

激光与光电子学进展

空间外差连续光的非均匀误差校正

王润昊¹, 孙影茹¹, 甘茵露¹, 吴兴江¹, 柯俊杰¹, 王新强^{1,2}, 甘永莹^{2,3*}¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;²广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004;³桂林电子科技大学教学实践部, 广西 桂林 541004

摘要 为了获得高精度的光谱, 必须对空间外差光谱仪干涉图进行校正。针对空间外差光谱仪自身缺陷导致的干涉图非均匀误差, 提出了一种基于傅里叶变换的校正方法。通过理论推导发现目标光谱是非均匀误差的傅里叶变换与误差光谱的卷积, 并以连续光水汽干涉图为例进行了验证实验。结果表明, 在 2693 组实验数据中, 2679 组数据得到了明显的校正效果, 随机抽取 3 组数据校正后的标准差均提升了一个数量级, 验证了该校正方法的有效性。

关键词 光谱学; 空间外差光谱仪; 干涉图; 非均匀误差; 误差校正

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1930002

Nonuniformity Distortion Correction of Spatial Heterodyne Continuous Light

Wang Runhao¹, Sun Yingru¹, Gan Yinlu¹, Wu Xingjiang¹, Ke Junjie¹, Wang Xinqiang^{1,2},
Gan Yongying^{2,3*}¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin 541004, Guangxi, China;*²*Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, Guangxi, China;*³*Teaching Practice Department, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin 541004, Guangxi, China*

Abstract To obtain a high precision spectrum, the interferogram of space heterodyne spectrometer should be corrected. This study proposes a correction method based on the Fourier transform to address the nonuniform distortion of the interferogram caused by defects in a spatial heterodyne spectrometer. The target spectrum is discovered theoretically to be the convolution of the Fourier transform of the nonuniform distortion and the distortion spectrum. A verification experiment was performed by taking the continuous optical water vapor interferogram as an example. The results show that, among 2693 sets of experimental data, 2679 sets of data obtained an obvious correction effect. The standard deviation of 3 sets of randomly selected data after a correction increased by the order of magnitude, which verifies the effectiveness of the correction method.

Key words spectroscopy; spatial heterodyne spectrometer; interferogram; nonuniformity distortion; distortion correct

1 引言

空间外差光谱仪具有高集成度、高分辨率、大光通量以及大视场的特点, 广泛应用于天文观测和大气遥感等领域。相比传统的傅里叶光谱仪, 空间外差光谱仪采用的空间调制方式大大提高了光谱仪的分辨率, 且其体积小、无运动部件, 在使用过程中减少了移

动带来的误差, 便于搭载在航天飞行器上, 还可以通过添加棱镜达到扩大视场的目的^[1-8]。此外, 空间外差光谱仪采集得到的原始信息为干涉图, 经傅里叶变换后可获得相应的光谱信号。但在实际应用中, 光谱仪制造过程引入的误差会使探测器获得的干涉图失真, 进而影响复原光谱的准确性^[9-13]。为了获得较为准确的光谱信号, 对干涉图进行误差校正十分必要。

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-10-07; 录用日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(41561079, 62005059)、广西高校大学生创新训练项目(202010595009)、广西光电信息处理重点实验室 2021 年度主任基金(GD21105)

通信作者: *yolanda_gan@qq.com

国内外学者在该仪器的非均匀性方面开展了相关研究,如:Englert等^[14]采用挡光臂平场法,在干涉仪胶合前对探测器响应及光学系统的非均匀性进行校正,可以实现探测器响应与光学器件的非均匀性校正,但不能消除胶合过程产生的误差及探测器非线性误差的影响;Englert等^[15]对干涉数据进行处理时,发现探测响应的非均匀性会使数据的变换光谱出现“鬼线”,但没有给出消除该现象的方法;吕金光等^[16]采用模拟光强分布函数的方式,研究了空间调制型傅里叶变换光谱仪的光强非均匀性校正,实现了仿真干涉图与光谱的复原,但并没有给出实际光强分布函数的求解方法;李志伟等^[17]提出了一种同时校正探测器响应非线性及非均匀性的方法,该方法利用积分球输出不同辐射等级的均匀面光源对探测器响应的非线性及非均匀性进行校正,但没有分析干涉仪胶合误差及各光学器件非均匀性误差的影响。实际应用中仪器测量的光谱主要是连续光谱,而对连续光进行非均匀校正更为重要,但目前对这方面的研究鲜有报道。因此,本文以空间外差水汽干涉图为例对连续光干涉图的非均匀误差进行校正研究,并建立了相关误差处理方法。

