

弹光调制干涉图的预处理及相位校正方法

张敏娟^{1,2}, 毕满清¹, 郝 骞¹, 王志斌^{1,2}, 李 珊^{1,2}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要:弹光调制傅里叶变换干涉信号是高速、连续非线性变化。为了实现等时间采样干涉信号的准确光谱重建,有必要对弹光调制干涉信号的预处理技术和相位校正方法进行研究。为了从连续的干涉数据中获取一幅完整的干涉图,文中利用干涉图零光程差点的幅值最大特性,获取一幅完整的干涉图。同时,为了克服干涉图的非对称性,提出将改进的 Mertz 相位校正方法与非均匀快速傅里叶变换算法(NUFFT)相结合,提高重建光谱的速度和准确度。在实验中,通过仿真产生 300 K 红外黑体的非对称弹光调制干涉图,采用该数据处理方法提高了重建光谱的精度,并以大气窗口为被测对象,比较准确地重建了大气光谱曲线,实现了气体成分的定性分析。

关键词:弹光调制傅里叶变换光谱仪; 非对称干涉图; 相位校正; Mertz 法

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0423001

Method of preprocessing and phase correction for photo-elastic modulated interferograms

Zhang Minjuan^{1,2}, Bi Manqing¹, Hao Qian¹, Wang Zhibin^{1,2}, Li Shan^{1,2}

(1.School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Interferograms in the photo-elastic modulator Fourier transform spectrometers (PEM-FTS) has high modulation frequency, and its modulated optical path difference is continuous nonlinear. In order to improve the accuracy and stability of the rebuilt spectrums whose interferograms is sampled by the equal time intervals, it is necessary to study the technology of pretreatment and phase correction of photo-elastic modulated interferograms. In the paper, the characteristic that the amplitude of the zero optical path difference was maximum in a interferogram were used to derive these data of a interferogram. Simultaneously, the method which combined the improved Mertz method and the accelerated nonuniform fast Fourier transform algorithm (NUFFT) was put forward to resolve the asymmetric and to improve the velocity and precision of the rebuilt spectrum. In the experiment, the asymmetrical photo-elastic modulated interferograms of 300 K infrared blackbody were generated by simulation, the data processing algorithm was applied to enhance the accuracy of the rebuild spectrum,

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61505180); 山西省青年基金 (2015021084)

作者简介: 张敏娟(1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学信息获取与处理方面的研究。Email: zmj7745@163.com

and the atmosphere spectral curve was rebuilt and gas components were qualitative analyzed with the atmosphere window as the measured object.

Key words: photo-elastic modulated Fourier transform spectrometers (PEM-FTS); asymmetric interferograms; phase correction; Mertz method

0 引言

弹光调制傅里叶变换光谱仪(PEM-FTS)具有测量速度快、光谱范围宽、抗震性能好等优点,在瞬态光谱探测中具有潜在应用前景^[1-2]。但弹光调制干涉信号是高速、连续的非正弦变化,对弹光调制干涉信号预处理、快速光谱重建技术提出了难题。

在文献中,已经采用非均匀快速傅里叶变换算法实现了弹光调制信号的快速光谱重建,但由于采样不均匀或者没有采集到零光程差点,使得复原光谱的准确度降低^[3-5]。目前常用的相位校正方法主要有:Forman 卷积法、Mertz 乘积法、绝对值法等^[6]。绝对值法要求采集双边干涉图,数据量大,而且平方根运算使随机噪声叠加,不适合弱信号探测。Forman 卷积法对相位误差有比较好的校正效果,但计算量大,不便与非均匀快速傅里叶变换算法相结合,实现光谱重建;Mertz 乘积法运算量小、易实现,而且在频域对重建光谱进行校正^[7]。

在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所、桂林电子科技大学等已经在 Mertz 法的基础上,实现了空间外差光谱仪的相位校正^[8-10]、光纤陀螺的微小振动角的信号检测^[11]、雷达信号检测^[12]、傅里叶变换光谱仪的相位校正^[13-14]等。在该论文中,针对弹光调制傅里叶变换光谱仪采集的干涉图相位是非线性变化、存在相位误差问题,为了提高复原光谱的准确度,而不影响算法的复杂度,文中将对等时间采样的弹光调制干涉信号进行分析,基于干涉图零光程差点幅值绝对值最大特性和驱动信号的频率,获取一幅完整的干涉图。同时对 Mertz 法进行改进,与非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)算法相结合,实现了复原光谱的快速重建和相位校正,调高了复原光谱的准确度。

1 弹光调制干涉信号的特性分析

弹光调制傅里叶变换干涉仪的核心部件是由压

电陶瓷和石英晶体构成的弹光调制器,其工作原理如图 1 所示。弹光调制器在激励信号作用下,产生双折射效应。入射光经起偏器分解为 *o* 光和 *e* 光,这两束光穿过石英晶体时,产生相位延迟,且相位延迟量随着激励信号的变化而变化。因此,经检偏器可合成连续变化的干涉图。

