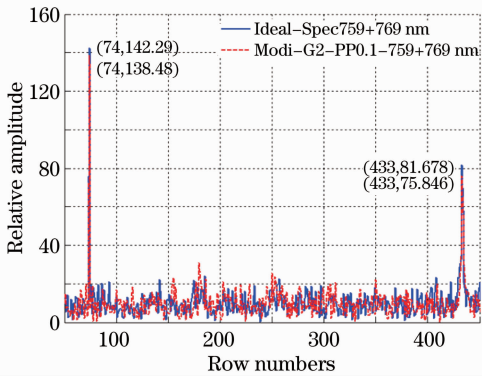


图 5 两臂光栅厚度不一致性容差分析

Fig. 5 Tolerance about gratings location effect on spectrum

干涉度降低的误差在随机误差范围内的波动都是可以接受的。干涉仪组件容差列表如表 2 所示。

表 2 干涉仪组件容差分配

Table 2 Tolerance limit of interferometer element

No.	Parameters	Tolerance
1	Angle error	$\pm 2''$
2	Pyramidal error	$\pm 5''$
3	Thickness error	$\pm 0.05 \text{ mm}$
4	Cumulative angle error	$\pm 10''$
5	Cumulative thickness error	$\pm 0.15 \text{ mm}$
6	Groove density accuracy	$\pm 0.1\%$
7	Groove orientation precision	$\pm 30'$

4 原理样机实测系统指标

干涉仪组件是光谱仪的核心单元,各元件容差在仪器性能上均表现为光谱范围、光谱分辨率以及仪器信噪比等参数。本文涉及的原理样机实测过程主要是利用光谱定标以获取光谱仪的光谱范围和光谱分辨率。利用可调谐激光器在一定范围内连续改变激光输出的波长的特征,针对原理样机的光谱范围,调制出不同的波长值。激光器发出单色特征明显的光谱,导入积分球后在出口形成均匀准朗伯性的面光源。均匀面光源入射至原理样机,原理样机采集单色光干涉图像并进行光谱复原,从而获取单色光光谱图,利用光谱定标数据处理算法^[17]处理可得到原理样机的光谱范围及光谱分辨率,如图 6 所示。

光谱分辨率测试采用测量仪器线型函数(ILS)的半峰全宽(FWHM)获取,通过测量 ILS 的 FWHM 数值,可得该仪器光谱分辨率为 0.512 cm^{-1} 。根据波长回归方程计算可得 O_2 光谱通道为 $757.09 \sim 771.81 \text{ nm}$,即基频为 757.09 nm ,符合基频设计允差 $\pm 0.3 \text{ nm}$ 的要求。该波段光谱仪 ILS 曲线如图 7 所示。

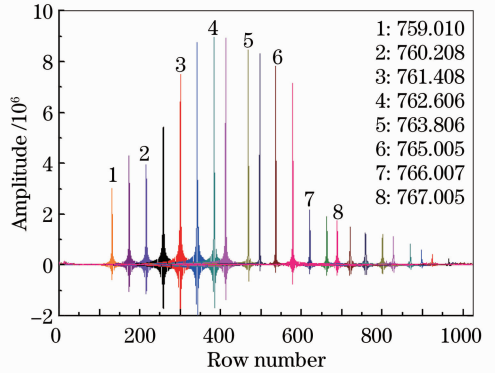


图 6 可调谐激光扫描光谱数据

Fig. 6 Spectrum results based on tunable laser

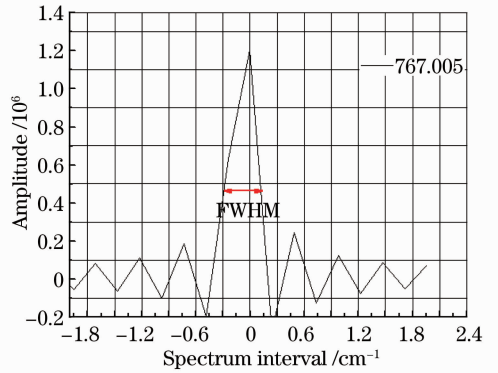


图 7 O_2 光谱通道 ILS

Fig. 7 Actual measurement ILS of O_2 channel

5 结 论

依据对光谱仪干涉仪中主体有效容差的分析,对各组成元件进行合理的容差分配。对加工胶合后的干涉仪组件进行了性能指标现场测试,各项性能指标均满足光谱仪要求,表明容差分配合理有效。

参 考 文 献

- 1 J M Harlander, F L Roesler. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for ground-based and space astronomy [C]. SPIE, 1990, 1235: 622-633.
- 2 F L Roesler, J M Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [C]. SPIE, 1990, 1318: 234-243.
- 3 J G Cardon, C R Englert, J Harlander, *et al.*. SHIMMER on STS-112: development and proof of concept flight [C]. AIAA Space 2003 Conference and Exposition, Long Beach, California, 2003.
- 4 B W Smith, J Harlander. Imaging spatial heterodyne spectroscopy: theory and practice [C]. SPIE, 1999, 3698: 925-931.
- 5 J Harlander, F L Roesler, R J Reynolds, *et al.*. Differential field-widened spatial heterodyne spectrometer for investigations at high spectral resolution of the diffuse far-ultraviolet 1548-Å emission line from the interstellar medium [C]. SPIE, 1993, 2006: 139-148.
- 6 S Watchorn, F L Roesle, J Harlander, *et al.*. Development of

- the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium [C]. SPIE, 2001, 4498: 284–295.
- 7 C R Englert, M H Stevens, D E Siskind, *et al.*. The Spatial Heterodyne Imager for Mesospheric Radicals (SHIMMER) on STPSat-1 [J]. J Geophys Res, 2010, 115(D20): D20306.
- 8 J M 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.
- 9 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.
- 10 Yunlong Lin, Gordon Shepherd, Brain Solheim, *et al.*. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development [C]. ITSC-X IV Proceedings Beijing, China, 2005, Poster.
- 11 Shi Hailiang, Xiong Wei, Li Zhiwei, *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.
- 12 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *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.
- 13 Ye Song, Xiong Wei, Wang Xinqiang, *et al.*. Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530001.
叶松, 熊伟, 王新强, 等. 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0530001.
- 14 Feng Yutao, Bai Qinglan, Wang Yongmei, *et al.*. Theory and method for designing field-widened prism of spatial heterodyne interferogram [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1030001.
冯玉涛, 白清兰, 王咏梅, 等. 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1030001.
- 15 J Harlander, R J Reynolds, F L Roesler, *et al.*. Spatial heterodyne spectroscopy: laboratory tests of field-widened, multiple-order, and vacuum ultraviolet systems [C]. SPIE, 1992, 1743: 48–59.
- 16 Sun Ting, Xing Fei, You Zheng, *et al.*. Optical system error analysis of high accuracy star trackers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323003.
孙婷, 邢飞, 尤政, 等. 高精度星敏感器光学系统误差分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323003.
- 17 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528002.
施海亮, 方勇华, 吴军, 等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528002.

栏目编辑：殷建芳