

# 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究

叶 松<sup>1</sup> 熊 伟<sup>2\*</sup> 王新强<sup>1</sup> 洪 津<sup>2</sup> 乔延利<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004  
<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)

**摘要** 空间外差光谱技术是一种新型的超分辨光谱技术,介绍了空间外差光谱仪的基本原理,由于光学系统的加工误差造成双光路的非对称性致使二维干涉条纹的倾斜及扭曲失真。针对二维干涉图的误差特点提出了基于频域分析的干涉图校正方法,通过多单色光光源定标获取二维干涉图快速傅里叶变换(FFT)频域的信号校正坐标并拟合校正曲线,校正曲线最终可用于该空间外差光谱仪干涉图的校正。以单色光光源、高斯型连续光谱光源的实验数据对校正方法进行验证。结果证明,采用该方法对空间外差光谱仪干涉图进行处理,能有效地去除系统非对称性影响,校正二维干涉图信号,提高干涉图反演光谱的精度。

**关键词** 光谱学;空间外差光谱仪;校正;干涉图

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0530001

## Correction of Spatial Heterodyne Interferogram Based on Frequency Domain Analysis

Ye Song<sup>1</sup> Xiong Wei<sup>2</sup> Wang Xinqiang<sup>1</sup> Hong Jin<sup>2</sup> Qiao Yanli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

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

**Abstract** Spatial heterodyne spectroscopy (SHS) is a new spectroscopic technique which can achieve high spectral resolution. The basic concepts of spatial heterodyne spectrometer are described. The two-dimensional (2D) interference fringe distortion is due to asymmetry of double optical path, which caused by the errors from optical systems of the interferometer. According to the characteristics of SHS interference fringe distortions, a SHS interferogram correction method based on frequency domain analysis is presented. The corrected coordinate of fast Fourier transform (FFT) frequency domain signal obtained from monochromatic source calibration. Then the calibration curve fitting from corrected coordinate can be used for correction of SHS interferogram. Spectral experiments are operated on the SHS instrument by monochromatic source and Gaussian continuous spectrum source. The experimental results show that the correction method can effectively remove interference of system asymmetry, correct 2D SHS interferogram and improve spectral inversion accuracy of spatial heterodyne spectrometer.

**Key words** spectroscopy; spatial heterodyne spectrometer; correction; interferogram

**OCIS codes** 120.0280; 280.4788; 300.6190; 300.6320

## 1 引 言

空间外差光谱技术(SHS)综合了光栅及空间调制干涉仪技术于一体,是近年来发展起来的一种新

型超分辨光谱分析技术<sup>[1,2]</sup>。该技术同时具有干涉仪的高通量和光栅空间衍射的特点,在某一确定的波长范围内,可以获得极高的光谱分辨率。从 20 世

**收稿日期**: 2012-11-18; **收到修改稿日期**: 2013-01-14

**基金项目**: 国家自然科学基金青年基金(41201342)和中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室研究资助课题。

**作者简介**: 叶 松(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事光学遥感、光学探测等方面的研究。

E-mail: yesongmail@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: frank@aiofm.ac.cn

纪 90 年代开始,欧美国家都积极开展空间外差光谱技术的相关应用研究工作,主要用于大气中微量成分的遥感探测<sup>[3]</sup>以及星际暗物质的天文观测<sup>[4]</sup>等方面。以美国的 SHIMMER<sup>[5,6]</sup>(中层大气 OH 空间外差成像仪)最具代表性,该系统于 2007 年 3 月至 2009 年 10 月搭载 STPSat-1 空间试验计划卫星开展中层大气探测实验。加拿大也进行了水汽空间外差光谱仪(SHOW)的研制工作,主要用于大气中水汽探测<sup>[7]</sup>。此外,在天文应用方面,美国麦迪逊 Pine Bluff Observatory 天文台研制的 PBO-SHS 系统用于星云暗物质超分辨光谱探测<sup>[8]</sup>。2005 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所也开始积极开展空间外差光谱技术的相关研究工作,目前正在研制用于水汽和二氧化碳探测的试验系统<sup>[9~14]</sup>。

