

# 空间外差光谱仪滤光片光场非均匀性研究

施海亮<sup>1,2</sup> 李志伟<sup>1,2</sup> 罗海燕<sup>1,2</sup> 方雪静<sup>1,2,3</sup> 胡广晓<sup>1,2,3</sup> 沈 静<sup>1,2,3</sup> 徐 标<sup>1,2,3</sup> 熊 伟<sup>1,2</sup>

<sup>1</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>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

<sup>3</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230022

**摘要** 空间外差光谱仪采用窄带滤光片限制仪器光谱范围,避免光谱混叠。滤光片透过率曲线随入射角度的变化导致准直系统出射光场呈现随波长变化的非均匀现象。对光场非均匀性机理进行理论推导,证实滤光片调制作用造成复原光谱中卷积了与波长相关的调制函数,导致单色光光谱半峰全宽随波长变化。根据理论公式并结合实验室空间外差光谱仪参数进行了仿真分析,表明光场存在短波下凹和长波上凸的滤光片调制效应。开展了实验室单色光扫描实验,实验测量结果与理论分析和仿真结果一致。提出了一种包络线拟合校正方法,仪器线型函数半峰全宽变化量由校正前的16.7%下降为0.2%,有效去除了滤光片调制函数对仪器线型函数的影响。

**关键词** 光学器件; 光场非均匀性校正; 包络线拟合; 仪器线型函数; 空间外差光谱仪

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1123001

## Non-Uniformity of Optical Field After Filter in Spatial Heterodyne Spectrometer

Shi Hailiang<sup>1,2</sup> Li Zhiwei<sup>1,2</sup> Luo Haiyan<sup>1,2</sup> Fang Xuejing<sup>1,2,3</sup>

Hu Guangxiao<sup>1,2,3</sup> Shen Jing<sup>1,2,3</sup> Xu Biao<sup>1,2,3</sup> Xiong Wei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>3</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230022, China

**Abstract** The narrow band filter is used in spatial heterodyne spectrometers to limit the spectral range of the instrument and to avoid spectral overlapping. Due to the change of the filter transmittance with incidence angles, the emergent optical field from the collimating system is non-uniform at different wavelengths. The optical field non-uniformity mechanism is deducted theoretically, proving that modulation of filter causes convolution with a wavelength-related modulation function in restoration spectra and results in variation in full width at half maximum (FWHM) of monochromatic spectrum with wavelength. A simulation is carried out based on the theoretical formulas and the spatial heterodyne spectrometer parameters in laboratory, indicating that there exists influence of filter modulation that appears in concavity at shorter wavelength and convexity at longer wavelength. Monochromatic scanning experiments are performed in laboratory, and the measurement results are consistent with those of theoretical analysis and simulation. An enveloping line fitting correction method is proposed. The variation in FWHM of the instrument line function decreases from 16.7% to 0.2% after correction, suggesting that the influence of modulation function of filter on restored spectra is eliminated effectively.

**Key words** optical devices; correction of optical field non-uniformity; enveloping line fitting; instrument line shape; spatial heterodyne spectrometer

**OCIS codes** 230.0040; 070.4790

收稿日期: 2016-05-23; 收到修改稿日期: 2016-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)、中国科学院创新基金(CXJJ-14-S91)、XX-5 卫星数据模拟技术项目(50-Y20A38-0509-15/16)

作者简介: 施海亮(1983—),男,博士,副研究员,主要从事超光谱遥感探测技术等方面的研究。E-mail: hlshi@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

空间外差光谱技术是一种新型静态超分辨率空间干涉分光技术,具有诸多技术优点<sup>[1]</sup>,目前美国、加拿大等多个国家正积极开展基于该技术的天文观测、大气遥感以及行星物质识别等领域的研究<sup>[2]</sup>。国际上已有多个机载以及星载仪器成功运行并取得了理想探测效果,同时更多基于该技术的星载仪器正在积极研制中<sup>[3]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所于2005年开始开展该技术的研究工作,已成功研制多台可见光与近红外波段的超光谱大气温室气体探测样机<sup>[4]</sup>。