2 非均匀误差的影响及校正方法

空间外差光谱仪通过 CCD 探测器记录干涉图信息,在入射光强均匀以及探测器像元灵敏度均匀的情况下,输出的干涉图条纹对比度相同。探测器的生产加工过程复杂和入射光强不均匀等因素均会使干涉图出现边缘模糊或亮斑等情况。因此,从空间外差光谱仪的原理分析非均匀误差对空间外差探测的影响及其校正方法具有重要意义。

空间外差光谱仪的结构如图 1 所示。入射光通过

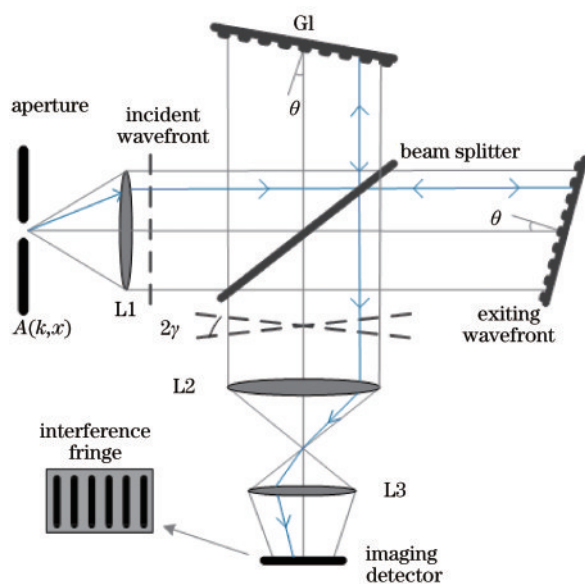


图 1 空间外差光谱仪的结构图

Fig. 1 Structure diagram of the spatial heterodyne spectrometer

准直镜进入空间外差光谱仪,被分束器分成两束相干光:一束光经分束器反射到达光栅 G1,衍射后返回到分束器;另一束透过分束器到达光栅 G2,经光栅衍射后回到分束器。两束相干光最终在分束器会聚发生干涉形成干涉条纹并被记录在探测器上。当入射光线沿光轴原路返回时,其对应的波数被称为 Littrow 波数, Littrow 角为 θ 。由于其波面与光轴垂直,相位差为 0,干涉条纹的空间频率为 0。非 Littrow 波数的光束返回时在透镜 L2 前发生波前倾斜,倾斜角为 γ ,两相干光形成一定频率的空间干涉条纹^[18]。

干涉图的空间频率可表示为

$$k = 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta, \quad (1)$$

式中: σ_0 为 Littrow 波数; σ 为任意波数。当空间外差干涉图的光强均匀分布时,探测器上的干涉信息可表示为

$$I(x) = \int_0^{+\infty} B(\sigma) \{1 + \cos[8\pi x(\sigma - \sigma_0) \tan \theta]\} d\sigma, \quad (2)$$

式中: $B(\sigma)$ 为入射光的辐射强度; x 为探测器的像元位置。该信息分为两个部分,一部分是恒定的,另一部分是随光程差变化的等幅余弦函数(干涉图),其指数形式可表示为

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(k) \exp(ikx) dk. \quad (3)$$

光强不均匀分布时会导致光谱峰值失真,且光强非均匀分布函数与干涉图的空间频率有关,此时非均匀干涉图可表示为

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k, x) B(k) \exp(ikx) dk, \quad (4)$$

式中, $A(k, x)$ 为光强分布函数。光强分布不均匀时即为非均匀误差,光强分布均匀的理想干涉图和含有非均匀误差的干涉图分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。可以发现,非均匀干涉图的条纹对比度从中间向四周逐渐降低。

对式(4)进行傅里叶变换,得到复原光谱

$$B(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{A(k, x)} I(x) \exp(ikx) dx. \quad (5)$$