干涉仪获取的干涉图通常情况下都会存在由系统误差所引起的干涉图失真,需要进行校正<sup>[15,16]</sup>。在空间外差光谱仪的研制过程中,由于光学系统的加工误差造成空间外差光谱仪双光路的非对称性致使二维(2D)干涉条纹出现倾斜及扭曲失真,需要用适当的方法和算法对干涉图进行校正<sup>[13,16]</sup>。本文结合空间外差光谱仪的基本原理及干涉图二维调制机理,阐述基于快速傅里叶变换(FFT)频域分析的空间外差干涉图校正方法,并给出实验结果。

## 2 空间外差光谱仪

空间外差光谱仪采用两个衍射光栅代替了迈克尔孙干涉仪中两个平面反射镜,其光学结构如图 1 所示。被测光束透过光阑 A,并经准直透镜 L1 后形成平面波,入射到分束器上,被分为强度相等的两束相干光,分别由光栅 G1、G2 衍射后返回分束器,两出射光束波面成一定夹角,形成空间调制的干涉条纹,最终成像于探测器上。探测器所记录的干涉条纹经傅里叶变换后可恢复被测光的光谱曲线。

如图 1 所示,两光栅与光轴正交面成  $\theta$  角(Littrow 角)。轴向光分别以  $\theta$  角入射到两光栅上,某一波数的光将沿  $\theta$  角原方向衍射返回,该波数即为光栅的 Littrow 波数。Littrow 波数的光经两光栅衍射后的出射波面均与光轴垂直,两位相差为零,形成零频率的空间干涉条纹。非 Littrow 波数的光经两光栅衍射返回后,两出射波面与光轴正交面形成夹角  $\pm\gamma$ ,形成一定频率的空间干涉条纹。不同波数的光从光栅出射时的波面与光轴正交面的夹角  $\gamma$  取决于光栅方程

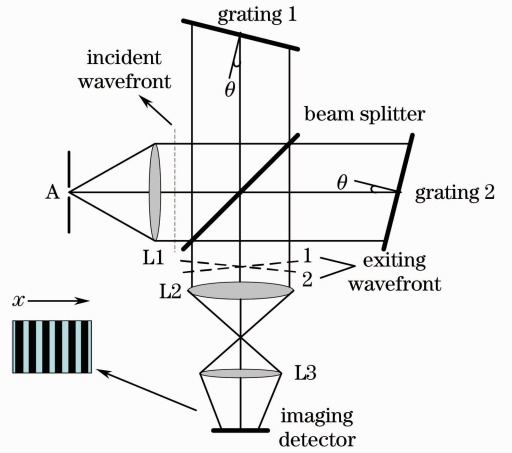


图 1 空间外差光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the SHS configuration

$$\sigma[\sin \theta + \sin(\theta - \gamma)] = \frac{m}{d}, \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为入射光波数,  $1/d$  为光栅刻线密度,  $m$  为衍射级(通常取  $m = 1$ )。若某波数  $\sigma$  的光束与 Littrow 波数  $\sigma_0$  的光束出射波面的夹角为  $\gamma$ , 则两光栅出射光波面的夹角为  $2\gamma$ , 波数为  $\sigma$  的两束光形成干涉条纹的空间频率为<sup>[1]</sup>

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

当入射光的光谱曲线为  $B(\sigma)$  时, 所形成的干涉图为

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)xtan \theta]\}\} d\sigma, \quad (3)$$

通过对(3)式的干涉图  $I(x)$  进行傅里叶变换即可恢复入射光的光谱曲线  $B(\sigma)$ 。

通过二维 CCD 探测器获取的二维干涉图可以由(4)式来描述。理想情况下二维干涉图只有  $x$  方向上的频率信号  $f_x = 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta$ , 而方向上的频率信号为 0(即  $f_y = 0$ ), 如图 2 所示。然而由于系统的误差, 如两光栅的不对称性导致在二维干涉图上除了有  $x$  方向频率信号, 同时还存在  $y$  方向频率信号(即  $f_y \neq 0$ ), 在干涉图上表现出来的现象为干涉图的旋转或扭曲, 如图 3 所示。

$$I(x, y) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y)]\} d\sigma. \quad (4)$$