空间外差光谱仪(SHS)基本原理是将传统傅里叶变换光谱仪(FTS)中的平面镜替换为衍射光栅,仪器由准直系统、干涉仪、成像系统三部分组成,理想情况下视场内任一光束经准直系统后将均匀照亮干涉仪中的光栅面。因此,单色光入射仪器后输出的干涉图应该是由面阵探测器采样获得的截断余弦函数,即矩形窗切趾。干涉图经过傅里叶变换后的复原光谱为 sinc 函数形式<sup>[5]</sup>。空间外差光谱仪为了避免光谱混叠,用滤光片截取系统基频光某一侧的光谱,而将另一侧的光谱滤掉。同时滤光片也起到了限制空间外差光谱仪光谱范围的作用,以满足采样定理的要求<sup>[6]</sup>。但窄带滤光片的透过率曲线随入射光入射角度变化而变化<sup>[7-8]</sup>,导致经准直系统后的光场非理想均匀分布,从而造成单色光入射仪器后的输出干涉图偏离理想余弦函数形式。

针对空间外差光谱仪中窄带滤光片的特性,本文分析了造成光场分布不均匀的原因并进行了理论推导,研究了非均匀光场对单色光干涉图及仪器线型函数的影响,开展了光场非均匀性的仿真与验证。提出了针对光场非均匀性的包络线拟合校正方法,测量全光谱范围内各波段光场非均匀性分布,并以单色光光谱复原后仪器线型函数的半峰全宽变化量为标准,对光场分布非均匀性校正结果进行评价。

## 2 滤光片光场非均匀性理论

空间外差光谱仪的光学系统结构原理如图1所示<sup>[9]</sup>,衍射光栅代替迈克耳孙干涉仪中的两个平面反射镜,经分束器出射的强度相等的两束相干光分别经两光栅衍射返回后发生干涉。相干光形成的干涉条纹由光学系统 L2、L3 成像于探测器上。

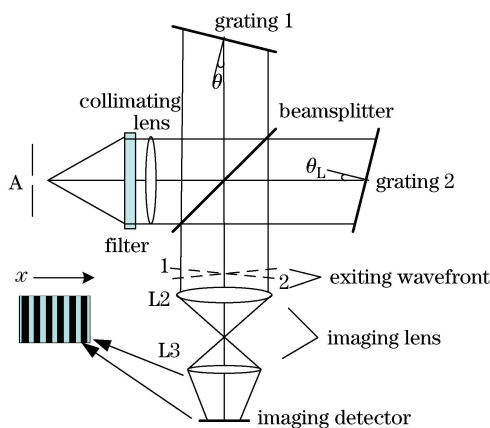


图1 空间外差光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic of basic SHS configuration

空间外差光谱仪可通过扩大视场来增加光通量,这也意味着进入仪器的光束具有一定立体角。系统中滤光片选择放在仪器光路的最前端,对进入准直系统的光谱进行选择性过滤,这可以有效避免反射光在仪器内多次折返产生的杂散光。对窄带滤光片而言,在小角度入射的情况下,可以认为滤光片的透过率曲线不会发生变化,透过率曲线中心波长变化与入射角度之间的关系为

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma'_c = \sigma_c(1 - \sqrt{1 - \sin^2\theta/n^2}), \quad (1)$$

式中  $\Delta\sigma$  为透过率曲线中心波长平移量,  $\sigma_c$  为光线正入射时滤光片透过率曲线中心波长,  $\sigma'_c$  为光线入射角为  $\theta$  时滤光片的透过率曲线中心波长,  $n$  为滤光片的等效折射率。随着入射角度的增大,中心波长向短波方向移动。同一波长,入射角度不同时透过率不同;入射角度相同,不同波长的透过率也不同。

系统准直光路示意图如图 2 所示,假设波长为  $\sigma$  的单色均匀光  $I_0(\sigma)$  入射到滤光片,则经过滤光片后入射光强度在孔径内的分布不再均匀,即  $I_1 \neq I_2$ ,  $\tau_0(\sigma)$  为正入射时滤光片的透过率。