由傅里叶变换的特性可知,目标光谱是非均匀误差的傅里叶变换与误差光谱的卷积,可表示为

$$B(k) = F[I(x)] \otimes F\left[\frac{1}{A(k, x)}\right], \quad (6)$$

式中, F 为傅里叶变换函数。

3 非均匀误差校正实验分析

根据上述推导过程,选取中国科学院安徽光机所实测的空间外差水汽光谱作为无误差光谱数据,仿真不同曲面的非均匀误差,并基于式(4)在干涉图中引入非均匀误差,再通过式(6)对干涉图的非均匀误差进行校正,最后将校正结果与无误差光谱进行对比,以验证本方法的有效性。图 3 为使用的水汽干涉图

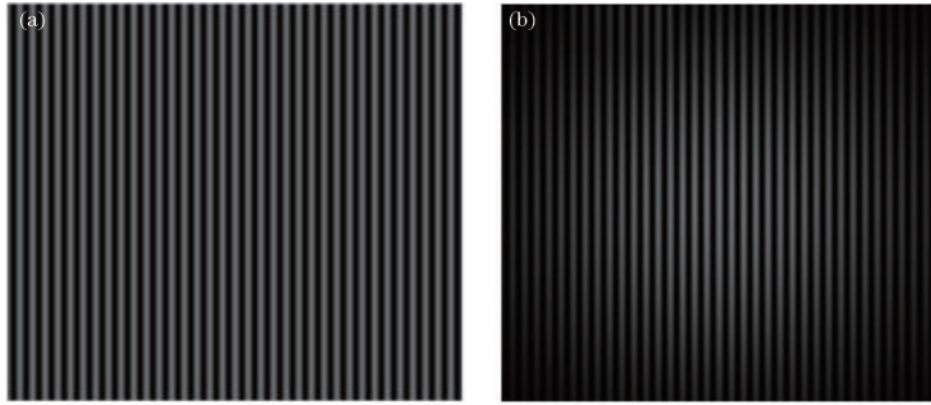


图 2 非均匀误差对干涉图的影响。(a)理想干涉图;(b)含有非均匀误差的干涉图

Fig. 2 Influence of nonuniformity distortion on interferogram. (a) Ideal interferogram; (b) interferogram with nonuniformity distortion

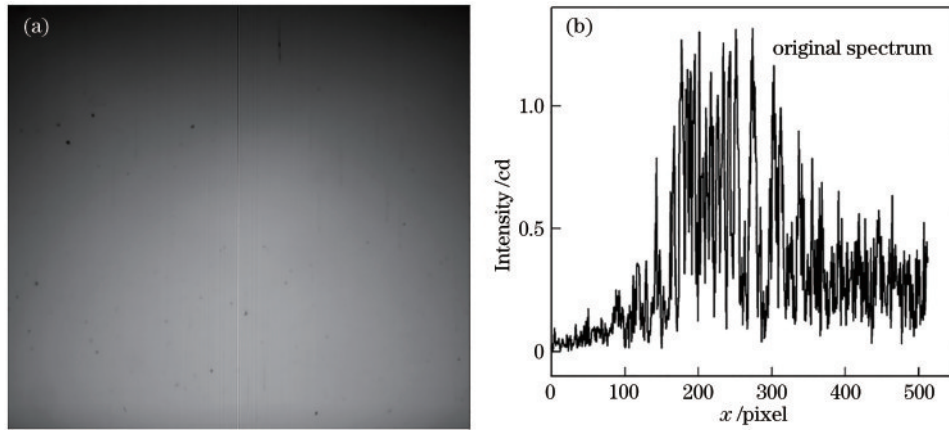


图 3 一维水汽干涉图与光谱图。(a)干涉图(b)光谱图

Fig. 3 Interferogram and spectrum of one-dimensional water vapor. (a) Interferogram; (b) spectrogram

与变换光谱,相应的光谱仪参数:波长范围为 930~950 nm;光谱分辨率为 0.05 nm;探测器的尺寸为 1024 pixel×1024 pixel;衍射光栅常数为 600 mm⁻¹;Littrow 波长为 930 nm。

空间外差光谱仪的非均匀误差是光频率和探测器像元的二维函数。实际应用中可将多个频率处的单色光非均匀误差曲线作为基准,通过差值获取整个误差曲面^[19]。实验中用多个高斯函数叠加的方式模拟不同频率的非均匀误差曲线,利用拉格朗日插值方法在其频率范围内进行填充,以得到连续光的非均匀误差,这种随机生成误差的方法使校正效果更具有普遍意义。