对于二维干涉图  $f_x$  信号是干涉条纹调制频率信号, 而  $f_y$  是由于系统不对称造成的噪声频率。以两光栅不对称为例, 其中一光栅沿  $x$  轴倾斜  $\alpha$  角度。此时二维干涉图表达式为<sup>[1]</sup>

$$I(x, y) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta + \sigma y \alpha]\}\} d\sigma. \quad (5)$$

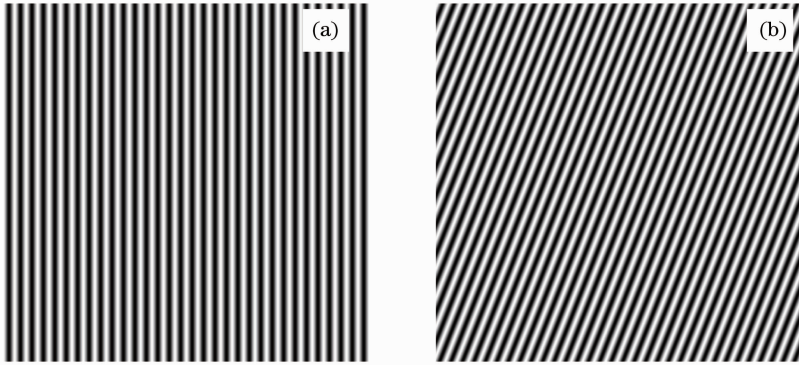


图 2 二维干涉图。(a)理想干涉图；(b)误差干涉图

Fig. 2 2D interferogram. (a) Ideal interferogram; (b) distorted interferogram

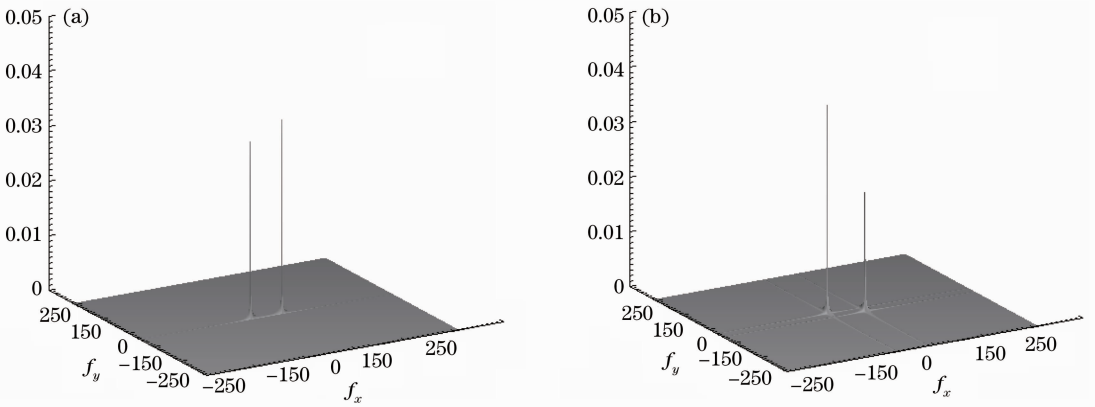


图 3 干涉图的二维 FFT 频谱信号。(a)理想干涉图二维 FFT 频谱信号；(b)误差干涉图二维 FFT 频谱信号

Fig. 3 2D FFT frequency signal. (a) 2D FFT frequency signal of ideal interferogram;

(b) 2D FFT frequency signal of distorted interferogram

对单色光的二维干涉图信号及其二维 FFT 频谱信号进行仿真，仿真结果如图 2、3 所示。从仿真结果来看，单色光理想干涉图的二维 FFT 频谱信号主要集中于  $(f_x, 0)$  与  $(-f_x, 0)$  两个区域， $f_y$  信号为 0。当其中一光栅倾斜的时候，干涉图会发生旋转(扭