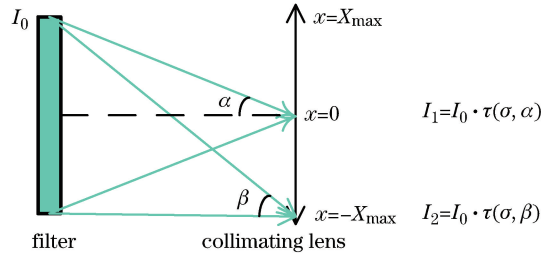


图 2 滤光片光场分布示意图

Fig. 2 Diagram of optical field distribution of basic SHS filter

仪器孔径内不同位置处的光强  $I'(x, \sigma)$  可以表示为

$$I'(x, \sigma) = \int I_0(\sigma) \tau(\theta, \sigma) d\theta = I_0(\sigma) \int \tau(\theta, \sigma) d\theta, \quad (2)$$

式中  $\tau(\theta, \sigma)$  为随入射光波长和角度而变化的透过率,  $x$  为距光轴的垂直距离,  $\theta$  为入射光线与光轴的夹角。

令光场调制函数  $M(x, \sigma) = \int \tau(\theta, \sigma) d\theta$ , 其中  $\theta$  变化范围与位置  $x$  及仪器具体设计参数有关。由以上分析可知,经滤光片后,在  $M(x, \sigma)$  的作用下,进入后续干涉仪的光场为强度非均匀分布的光场。

在理想单色光  $B_0(\sigma)$  入射的情况下,输出干涉数据  $I_m(x, \sigma)$  表达式为

$$I_m(x, \sigma) = M(x, \sigma) \cdot T(x) \cdot B_0(\sigma) \cdot \cos\{2\pi[4x(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L]\}, \quad (3)$$

式中  $m$  为采样点序号,  $\sigma_0$  为系统基频,  $\theta_L$  为系统 Littrow 角,  $T(x)$  为系统有限干涉数据采样长度限制的矩形截止函数,

$$T(x) = \begin{cases} 1 & -L_{\max} \leq x \leq L_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $L_{\max}$  为最大光程差。对(3)式两侧进行傅里叶变换,得到经光场非均匀性调制后的复原光谱为

$$B'(\sigma) = \mathcal{F}[I_m(x, \sigma)] = \mathcal{F}[I(x, \sigma)] * \mathcal{F}[T(x)] * \mathcal{F}[M(x, \sigma)] = B_0(\sigma) * \mathcal{F}[T(x)] * \mathcal{F}[M(x, \sigma)], \quad (5)$$

式中  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换,  $*$  表示卷积运算。

仪器线型函数(ILS)表征单色光入射仪器后复原光谱的能量分布形式, ILS 的半峰全宽(FWHM)体现仪器对光谱的展宽作用,其大小表征仪器的光谱分辨率。理想的单色光干涉数据在矩形窗自然切趾下复原光谱 ILS 为 sinc 函数。理论上空间外差光谱仪光谱范围内不同单色光复原光谱 ILS 应该是一致的。由(5)式可知,由于光场非均匀性调制作用,复原光谱相当于 sinc 函数与光场调制函数傅里叶变换的卷积,且光场调制函数  $M(x, \sigma)$  与波长相关,相当于在理论干涉数据基础上再次被切趾,最终导致不同波长单色光的复原光谱 ILS 的能量分布形式及展宽都发生变化。

### 3 滤光片光场非均匀性仿真

根据滤光片光场非均匀性产生的原因及理论分析,针对自行研制的空间外差光谱仪样机的光场非均匀性进行理论仿真,其中仪器及滤光片的基本参数如表 1 所示。

根据(1)式和(2)式,仿真得到不同波长的归一化光场调制函数,如图 3 所示。结果表明,空间外差光谱仪光场调制函数具有波长相关性,以 1574.8 nm 为中心,在短波时如图 3(a)所示,光场调制函数呈现下凹的趋势,而在长波时如图 3(b)所示,呈现上凸的趋势,光场非均匀性在远离中心波长处表现得更加明显。

