

紫外成像光谱仪干涉图零级漂移现象分析

吕 航¹ 廖宁放¹ 吴文敏¹ 曹玮亮¹ 王佳佳¹ 程灏波²

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

²北京理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 零级漂移存在于时空联合调制型紫外傅里叶变换成像光谱仪干涉图中。对干涉结构中分束体光路的计算表明,分束体中的光学胶和棱镜在紫外波长范围内的折射率变化会导致零级漂移。但是棱镜装配错位会使零级漂移更为严重,导致有效干涉信息丢失及反演光谱曲线失真。数值仿真结果表明,提高分束体装配精度,可避免有效干涉信息的丢失。实际测量结果表明,含固有零级漂移的时空联合调制型干涉成像光谱仪的反演光谱曲线与高分辨率光谱仪测量数据一致。当分束体装配精度较高时,零级漂移不会影响成像光谱仪测量的准确性。

关键词 成像系统; 零级漂移; 光谱反演; 分束体; 紫外

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0911003

Zero-Order Drift of Interferograms in Ultraviolet Imaging Spectrometer

Lü Hang¹ Liao Ningfang¹ Wu Wenmin¹ Cao Weiliang¹ Wang Jiajia¹ Cheng Haobo²

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of the Ministry of Education,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²Shenzhen Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract Zero-order drift is inherently present in the interferogram of a spatially-temporally modulated ultraviolet Fourier-transform imaging spectrometer. The calculation of optical path of beam splitter in interferometric structure indicates that the zero-order drift is caused by refractive index variation in the ultraviolet wavelength range of optical adhesive and prism in the beam splitter. However, assembly misalignment of the prism may cause more serious zero-order drift, resulting in loss of the effective interference information and distortion of the spectral curve. The numerical simulation results verify that it is necessary to improve the assembly precision of the beam splitter to avoid loss of effective interference information. The measurement results show that the spectral inversion curve of the spatially-temporally modulated interferometric imaging spectrometer which contains inherent zero-order drift is consistent with the measurement result of a high-resolution spectrometer. When the beam splitter has high assembly precision, the zero-order drift does not affect the measurement accuracy of the imaging spectrometer.

Key words imaging systems; zero-order drift; spectral inversion; beam splitter; ultraviolet

OCIS codes 110.4234; 300.6540; 300.6300

1 引 言

时空联合调制型成像光谱仪具有静态的干涉结构,对扫描控制单元精度的要求低于时间调制型成像光谱仪对动镜控制单元精度的要求,并且可以取消限制衍射光栅型成像光谱仪光通量的光学狭缝,是小型化、低成本傅里叶变换成像光谱仪的首选干涉结构^[1-2]。典型的时空联合调制型成像光谱仪分为以萨奈克结构为基础的光谱仪,如马赫-曾德尔成像光谱仪,和以迈克耳孙结构为基础的像平面式干涉成像光谱仪^[3-4]。

收稿日期: 2016-01-22; **收到修改稿日期:** 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61575020)、国家科技支撑计划(2012BAK02B04)、公安部重点研究计划(2010ZDYJBJLG006)、广东省科技计划(2015A020214004)

作者简介: 吕 航(1984—),男,博士研究生,主要从事高光谱成像技术等方面的研究。E-mail: luh@bit.edu.cn

导师简介: 廖宁放(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事成像光谱技术、颜色与图像技术等方面的研究。

E-mail: liaonf@bit.edu.cn(通信联系人)

根据柯西色散公式,常见透射式光学材料在紫外波段的折射率变化比在可见光及红外波段更剧烈,由此产生的色散现象对成像质量的影响也更严重,因此紫外光谱仪与紫外成像仪器通常采用反射式光路来消除色散的影响^[5-6]。刘洋等^[7]在2014年制作了一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪,采用同心三反射Offner光学系统作为成像镜。廖宁放等^[8]采用同轴Cassegrain结构替换石英镜头作为前置物镜,实现了全反射成像光路。该成像光谱仪采用像平面式干涉结构,其分束体为紫外熔融石英材料的分光棱镜。分束体装配误差及使用的光学胶在紫外波段的折射率变化,使干涉光束在成像器上的相位零级位置随波长变化而发生零级漂移,即干涉条纹的零级展宽现象。