曲)，此时在二维 FFT 频谱信息中产生  $f_y$  信号(此时  $f_y \neq 0$ )。

通过对二维 FFT 频谱信息进行处理保留  $f_x$  轴上的信号的同时消除  $f_y$  方向上的噪音(视为系统噪声)，再经过二维 FFT 逆变换就可以实现对干涉图

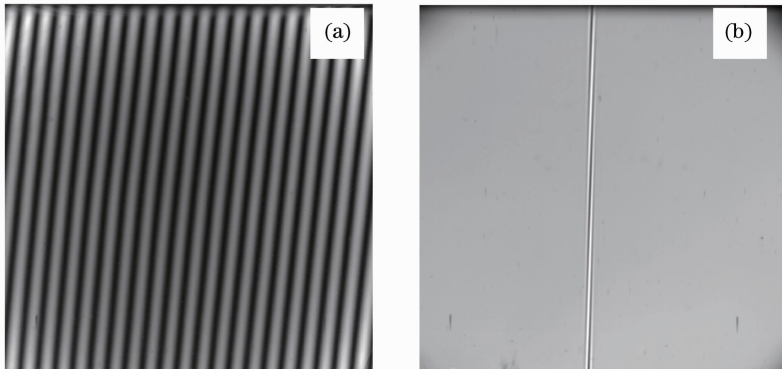


图 4 原始干涉图信号。(a)单色光干涉图；(b)复色光干涉图

Fig. 4 Raw interferogram. (a) Monochromatic light interferogram ; (b) polychromatic light interferogram

的旋转(扭曲)进行校正。本文基于中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的近红外空间外差光谱仪试验系统获取的实验数据进行干涉图校正,系统主要性能指标为:光栅 Littrow 波长:1569 nm;光谱范围:1569~1592 nm;光谱分辨率:0.092 nm。图 4 为原始干涉图信号,从图中可以看出,由于系统双臂的非对称性,导致单色光干涉条纹倾斜,复色光中心极大值条纹则扭曲倾斜。

### 3 干涉图校正方法

单色光理想干涉图的二维 FFT 频谱信号主要集中于 $(f_x, 0)$ 与 $(-f_x, 0)$ 两个区域,但由于光栅的非对称性导致频谱信号在 $f_y$ 方向上有位移。设单色光 $\sigma_0$ 的二维 FFT 频谱信号区域中心实际坐标为 $(f_{x\sigma_0}, f_{y\sigma_0})$ 与 $(-f_{x\sigma_0}, -f_{y\sigma_0})$ ,其二维干涉图的调制形式可由(6)式来描述,其频谱信号在 $f_y$ 方向存在

误差信号。通过将该点区域信号映射到 $(f_{x\sigma_0}, 0)$ 与 $(-f_{x\sigma_0}, 0)$ 坐标上即可对该单色光进行倾斜(扭曲)的校正,校正后的二维干涉图可以由(7)式来描述,通过频域信号校正后的干涉图消除了 $f_y$ 方向的误差信号影响:

$$I_{\sigma_0}(x, y) = B(\sigma_0) \{1 + \cos[2\pi(f_{x\sigma_0} \cdot x + f_{y\sigma_0} \cdot y)]\}, \quad (6)$$

$$I'_{\sigma_0}(x, y) = B(\sigma_0) \{1 + \cos[2\pi(f_{x\sigma_0} \cdot x)]\}. \quad (7)$$

以 1571 nm 单色光的二维 FFT 频谱信号为例,如图 5 所示, $(f_{x\sigma_0}, f_{y\sigma_0})$ 与 $(-f_{x\sigma_0}, -f_{y\sigma_0})$ 的坐标分别为(21, 2)与(-21, -2)。将此坐标上的频谱区域信号映射至(21, 0)与(-21, 0)区域,再通过 FFT 逆变换即可实现对 1571 nm 单色光二维干涉图进行校正。