以短波 1571 nm 和长波 1577 nm 单色光为例,通过仿真比较理论干涉数据和经光场调制函数作用后的干涉数据,分别对干涉数据进行光谱复原,结果如图 4 所示。其中图 4(a)、(b)中光场非均匀性经调制后的干涉图是根据(5)式结合图 3 中的对应调制函数曲线得出的,对理论干涉图和调制后的干涉图分别作傅里叶变换,得到理论光谱和调制后的光谱,如图 4(c)、(d)所示。

表 1 空间外差光谱仪主要参数  
Table 1 Main parameters of SHS

Parameter	Value	
Grating density $g$ / (line/mm)	250	
Grating Littrow angle $\theta_L$ / ( $^\circ$ )	13.303	
Effective length of grating $W$ / cm	3.136	
Pixel number per line	640	
Spectral range / nm	1568-1586	
Field of view / ( $^\circ$ )	6	
Filter	Transmittance range / nm	1566-1586
	Central wavelength / nm	1577.5
	Equivalent transmittance	1.75

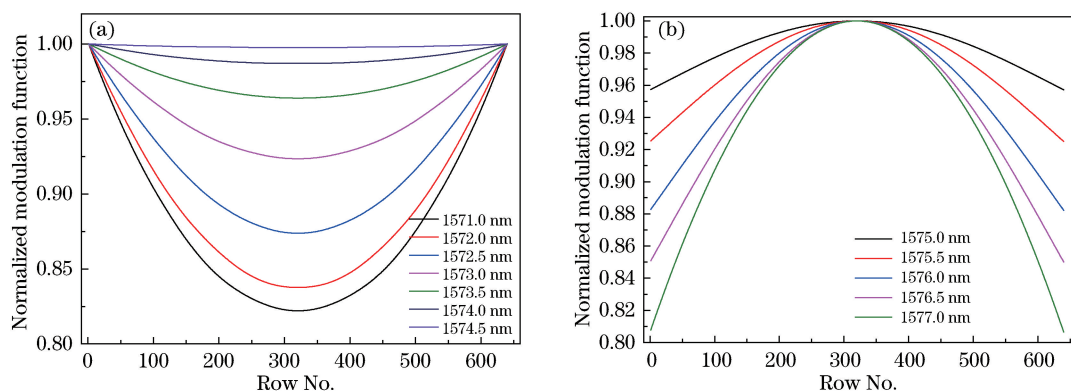


图 3 (a)短波时光场调制函数;(b)长波时光场调制函数

Fig. 3 (a) Normalized modulation function at short wavelengths; (b) normalized modulation function at long wavelengths