进行非均匀误差仿真时,选取的高斯函数可表示为

$$f_{k_i}(x) = \sum_{j=1}^3 a_j \exp\left[\frac{-(x - \mu_i)^2}{2\delta_j^2}\right], \quad (7)$$

式中: a_j 为高斯曲线的高度; μ 为 x 的平均值; δ^2 为 x 的方差。选取的插值方程可表示为

$$M(k, x) = \sum_{i=1}^4 f_{k_i}(x) \prod_{j \neq i} \frac{k - k_j}{k_i - k_j}, \quad (8)$$

式中, k_j 为误差函数的插值位置。通过改变插值位置就能得到不同的非均匀误差,图 4 为实验中选取的 4 个频率非均匀误差函数,每条曲线均由多条不同参数的

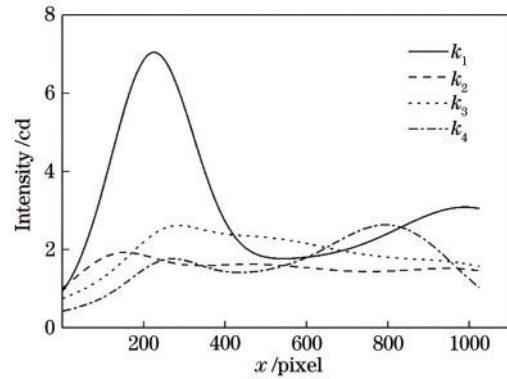


图 4 非均匀误差函数

Fig. 4 Nonuniform distortion function

高斯曲线线性叠加而成。

不断改变图 4 中非均匀误差函数的形状及插值位置获取不同的非均匀误差曲面,进而获取存在不同非均匀误差的干涉图,对其进行校正以验证非均匀误差校正方法的适用性。选用标准差衡量光谱的校正效果,可表示为

$$X_{Std} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{i=1}^n [M(n) - X_{Ideal}(n)]^2, \quad (9)$$

式中: M 为被测光谱; X_{Ideal} 为理论光谱。标准差的大小

可表示校正光谱与理论光谱的相似度,标准差越小,表明测量光谱与理论光谱的相似度越高。通过改变误差函数的波形得到 2693 组非均匀误差,用式(6)进行校正后,得到 2693 组光谱校正前后标准差的差值如图 5

所示。其中,圆点符号表示校正后光谱标准差小于误差光谱标准差,三角符号表示校正后光谱标准差大于或等于误差光谱标准差。可以发现,进行光谱校正后,仅有 14 组光谱数据未得到明显改善。原因是非均匀误差曲面边缘数值太大会导致误差光谱完全失真,本方法的校正效果不理想。而在实际情况中,由于仪器的组装集成精度较高,几乎不会出现大幅度非均匀失真,因此本方法是完全有效的。

随机选取 3 组 (No. 202、No. 333、No. 660) 校正光谱的非均匀误差曲面、误差光谱和校正后的光谱如图 6 所示。在误差光谱中,底部实线表示误差光谱与原始光谱的残差。在校正光谱中,底部实线表示校正光谱与原始光谱之间的光谱残差。可以发现,在非均匀误差曲面中某区域仍存在尖峰,但不存在明显接近 0 的数据。原因是非均匀误差主要是探测器像元之间传输效率不均匀,使探测器某个区域的非均匀误差较为严重,这种情况在一体化空间外差光谱仪实际测量中较为常见。对比误差光谱与校正后的