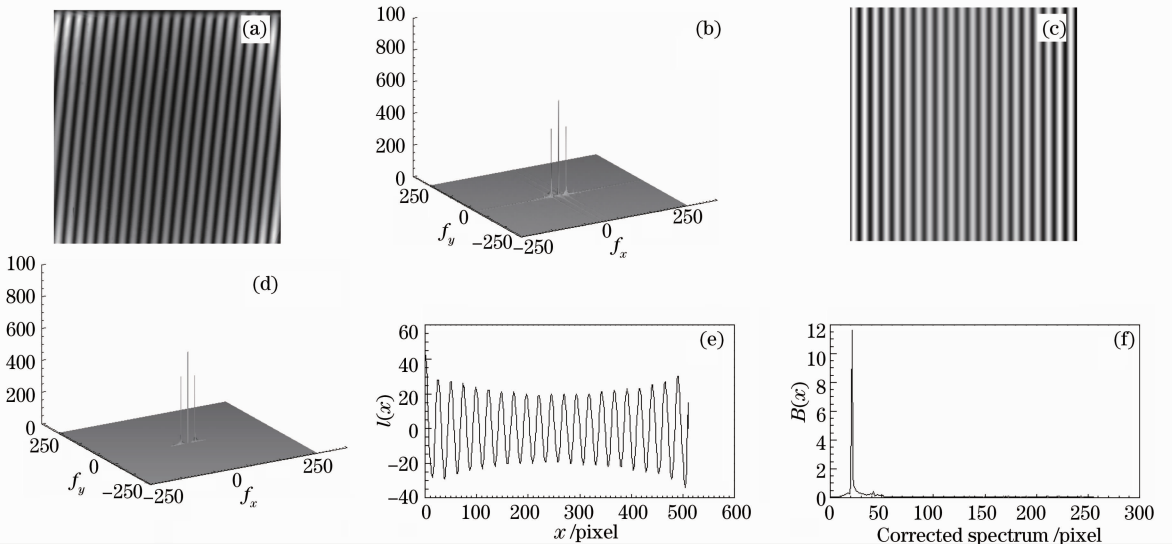


图 5 单色光干涉图校正结果。(a)原始干涉图;(b)原始干涉图二维 FFT 频谱信号;(c)校正后二维干涉图;(d)二维 FFT 频谱信号校正结果;(e)干涉图一维采样;(f)校正后光谱

Fig. 5 Correction results of monochromatic light interferogram. (a) Raw interferogram; (b) 2D FFT frequency signal of (a); (c) corrected interferogram; (d) correction from (b); (e) one-dimensional interferogram; (f) corrected spectrum

复色光谱可视为由单色光微分信号积分而成,因此通过多单色光定标测量可对系统进行校正。设单色光 $\sigma_i$ 的二维 FFT 频谱信号实际坐标为 $(f_{x\sigma_i}, f_{y\sigma_i})$ 与 $(-f_{x\sigma_i}, -f_{y\sigma_i})$ ,将该点区域信号映射到 $(f_{x\sigma_i}, 0)$ 与 $(-f_{x\sigma_i}, 0)$ 坐标上即可对该单色光进行倾斜(扭曲)的校正。

对 $f_x$ 在 $[-256 \sim 255]$ 上求对应的 $(f_{x\sigma_i}, f_{y\sigma_i})$ 坐标,并将其频谱区域信号映射至 $(f_{x\sigma_i}, 0)$ 点上即可作为系统信号校正参数,用于对系统任意采集信号进行校正,校正前后的干涉图数学形式可分别由

(8)、(9)式来描述:

$$I(x, y) = \sum_i B(\sigma_i) \{1 + \cos[2\pi(f_{x\sigma_i} \cdot x + f_{y\sigma_i} \cdot y)]\}, \quad (8)$$

$$I'(x, y) = \sum_i B(\sigma_i) \{1 + \cos[2\pi(f_{x\sigma_i} \cdot x)]\}. \quad (9)$$

实际应用中, $(f_{x\sigma_i}, f_{y\sigma_i})$ 坐标的获取可以通过多单色光定标测量获取,并拟合出用于校正的坐标曲线。本系统中 $(f_{x\sigma_i}, f_{y\sigma_i})$ 的单色光测量结果如表 1 所示。