本文对紫外干涉条纹零级漂移现象及光谱反演结果进行分析。通过仿真实验验证零级漂移量对反演光谱数据质量的影响。通过研究紫外成像光谱仪的实际测量数据,证明了零级漂移现象不会影响成像光谱仪的光谱分辨率,并验证了分束体装配精度较高时,像平面式干涉结构固有的零级漂移现象不会降低反演光谱的数据质量。

2 干涉条纹零级漂移产生原因

在分束体装配过程中,为了避免两直角棱镜斜面不平行而导致干涉图像失真,通常使用自准直仪来保证胶合棱镜入射与出射平面的平行度^[9]。但在光学胶的使用和粘接装配中,两直角棱镜在斜边方向上的错位难以消除。

2.1 光学胶对干涉条纹零级漂移的影响

由实验室制作的紫外傅里叶变换成像光谱仪仅有分束体为透射式光学结构。分束体由两枚直角棱镜胶合制成,其中一枚的斜面镀有分束比为1:1的分束膜^[8]。分束膜附近的光路如图1所示。经分束膜分光后的两束光分别以1次及3次穿过棱镜胶合剂,因此两路干涉光束在光学胶中的光程不一致。若光束在棱镜分束膜与光学胶分界面的折射角为 $\theta_r(\lambda)$,光学胶厚度为 d ,光束在光学胶中的折射率为 $n_{\text{cement}}(\lambda)$,则光学胶附加光程差为

$$\Delta_{\text{cement}}(\lambda) = 2n_{\text{cement}}(\lambda) \frac{d}{\cos \theta_r(\lambda)}. \quad (1)$$

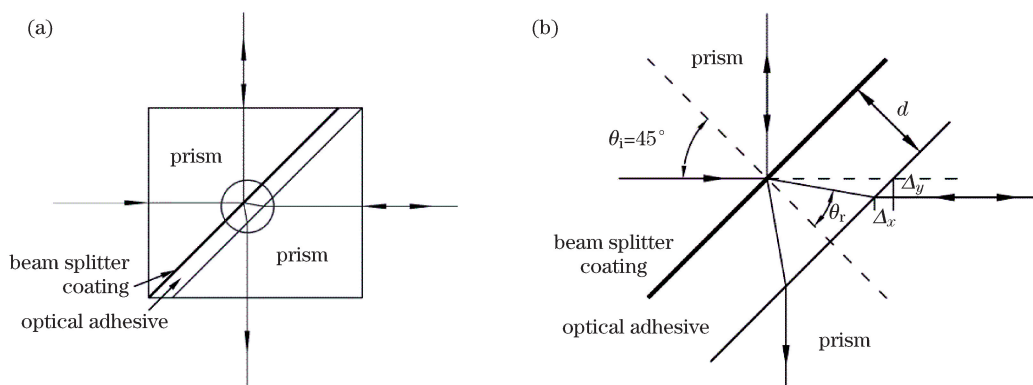


图1 分束体光学胶光路示意图

Fig. 1 Optical path scheme of optical adhesive in beam splitter

入射光束以 $\theta_i = 45^\circ$ 角入射到棱镜分束膜与光学胶分界面,由于折射导致光路折转,使干涉光束在棱镜中的传播路径发生改变,如图1所示,两路干涉光束在棱镜中的光程亦发生变化。若光束在棱镜中的折射率为 $n_{\text{prism}}(\lambda)$,由几何关系可得图1中 $\Delta_x(\lambda) = \Delta_y(\lambda)$,故棱镜中附加光程差为

$$\Delta'_{\text{prism}}(\lambda) = 2\Delta_x(\lambda) = 2n_{\text{prism}}(\lambda) \frac{d}{\cos \theta_r(\lambda)} \sin[45^\circ - \theta_r(\lambda)]. \quad (2)$$

根据柯西色散公式,将紫外固化胶NOA63与棱镜参数代入后可分别计算光学胶和棱镜的折射率分布曲线,如图2所示。由(1)、(2)式可知干涉光束在分束体中的附加光程差将随波长变化而改变,即

$$\Delta_\delta(\lambda) = \Delta_{\text{cement}}(\lambda) + \Delta'_{\text{prism}}(\lambda), \quad (3)$$