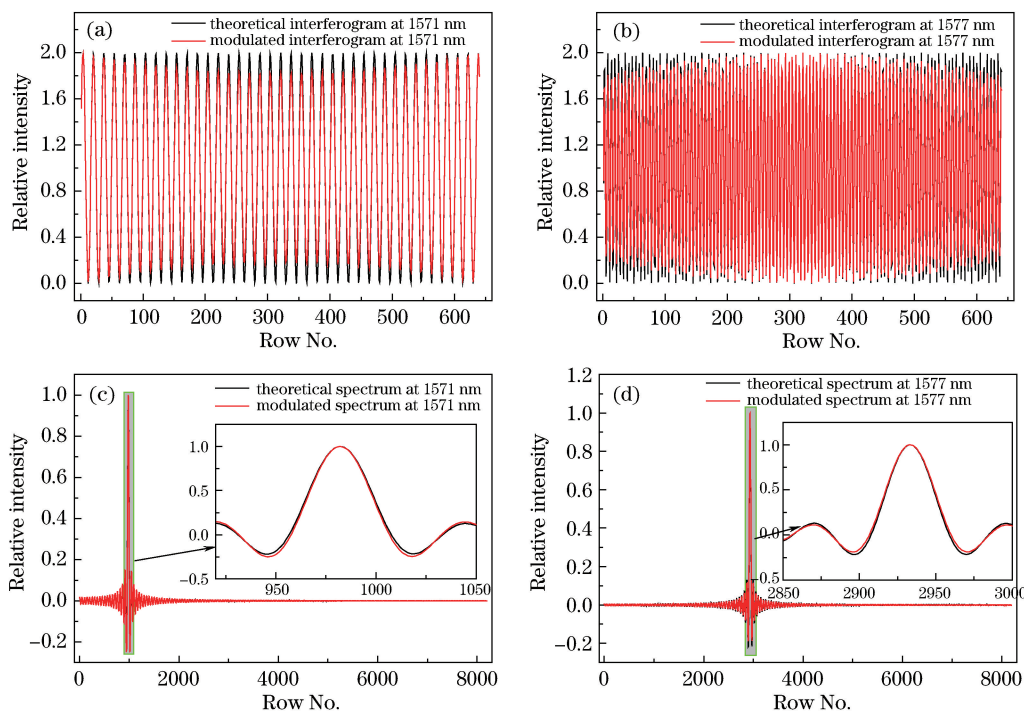


图 4 理论与调制光场非均匀性干涉图和光谱图

Fig. 4 Comparison of theoretical and modulated interferograms and spectra of non-uniform optical field

根据(5)式可知,经过光场调制函数作用的干涉数据复原光谱不再是标准的 sinc 函数形式,其半峰全宽和旁瓣振荡形式都发生了变化,其中短波长(1571 nm)时光谱的半峰全宽变小,而长波长(1577 nm)时光谱

半峰全宽变大,可认为光场调制函数导致仪器在光谱范围内光谱分辨率不再是设计的某一数值,而是表现出波长相关性。随着波长的增大,光谱半峰全宽从高于理论值逐渐变为低于理论值。对于空间外差光谱仪较窄的带宽而言,光谱分辨率的变化会增加后续数据应用的难度。

## 4 光场非均匀性校正及结果分析

### 4.1 光场非均匀性校正原理

由(2)式可知,根据调制函数  $M(x, \sigma)$  可以在干涉域对光场非均匀性进行校正,校正后的干涉数据  $I_c(x, \sigma)$  可以表示为

$$I_c(x, \sigma) = I_m(x, \sigma) / M(x, \sigma). \quad (6)$$

根据前文分析可知,调制函数  $M(x, \sigma)$  是缓慢变化的,可以通过包络线拟合的方法求出。求出每个波长下的调制函数,根据(6)式对光场非均匀性的影响进行校正。采用对极值点进行曲线拟合的方法求调制函数,如图5所示,黑色线为原始干涉数据测量结果,蓝色点为确定的极大值点,对极大值点进行拟合后的红色曲线为调制函数。

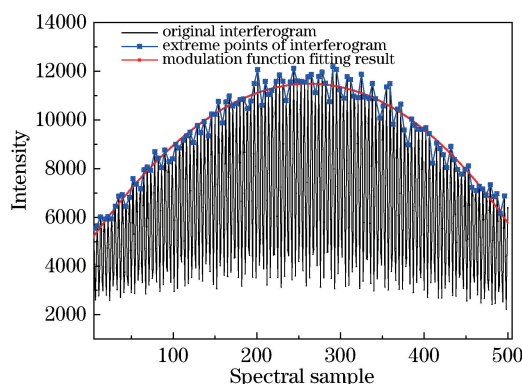


图5 原始单色光干涉数据及其调制函数拟合结果

Fig. 5 Original monochromatic interferogram and modulation function fitting result

### 4.2 光场非均匀性校正实验及结果分析

针对自行研制的空间外差光谱仪样机开展光场校正实验。由于调制函数随波长发生变化,为了能够准确地求出每个波长下的调制函数,在空间外差光谱仪光谱范围内以  $0.5 \text{ nm}$  为步长共扫描 30 组单色光数据。将可调谐激光器发出的单色光经积分球匀光后形成均匀朗伯单色面光源,进行单色光干涉图数据采集<sup>[10]</sup>。图6所示为三个不同波长的单色光干涉图和对应的空间外差光谱仪单色光实测数据。理论上干涉数据包络线应该是近似直线,但滤光片的调制函数作用使短波长时干涉图极大值的包络线呈现下凹的趋势,而在临近中心波长时干涉数据极大值的包络线基本一致,在长波时干涉数据极大值的包络线呈现上凸的趋势。实测干涉数据下包络并没有表现出与上包络相同的变化规律,这是由于单色光干涉数据的极小值点光强接近于零,调制函数对其作用并不明显。