通过表 1 中单色光实验获取的校正坐标拟合校

正曲线后对复色光光谱干涉图信号进行校正。  
图 6、7 分别为采用本文的方法对高斯型连续光谱进

行干涉图校正前后的数据处理结果。校正前后光谱  
与原始光谱的残差如图 8 所示，将本文的校正方法

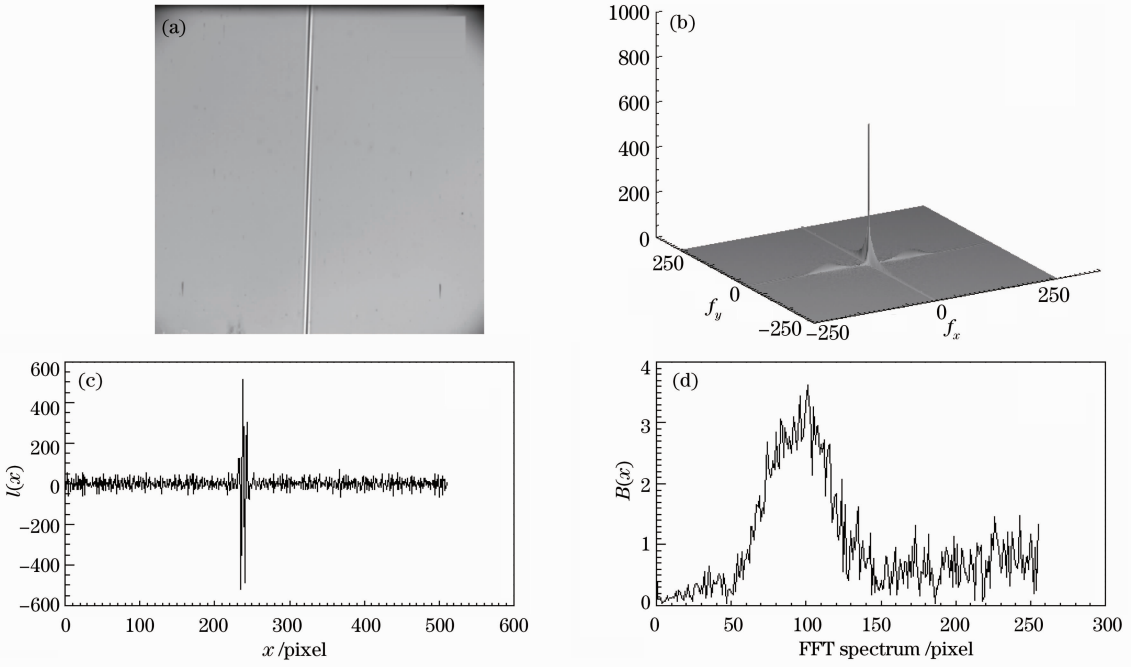


图 6 复色光干涉图及变换光谱。(a)原始干涉图；(b)原始干涉图二维 FFT 频谱信号；(c)原始干涉图一维采样；  
(d)傅里叶变换光谱

Fig. 6 Interferogram and spectrum of polychromatic light. (a) Raw interferogram; (b) 2D FFT frequency signal of (a);  
(c) one-dimensional interferogram of (a); (d) FFT spectrum