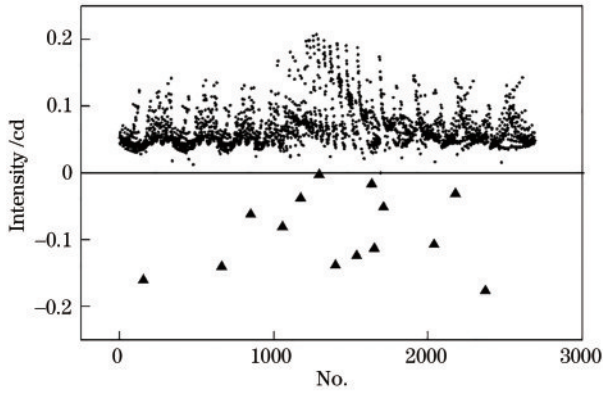


图 5 校正前后光谱的标准差分布

Fig. 5 Spectral standard deviation distribution before and after correction

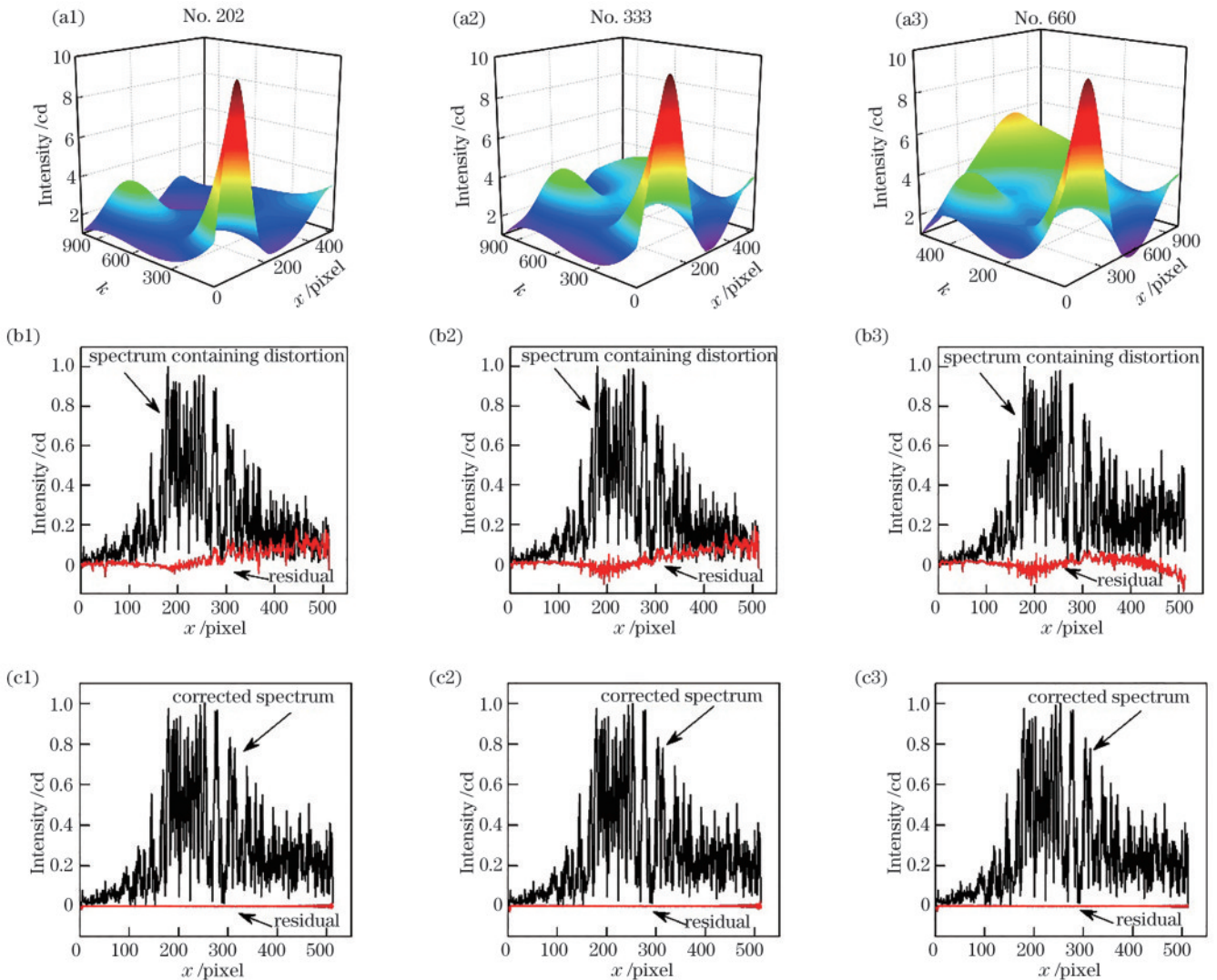


图 6 校正前后的光谱。(a)误差曲面;(b)校正前的光谱;(c)校正后的光谱

Fig. 6 Spectra before and after correction. (a) Distortion surface; (b) spectrum before correction; (c) spectrum after correction

光谱可知,校正后的光谱残差接近于 0。这表明校正后的光谱已得到明显改善。计算得到校正前后光谱的标准差如表 1 所示。可以发现,校正后 3 组光谱的标准

差都降低了一个数量级,也反映了本方法的光谱校正结果是有效的。

表 1 光谱校正前后的标准差

Table 1 Standard deviation before and after spectral correction

No.	No. 202	No. 330	No. 666
Standard deviation before spectral correction	0.06956	0.07360	0.04571
Standard deviation after spectral correction	0.00243	0.00181	0.00308