从而导致成像面不同波长的干涉零级位置变化,产生干涉条纹零级漂移现象。

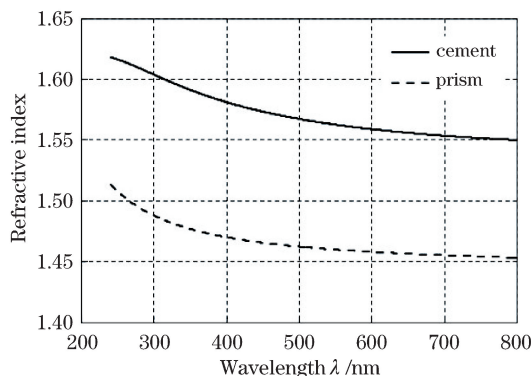


图 2 光学胶与棱镜折射率

Fig. 2 Refractive index of optical adhesive and prism

2.2 棱镜装配错位对干涉条纹零级漂移的影响

在分束体棱镜粘接装配过程中,若两直角棱镜在斜边方向上发生错位,也将导致两路干涉光束在棱镜中的光程差异,造成零级漂移现象。如图 3 所示,若棱镜装配时斜边方向平移量为 Δl ,由几何关系可知棱镜中附加光程差为

$$\Delta_{\text{prism}}(\lambda) = 2n_{\text{prism}}(\lambda)\Delta l \sin 45^\circ. \quad (4)$$

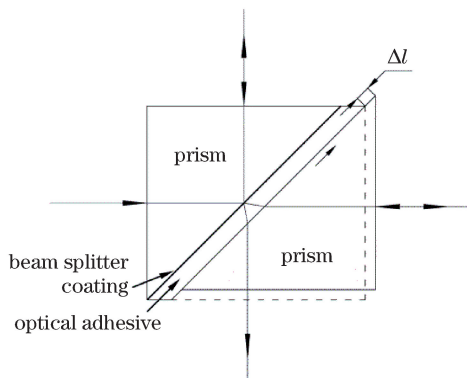


图 3 分束体直角棱镜装配错位光路示意图

Fig. 3 Optical path scheme of beam splitter with right angle prism assembly error

2.3 干涉条纹零级漂移量计算

像平面式干涉成像光谱仪采用楔角干涉结构,使干涉光程差产生于迈克耳孙干涉结构的两反射镜上,因此光学胶和分束体棱镜中固定的附加光程差不会改变仪器成像面上干涉图相位差的线性分布^[4,7]。通过光谱定标步骤,可计算得到成像光谱仪成像面 CCD 探测单元每个像素在空间中对应的光程差 Δ_{px} 。取得两组不同中心波长光束的干涉图零级位置变化量 Δx_{px} 后,即可计算两组干涉光束的附加光程差的变化量为

$$\Delta\Delta_\delta = |\Delta_\delta(\lambda_1) - \Delta_\delta(\lambda_2)| = \Delta_{\text{px}} \times \Delta x_{\text{px}}. \quad (5)$$

根据(3)、(4)式,干涉光束的附加光程差与光学胶厚度 d 或棱镜斜边平移量 Δl 均成正比。根据光学胶和棱镜错位导致的干涉光束的附加光程差系数分布,可计算得到图 4 所示结果。当光学胶厚度 d 与棱镜斜边平移量 Δl 均为 $10 \mu\text{m}$,所用成像光谱仪的工作波段为 $240 \sim 370 \text{ nm}$ 时,由光学胶和棱镜错位导致的干涉光束的附加光程差变化量为 $0.894 \mu\text{m}$ 和 $0.559 \mu\text{m}$,光学胶导致的附加光程差更大。但是,在分束体实际装配过程中,光学胶通常为定量使用,其厚度小于 $10 \mu\text{m}$ 。而直角棱镜的装配误差则受光学夹具的精度及粘接固化过程中的形变等因素限制,装配精度不易保证,因此产生较大零级漂移的主要原因是分束体棱镜错位。需要提高棱镜粘接装配精度,避免棱镜斜边平移量过大导致零级漂移影响光谱数据质量。