利用提出的包络线法求解调制函数,分别对每一个波长下的每一行单色光干涉数据进行调制函数拟合。1571.65 nm 和 1582.43 nm 的原始干涉数据、拟合后的调制函数及光场非均匀性校正后的干涉数据如图7所示。

从图7可以看出,拟合的调制函数能够很好地代表滤光片引起的包络曲线,光场非均匀性校正后干涉数据极大值包络线基本为直线,有效去除了滤光片调制函数作用的影响。分别对光场非均匀性校正前后的每一个单色光干涉数据作复原光谱处理,并将中心极大值移到相同位置,对比图8(a)、(b)发现,光场非均匀性校正前不同波长的光谱展宽不同,即仪器线型函数在光谱范围内是逐渐变化的,表明仪器对不同波长的响应不一致。光场非均匀性校正后,所有单色光光谱基本重合,表明仪器对光谱范围的波长响应一致,仪器线型函数在光谱范围内也是相同的。

仪器线型函数的半峰全宽表征空间外差光谱仪的光谱分辨率,利用单色光扫描的方法可以求出仪器光

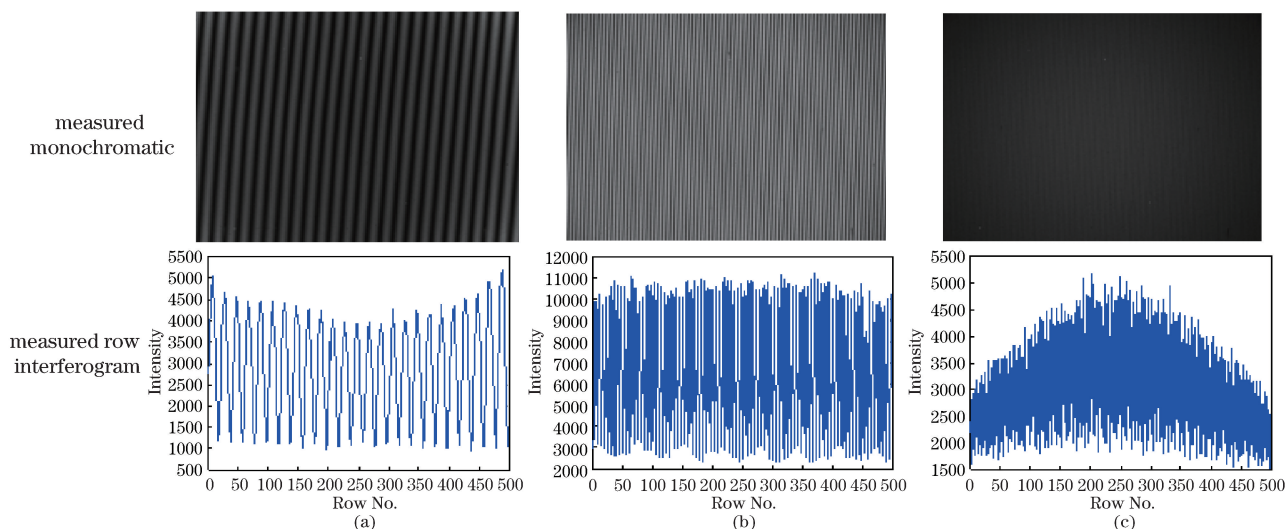


图 6 不同波长时的实测单色光干涉图和实测单行干涉图。(a) 1571.65 nm;(b) 1575.03 nm;(c) 1582.43 nm

Fig. 6 Measured monochromatic interferograms and measured row interferograms.