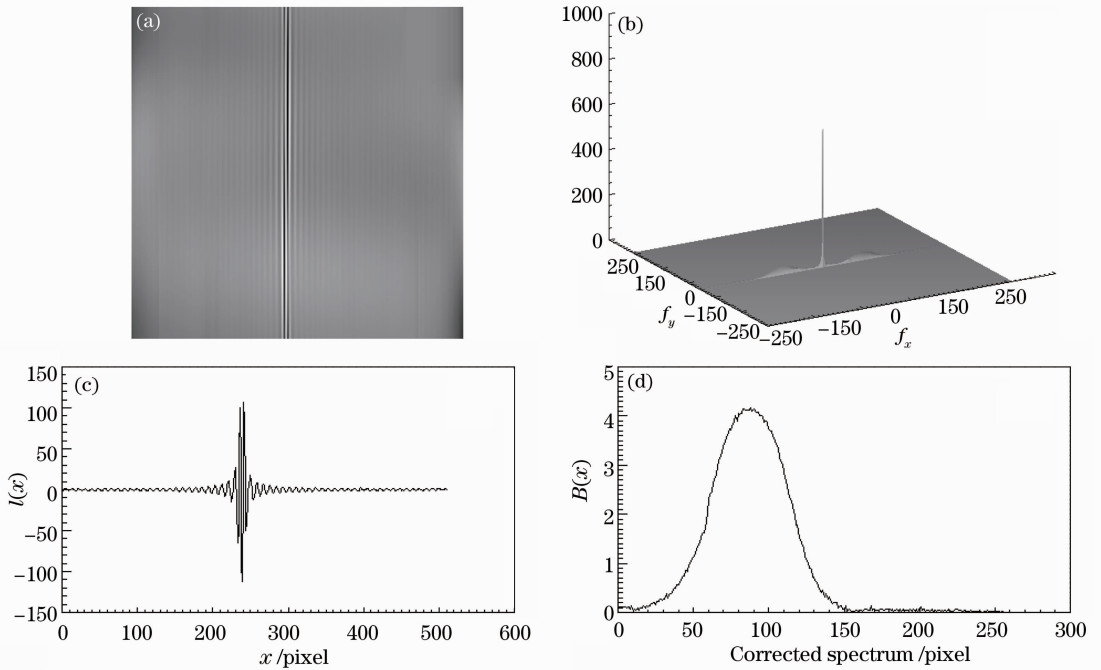


图 7 复色光干涉图校正结果。(a)校正后二维干涉图；(b)二维 FFT 频谱信号校正结果；(c)校正后干涉图一维采样；  
(d)校正后光谱

Fig. 7 Correction results of polychromatic light interferogram. (a) Corrected interferogram; (b) correction results of  
2D FFT frequency signal; (c) one-dimensional interferogram of (a); (d) corrected spectrum



与文献[11]中基于干涉图去基线的校正方法进行比较,校正前的光谱、基于干涉图去基线校正后的光谱、基于本文方法校正后的光谱分别与原始光谱的标准偏差为 0.825、0.275 和 0.069。实验结果表明,基于频域分析的干涉图校正方法对光谱有较好的修正,有效地改善了光谱信号。

表 1 单色光测量结果

Table 1 Experimental results of monochromatic light

Wavelength /nm	$(-f_{x\sigma_i}, -f_{y\sigma_i})$	$(f_{x\sigma_i}, f_{y\sigma_i})$
1571	(-21, -2)	(21, 2)
1574	(-53, -2)	(53, 2)
1577	(-86, -3)	(86, 3)
1580	(-119, -3)	(119, 3)