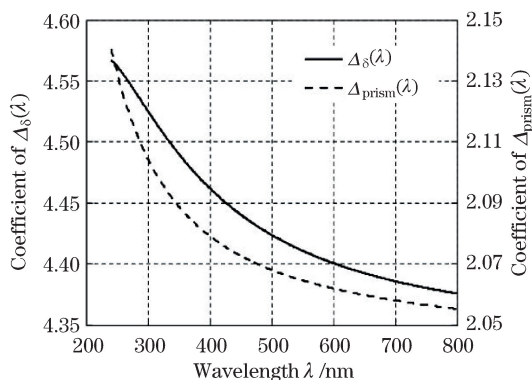


图 4 附加光程差系数

Fig. 4 Coefficients of added optical path difference

3 仿真实验与分析

首先采用不同频率余弦函数曲线叠加方法生成原始仿真宽带干涉曲线,这些余弦函数具有相同的零级位置^[10]。逐渐增大零级位置,可生成包含最大 φ_{\max} 个采样点的零级漂移仿真干涉曲线。再经光谱反演,将原始仿真干涉曲线反演得到的仿真光谱曲线作为参考数据,用于评价包含零级漂移的仿真干涉曲线反演得到的光谱曲线的数据质量。

由于探测器为离散采样,用于仿真的干涉曲线由离散函数表示为

$$I(x) = A(x) \sum_{x=0}^N \sum_{\nu=a}^b \cos \left[2\pi \frac{\nu}{N} x + \varphi(x) \right], \quad (6)$$

式中 $A(x)$ 为仿真光谱曲线的幅值, $N=200$ 为采样点总数; $\nu \in [a, b]$ 为波数单位,表示仿真光谱曲线的有效光谱范围; $\varphi(x)$ 随 x 线性增大,表示干涉曲线的相位漂移量,即零级位置的变化量。由此生成的仿真干涉曲线如图 5 所示。三条曲线均有相同的幅值 $A(x)$ 、采样点数 N 和光谱范围 ν , 但相位漂移量 $\varphi(x)$ 不同。

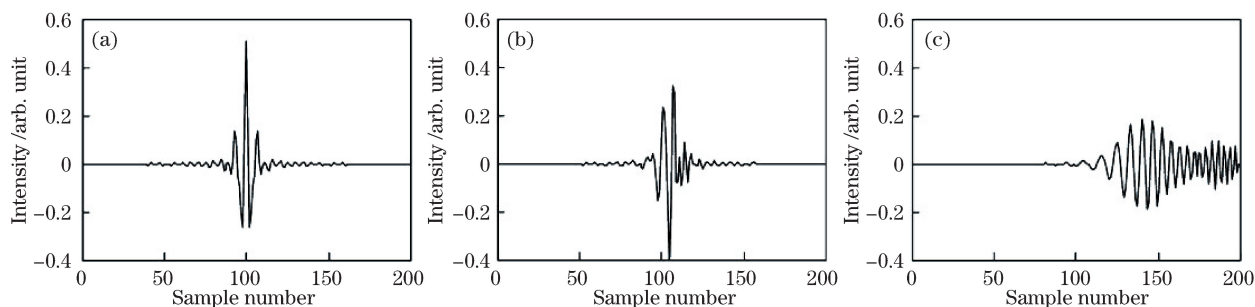


图 5 仿真干涉曲线与加入零级漂移的仿真干涉曲线。(a) 不含零级漂移; (b) 含最大 5 个采样点的零级漂移; (c) 含最大 50 个采样点的零级漂移

Fig. 5 Simulated interference curves without and with zero-order drift. (a) Interference curve without zero-order drift; (b) interference curve with maximum 5-point zero-order drift; (c) interference curve with maximum 50-point zero-order drift