(a) 1571.65 nm; (b) 1575.03 nm; (c) 1582.43 nm

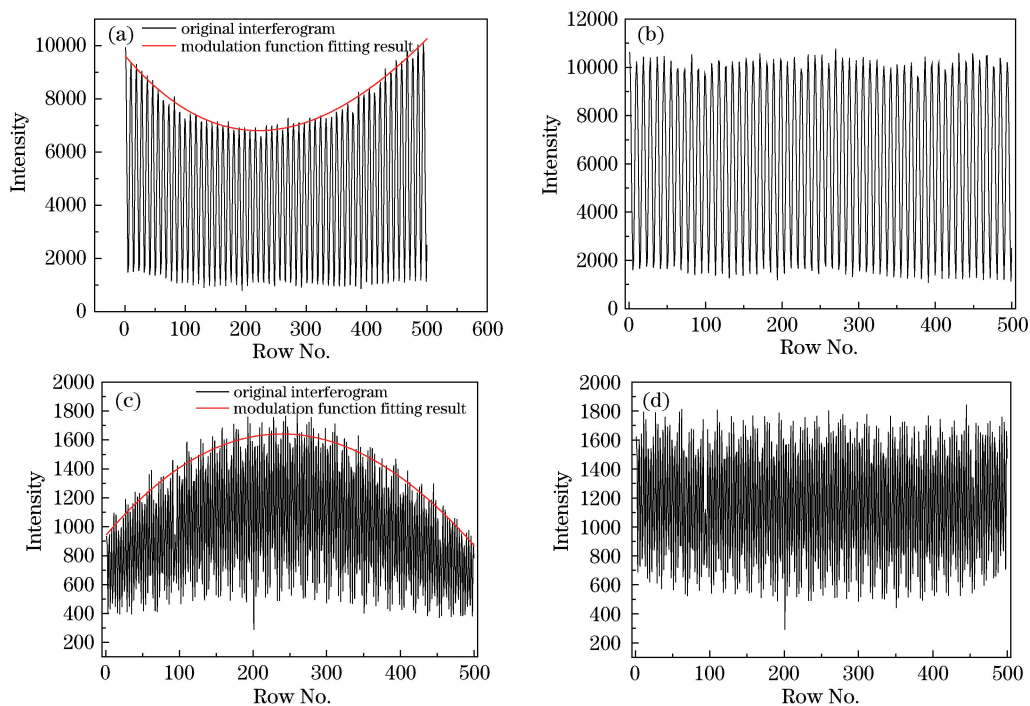


图 7 (a) 1571.65 nm 实测单行干涉图及包络线拟合结果;(b) 光场非均匀性校正后的 1571.65 nm 干涉图;

(c) 1582.43 nm 实测单行干涉图及包络线拟合结果;(d) 光场非均匀性校正后的 1582.43 nm 干涉图

Fig. 7 (a) Measured row interferogram at 1571.65 nm and enveloping line fitting result; (b) interferogram at 1571.65 nm

after correction of optical field non-uniformity; (c) measured row interferogram at 1582.43 nm and enveloping line fitting result;

(d) interferogram at 1582.43 nm after correction of optical field non-uniformity

谱范围内每一个波长的光谱分辨率。光场非均匀性校正前后每一个波长的仪器线型函数的半峰全宽如图 9 所示。可以看出,光场非均匀性校正前,仪器的半峰全宽随着波数的增加而减小,即光谱分辨率随着波数的增加而降低,这是因为滤光片的调制函数随着波长的增加由下凹趋势变为上凸趋势,由卷积原理可知,下凹的调制函数会削弱仪器线型函数的变窄情况,而上凸的调制函数会增强仪器线型函数的展宽。非均匀性校正后仪器线型函数半峰全宽在空间外差光谱仪光谱范围内基本一致。半峰全宽的相对变化量由原来的 16.7%降为 0.2%,表明滤光片调制函数的影响得以去除,空间外差光谱仪的光场非均匀性得到有效的校正。