4 结 论

空间外差光谱仪的干涉图非均匀误差主要来自入射光强的不均匀以及探测器像元的灵敏度不均匀,干涉图的非均匀性会降低反演光谱的精度。因此,从空间外差光谱仪原理出发,推导发现目标光谱是非均匀误差的傅里叶变换与误差光谱的卷积,并提出了一种针对空间外差连续光干涉图非均匀误差的校正方法。以中国科学院安徽光机所提供的连续水汽干涉图为例进行了 2693 组实验。结果表明,仅有 14 组不符合实际情况的光谱数据未得到明显改善,其余光谱均得到了较好的校正效果。对比较正前后光谱的标准差发现,经本方法校正后的光谱数据标准差均提升了一个数量级,验证了本方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] Barnett P D, Lamsal N, Angel S M. Standoff laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) using a miniature wide field of view spatial heterodyne spectrometer with sub-microsteradian collection optics[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(4): 583-590.
- [2] Barnett P D, Strange K A, Angel S M. Improving spectral results using row-by-row Fourier transform of spatial heterodyne Raman spectrometer interferogram[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(6): 1380-1386.
- [3] Harlander J M, Roesler F L, Englert C R, et al. Robust monolithic ultraviolet interferometer for the SHIMMER instrument on STPSat-1[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2829-2834.
- [4] 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.
- [5] Cai Q S, Bin X L, Du S S. Spatial heterodyne spectrometer based on the Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics Communications, 2015, 355: 239-245.
- [6] Harlander J M, Roesler F L. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for ground-based and space astronomy[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1235: 622-633.
- [7] Harlander J, Reynolds R J, Roesler F L. Spatial heterodyne spectroscopy for the exploration of diffuse interstellar emission lines at far-ultraviolet wavelengths [J]. The Astrophysical Journal Letters, 1992, 396: 730-740.
- [8] Cheben P, Powell I, Janz S, et al. Wavelength-dispersive device based on a Fourier-transform Michelson-type arrayed waveguide grating[J]. Optics Letters, 2005, 30(14): 1824-1826.
- [9] Englert C R, Harlander J M, Cardon J G, et al. Correction of phase distortion in spatial heterodyne spectroscopy[J]. Applied Optics, 2004, 43(36): 6680-6687.
- [10] 刘嘉敏, 杨松, 黄鸿. 基于局部重构 Fisher 分析的高光谱遥感影像分类[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0710001. Liu J M, Yang S, Huang H. Hyperspectral remote sensing image classification based on local reconstruction Fisher analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0710001.
- [11] 徐泽林, 路东明, 王利平, 等. 利用灰度差估计的条纹非均匀性校正方法[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0511001. Xu Z L, Lu D M, Wang L P, et al. Fringe non-uniformity correction method based on gray difference estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0511001.
- [12] 王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2315001. Wang T, Yang S M, Li S S, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2315001.
- [13] 叶松, 甘永莹, 熊伟, 等. 采用小波变换的空间外差光谱仪基线校正[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1117009. Ye S, Gan Y Y, Xiong W, et al. Baseline correction of spatial heterodyne spectrometer using wavelet transform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1117009.
- [14] Englert C R, Harlander J M. Flatfielding in spatial heterodyne spectroscopy[J]. Applied Optics, 2006, 45(19): 4583-4590.
- [15] Englert C R, Harlander J M, Owrutsky J C, et al. SHIM-free breadboard instrument design, integration, and first measurements[R]. Defense Technical Information Center, 2005.
- [16] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制型傅里叶变换光谱仪光场的均匀性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 259-263. Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Study on uniformity of optical field in static fourier transform spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(1): 259-263.
- [17] 李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001. Li Z W, Xiong W, Shi H L, et al. Correction of detector

- response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0530001.
- [18] 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.
Ye S, Fang Y H, Hong J, et al. System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 959-964.
- [19] 王新强, 张丽娟, 熊伟, 等. 空间外差光谱仪干涉图非均匀性校正研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1274-1278.
Wang X Q, Zhang L J, Xiong W, et al. Study on inhomogeneous correction of interference pattern of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1274-1278.