通过傅里叶变换对图 5 中的三组仿真干涉曲线进行光谱反演,得到图 6 所示三组仿真光谱曲线。计算可知 $\varphi(x)=0$ 和 $\varphi_{\max}=5$ 两组曲线相关系数优于 0.999, 且两组曲线在所有采样点的幅值差异均小于 0.01%。因此含最大 5 个采样点零级漂移的仿真干涉曲线不会造成反演所得仿真光谱曲线采样点位置及光谱响应幅值差异。但是对于 $\varphi_{\max}=50$ 的仿真干涉曲线,由于部分仿真干涉曲线漂移到采样窗口之外[图 5(c)],其中包含的空间频率信息丢失,导致仿真光谱曲线失真(图 6)。

为了评价零级漂移量对光谱反演结果的影响,分别计算 $\varphi_{\max}=1, 2, 3, \dots, 60$ 时仿真光谱曲线与 $\varphi(x)=0$ 时仿真光谱曲线的相关系数分布,结果如图 7 所示。当零级漂移量小于 40, 即小于干涉图单边干涉维的 40% 时,相关系数大于 0.999, 光谱反演结果不受零级漂移的影响。因此,在成像光谱仪测试中,应根据干涉图质量选择零级漂移量较小的分束体以提高光谱数据质量。

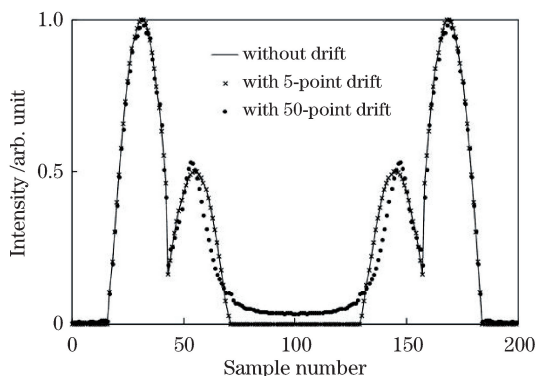


图 6 仿真光谱曲线比较

Fig. 6 Comparison of simulated spectral curves

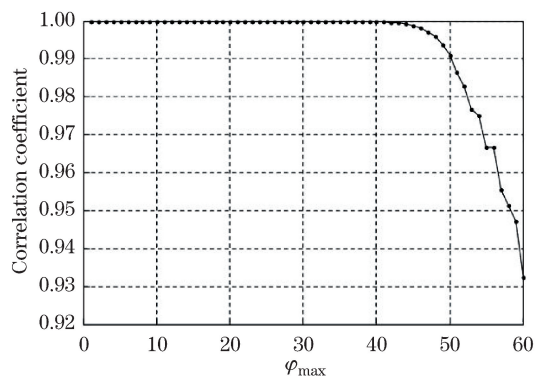


图 7 仿真光谱曲线质量与零级漂移量的关系

Fig. 7 Relationship between quality of simulated spectrum and value of zero-order drift

4 紫外成像光谱仪测量结果

实验采用紫外波段内反射率优于 95% 的聚四氟乙烯 (PTFE) 标准白板^[11] 作为测量样本, 分别使用高压汞灯、白光 LED 和氙元素灯作为照明光源。使用实验室制作的紫外干涉成像光谱仪^[8] 进行数据采集, 对干涉条纹的零级漂移现象进行验证。实验一使用测量范围分别为 300~395 nm 和 350~780 nm 的海洋光学 HR4000 高分辨率光谱仪对高压汞灯和白光 LED 照明条件下的白板反射光谱曲线进行比对测量。将干涉数据光谱反演得到的光谱曲线与高分辨率光谱仪测量的光谱曲线进行比对, 分析含零级漂移的干涉数据对光谱分辨率的影响。实验二使用氙灯作为宽带紫外光源, 分别使用零级漂移现象差别明显的两只分束体对相同目标进行测量, 分析含零级漂移的干涉数据对光谱响应幅值的影响。

4.1 零级漂移对仪器光谱分辨率的影响

由于标准白板具有均匀、稳定的反射光谱分布, 因此具有空间调制干涉结构的紫外成像光谱仪仅需单帧拍摄即可采集到白板反射光的干涉图。图 8 所示为干涉图的零级部分, 上半部分为高压汞灯照明时采集的干涉图, 下半部分为白光 LED 照明条件下的干涉图。图 9(a)、(b) 所示分别为图 8 中提取的高压汞灯和白光 LED 照明下白板的干涉曲线, 观察到干涉条纹存在明显的零级漂移。