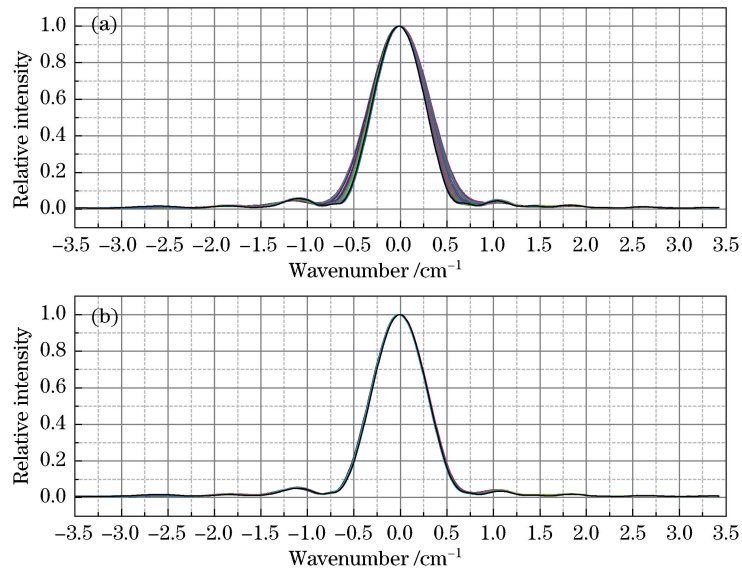


图 8 (a)光场非均匀性校正前和(b)光场非均匀性校正后不同单色光的仪器线型函数

Fig. 8 ILSs at different wavelengths (a) before and (b) after correction of optical field non-uniformity

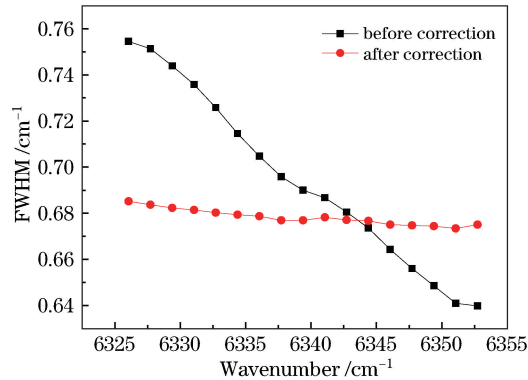


图 9 光场非均匀性校正前后单色光仪器线型函数半峰全宽比较

Fig. 9 Comparison between ILS FWHM before and after correction of optical field non-uniformity

## 5 结 论

空间外差光谱仪中窄带滤光片的透过率曲线随入射光角度增大呈现中心波长向短波方向漂移的现象,使到达光栅面的光强分布不均匀,获取的单色光干涉数据失真,从而对仪器线型函数造成较大影响。

首先通过理论分析和公式推导,阐述了光场非均匀性形成机理以及具体函数表达形式,仿真结果表明光场调制函数具有波长相关性,在短波时表现为下凹的趋势,在长波时则相反,且光场非均匀性在远离中心波长处表现得更为明显,导致仪器光谱分辨率发生变化。提出了基于包络线拟合法的场非均匀性校正算法,并针对自行研制的空间外差光谱仪样机开展了校正实验。结果表明仪器线型函数的半峰全宽变化量由校正前的 16.7% 下降为 0.2%,滤光片调制函数对仪器线型函数的影响被消除。

## 参 考 文 献

- Harris W, Roesler F, Ben-Jaffel L, *et al.* Applications of spatial heterodyne spectroscopy for remote sensing of diffuse UV-vis emission line sources in the solar system[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2005, 144(6): 973-977.
- Harlander J M, Roesler F, 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.
- Englert C R, Babcock D D, Harlander J M. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): Concept and

- experimental demonstration[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7297-7307.
- 4 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.
- 5 Shi Hailiang. Research on calibration of spatial heterodyne spectrometer[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.  
施海亮. 空间外差光谱仪定标技术研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2012.
- 6 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.
- 7 Lissberger P H. Effective refractive index as a criterion of performance of interference filters[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, 58(12): 1586-1590.
- 8 Hemingway D J, Lissberger P H. Effective refractive indices of metal-dielectric interference filters[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(3): 471-476.
- 9 Roesler F L, Harlander J M. Spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric remote sensing[C]. *SPIE*, 1999, 3756: 337-345.
- 10 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.* Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with hyper-spectral 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.