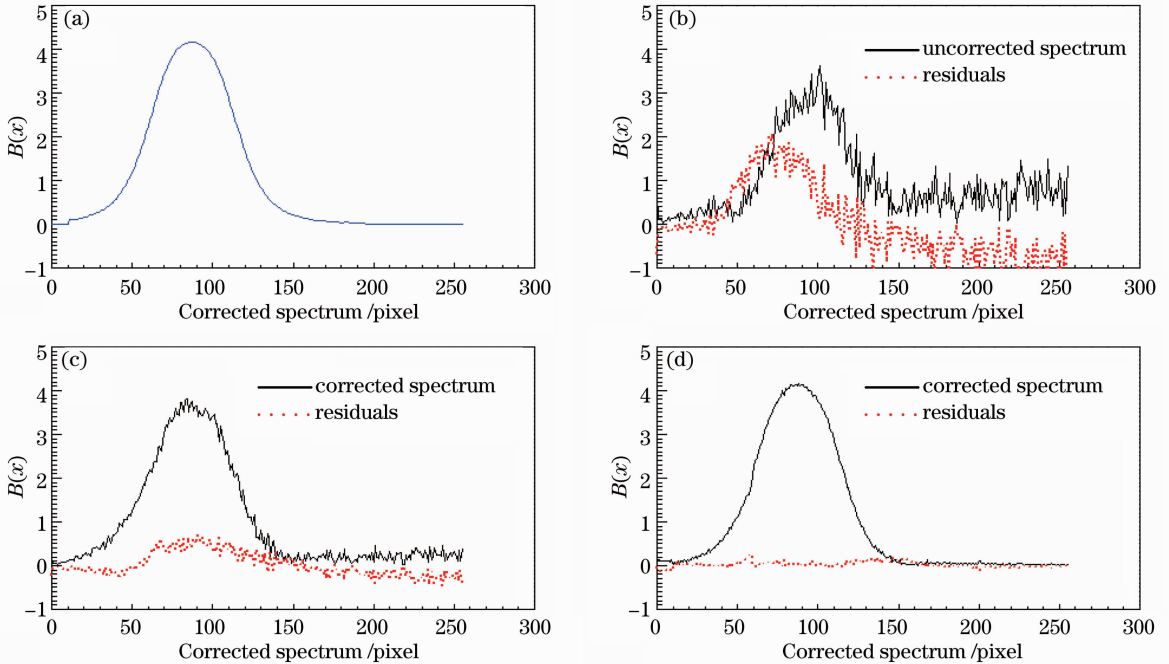


图 8 校正前后光谱残差。(a)原始光谱;(b)校正前光谱;(c)基于干涉图去基线校正的光谱;(d)基于本文方法校正的光谱

Fig. 8 Spectral residuals before and after correction. (a) Initial spectrum; (b) uncorrected spectrum; (c) corrected spectrum based on the methods of interferogram baseline filtering; (d) corrected spectrum based on the methods in this paper

## 4 结 论

空间外差光谱仪具有超分辨光谱探测的能力,有效的干涉图校正方法能提高空间外差光谱仪的光谱反演的精度,本文就此提出了一种基于频域分析的干涉图校正方法,并给出了相关的实验结果。实验结果证明,该方法能有效地校正二维干涉图信号,提高干涉图反演光谱的精度。通过进一步的改进完善,该方法可以应用于干涉图信号校正,为空间外差光谱仪的干涉图数据处理工作提供帮助。

### 参 考 文 献

- 1 J. Harlander. Spatial Heterodyne Spectroscopy: Interferometric Performance at Any Wavelength without Scanning [D]. USA: University of Wisconsin-Madison, 1991
- 2 F. L. Roesler, J. Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [C]. *SPIE*, 1990, **1318**: 234~243
- 3 F. L. Roesler, J. Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric remote sensing [C]. *SPIE*, 1999, **3756**:

337~345

- 4 S. Watchorn, F. L. Roesler, J. Harlander *et al.*. Development of the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium [C]. *SPIE*, 2001, **4498**: 284~295
- 5 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
- 6 C. R. Englert, M. H. Stevens, D. E. Siskind *et al.*. Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(D20): D20306
- 7 Yunlong Lin, G. Shepherd, B. Solheim *et al.*. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development [C]. ITSC-X IV Proceedings Beijing (Poster), 2005
- 8 E. J. Mierkiewicz, F. L. Roesler, J. Harlander *et al.*. First light performance of a near-UV spatial heterodyne spectrometer for interstellar emission line studies [C]. *SPIE*, 2004, **5492**: 751~766
- 9 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
- 10 Zou Mingmin, Fang Yonghua, Xiong Wei *et al.*. Line-by-line

- retrieval calculation of water vapor based on spatial heterodyne spectroscopy observation[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逐线积分水汽浓度反演方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1701~1705
- 11 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
- 12 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 熊 伟, 施海亮, 汪元钧等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 13 Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua *et al.*. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO<sub>2</sub> detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0101001
- 吴 军, 王先华, 方勇华等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0101001
- 14 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
- 15 Zhang Minjuan, Zhang Jilong, Wang Zhibin *et al.*. Correcting method of asymmetric single-side interferogram and analysis of key problems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 043002
- 张敏娟, 张记龙, 王志斌等. 单边干涉图相位校正技术与关键问题[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 043002
- 16 Zhang Peng, Zhang Zhihui. Rapidly changing phase error correction of Fourier transform spectrometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s115002
- 张 鹏, 张志辉. 傅里叶变换光谱仪非渐变相位误差的校正方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s115002

栏目编辑: 何卓铭