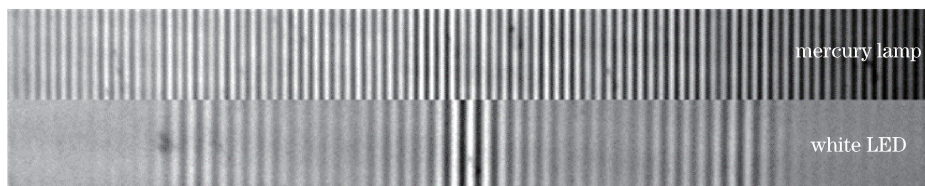


图 8 高压汞灯、白光 LED 照明条件下的 PTFE 白板干涉图

Fig. 8 Reflective interferograms of polytetrafluoroethylene plate illuminated with high-pressure mercury lamp and white-light LED

对图 9(a) 中的干涉曲线进行光谱反演, 得到成像光谱仪测量的高压汞灯光谱曲线并与高分辨率光谱仪测量数据进行比对, 结果如图 10 所示。高压汞灯的特征光谱在 312.2, 334.1, 365.0 nm 处均有正确响应, 零级漂移现象未对干涉数据质量造成较大影响。经过光谱定标, 成像光谱仪的波数分辨率为 155.666 cm^{-1} , 即光谱仪的成像 CCD 每个像素对应的光程差 $\Delta_{\text{px}} = 0.0627 \text{ }\mu\text{m}$ 。

对图 9(b) 中的干涉曲线进行光谱反演, 可得到成像光谱仪测量的白光 LED 光谱曲线, 与高分辨率光谱仪测量结果进行比对, 结果如图 11 所示, 测量得到白光 LED 主要特征波长为 538.4 nm。由于所用成像光谱仪包含紫外选通滤光片, 因而仪器在可见光波段的光谱响应分布不均匀, 但其光谱曲线的极大值包络线 (图 11 中虚线) 与高分辨率光谱仪测量结果较为一致。由此可见, 包含零级漂移的干涉数据不会影响成像光谱仪的光谱分辨率。

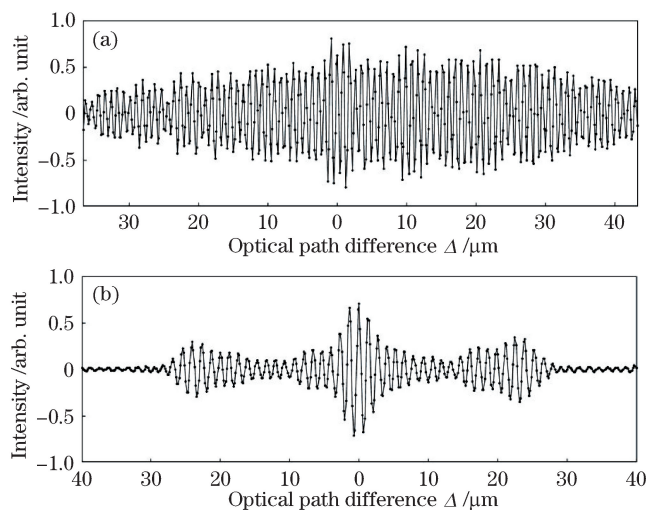


图 9 图 8 中提取的干涉曲线。(a)高压汞灯照明干涉曲线;(b)白光 LED 照明干涉曲线

Fig. 9 Interference curves extracted from Fig. 8. (a) Interference curve illuminated with high-pressure mercury lamp; (b) interference curve illuminated with white-light LED

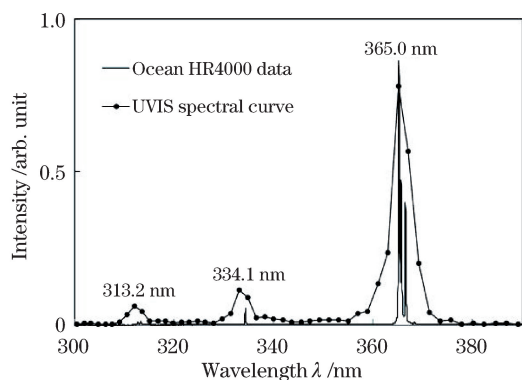


图 10 汞灯光谱曲线

Fig. 10 Spectra of high-pressure mercury lamp

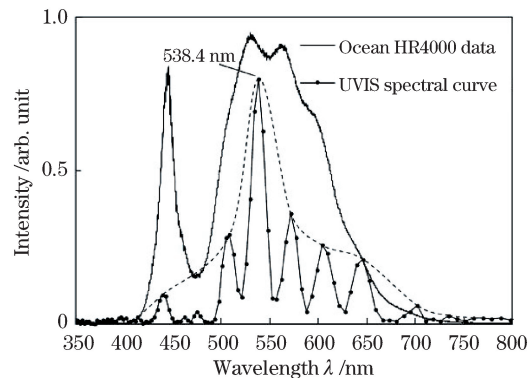


图 11 白光 LED 光谱曲线

Fig. 11 Spectra of white-light LED

图 9(a)中高压汞灯(中心波长为 365.0 nm)的干涉条纹零级位在成像器的第 729 像素列,图 9(b)中白光 LED(中心波长为 538.4 nm)的干涉条纹零级位在成像器的 749 像素列,零级位置变化量 $\Delta x_{px} = 21$ pixel。根据(5)式,两干涉图的零级漂移对应附加光程差的变化量为 $\Delta_{px} \times \Delta x_{px} = 1.317 \mu\text{m}$ 。若光学胶厚度 $d = 10 \mu\text{m}$,根据(3)、(4)式计算可知,直角棱镜斜边平移量 $\Delta l = 20.93 \mu\text{m}$ 。此时在 240~370 nm 的成像光谱仪工作波段内零级位置变化量 $\Delta x_{px} = 30$ pixel,根据仿真实验结论,当双边干涉图干涉维大于 150 个采样点时,零级漂移不会对光谱反演结果造成影响。

4.2 零级漂移对光谱响应幅值的影响

更换紫外干涉成像光谱仪的分束体,分别对会产生较小和较大零级漂移现象的两枚紫外胶合分束体进行对比实验。使用氙灯光源照明标准白板的测量结果如图 12 所示,图中干涉维含 256 个采样点。由于氙灯为紫外宽带光源,因此当分束体产生的零级漂移较小时,干涉图能量集中在零级附近,如图 12(a)所示。当分束体产生较严重的零级漂移现象时,如图 12(b)所示,干涉条纹布满整个采样窗口,无法找到准确的零级位置,且部分干涉条纹可能在采样窗口之外。图 13 所示为图 12 中两干涉图光谱反演的归一化结果。虽然含不同零级漂移的两反演光谱曲线的波长位置基本一致,但其光谱响应幅值差别明显,因此当干涉图的零级漂移现象较严重时,将得到错误的光谱曲线。零级漂移量相对较小的分束体光谱数据质量较好,可作为紫外干涉成像光谱仪的干涉元件。

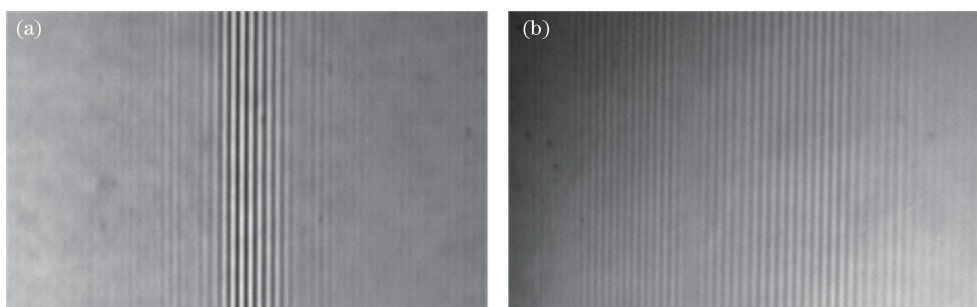


图 12 氙灯照明条件下 PTFE 白板干涉图。(a)含较小零级漂移;(b)含较大零级漂移

Fig. 12 Reflective interferograms of PTFE plate illuminated with deuterium lamp. (a) Interferogram with smaller zero-order drift; (b) interferogram with larger zero-order drift

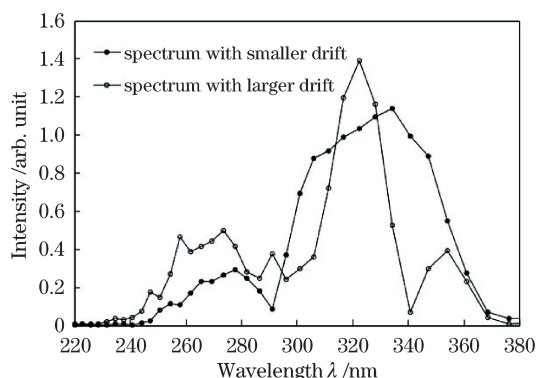


图 13 光谱曲线比较

Fig. 13 Comparison of spectra

5 结 论

对时空联合调制型像平面式紫外干涉条纹零级漂移现象进行分析和验证。仿真实验证明,对于像平面式干涉成像光谱仪,当干涉条纹的主干涉级未移出成像面时,零级漂移造成的相位偏差不会导致错误的光谱响应。实测数据表明含零级漂移的干涉数据光谱反演得到的光谱数据分布与理论位置一致,说明成像光谱仪的干涉光程差仍然符合线性分布,零级漂移不会降低光谱数据的准确性,像平面式干涉成像光谱仪可以在紫外波段内工作。但是,对存在零级漂移的干涉曲线进行切趾滤波时,会改变光谱曲线的部分响应幅值,因此零级漂移对光谱曲线响应幅值的影响仍需进一步研究,需要在辐射度定标后改进切趾滤波算法。

参 考 文 献

- Jin Yangming, Wang Yan, Zhao Zhicheng, *et al.* Analysis and comparison of signal-to-noise ratio of spatially modulated interference and diffraction grating imaging spectrometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0911001.
靳阳明, 王 岩, 赵知诚, 等. 空间调制干涉型和衍射光栅型成像光谱仪信噪比性能的分析比较[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0911001.
- Chen J, Zhu Y, Liu B, *et al.* Experimental study of Fourier transform spectrometer based on MEMS micro-mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(5): 053003.
- Kang Li, Huang Min, Nie Yunfeng, *et al.* Spectral inversion modeling and manufacture tolerance analysis of a solid Mach-Zehnder imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0311002.
康 丽, 黄 旻, 聂云峰, 等. 固体马赫曾德尔成像光谱仪反演模型及误差分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0311002.
- Horton R. HEIFTS - design, modeling and recent experimental results[C]. *Optical Society of America Trends in Optics and Photonics*, Coeur d'Alene, 2001: FWC3.
- Xue Qingsheng. Optical design of spaced-based broadband limb ozone profile sounder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822002.
薛庆生. 星载宽波段临边臭氧廓线探测仪光学设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0822002.
- Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.* Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis

- four mirrors optical system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0216001.
- 朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0216001.
- 7 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.* Study of the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0330001.
- 刘 洋, 廖宁放, 白廷柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0330001.
- 8 Liao Ningfang, Lü Hang, Liu Yang, *et al.* Broadband close shot ultraviolet imaging spectrum device: CN103940514A [P]. 2014-07-23.
- 廖宁放, 吕 航, 刘 洋, 等. 一种宽波段近景紫外成像光谱装置: CN103940514A[P]. 2014-07-23.
- 9 Lü Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.* Study on interferogram-spectrum modulation by the rotation of compensation plate in static Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1130001.
- 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 静态傅里叶变换光谱仪补偿板的旋转对干涉图谱的调制研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1130001.
- 10 Lü Hang, Liao Ningfang, Wu Wenmin, *et al.* Interferogram baseline correction method based on self-adaptive differential filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1030002.
- 吕 航, 廖宁放, 吴文敏, 等. 基于自适应差分滤波的干涉图基线校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1030002.
- 11 Georgiev G T, Butler J J. Long-term calibration monitoring of spectralon diffusers BRDF in the air-ultraviolet[J]. Applied Optics, 2007, 46(32): 7892-7899.