当入射光为单色光时,其干涉信号为:

$$I_{out}(t)=aI_{in}\cos(2\pi X\sigma\sin(\omega_0 t)) \quad (1)$$

式中: I_{in} 、 I_{out} 分别为入射光和出射光的辐射强度; σ 为入射光的波数; X 为弹光调制器(PEM)的延迟因子。

当入射光为复色光时,有:

$$I_{out}(t)=a \int_0^{\infty} I_{in}\cos(2\pi X\sigma\sin(\omega_0 t))d\sigma \quad (2)$$

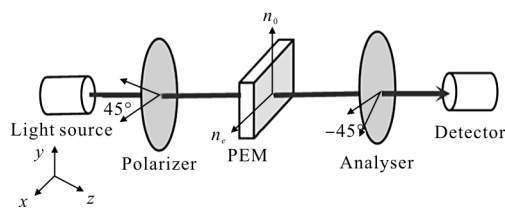


图 1 弹光双折射干涉仪原理图

Fig.1 Photo-elastic birefringence interferometer

从公式可知,干涉图的相位差是正弦变化,采用等时间方式采样的干涉图相位是非线性的,不能直接利用快速傅里叶变换算法(FFT)重建光谱;同时需从连续的干涉数据中提取完整的一幅干涉图进行傅里叶变换;而且采集的干涉数据因光学系统的偏差(如光路中元件位置偏差引入了不同的光程差)、电子系统相移(如放大器、滤波器等引入的时延)、采样位置误差(如没有采到零光程差点)等因素使得干涉图不对称。因此,该论文将对弹光调制干涉信号的预处理技术、快速的光谱重建方法进行研究。

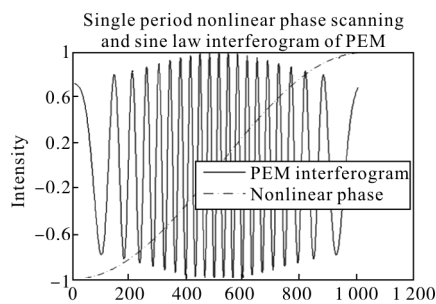
2 单周期弹光调制干涉图提取方法

弹光调制干涉仪谐振频率在 50 kHz 左右,在输入信号波长范围为(3~12 μm)、光谱分辨率为 20 cm^{-1} 时,

信号的最高频率为 26.2 MHz。在满足采样定理时,系统的采样频率应大于 52.4 MHz。为了更好地重现原始信号,应选择采样频率在 100 MHz 以上的 AD 转换器。当高速 AD 转换器以 100 MSP 采样干涉数据时,获得高速连续的干涉数据。

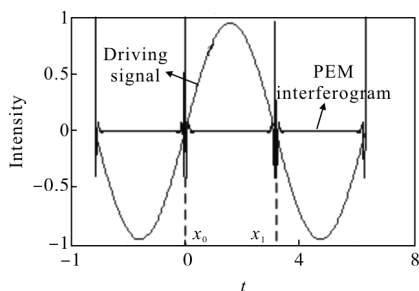
弹光调制干涉信号是由点探测器检测的随时间连续变化的一维信号。为了利用傅里叶变换算法实现光谱复原,则要求从连续干涉数据中提取一个整周期的干涉数据完成傅里叶变换。

由图 2(b)可知,当入射光为复色光时,弹光调制干涉信号在零光程差点干涉光强最大(或绝对值最大),随着距离零光程差点越远,干涉信号振荡衰减、趋向于零。如图中点 x_0 、 x_1 分别为一幅干涉图的零光程差点。



(a) 窄带光干涉图

(a) Interferogram of narrow-band light



(b) 复色光干涉图

(b) Interferogram of compound light

图 2 等时间采样的弹光调制干涉图

Fig.2 Photo-elastic modulated interferograms by the equal time sample

设两幅干涉图最大值之间的采样点数为 N , 设第 m 幅干涉图的最大值 x_0 , 以此点为中心截取 $(x_0 - \frac{N}{2}, x_0 + \frac{N}{2})$ 范围内数据, 则构成一幅干涉图。

由文献可知, 弹光调制器是一个热-机-电耦合

器件, 弹光调制器驱动电压、温度的变化, 将导致干涉图最大光程差的漂移。因此, 使得一个周期内干涉数据量在一个小范围内变化。为了利用 FFT 算法, 需使数据量为 2^N 。因此, 需对一个周期内干涉数据采用插值补零的方式, 满足数据量要求。

3 带有相位校正的快速光谱重建方法

弹光调制干涉信号是正弦非线性变化的, 在文献中, 已经采用改进的 NUFFT 算法实现了弹光调制干涉图的快速光谱重建。为了克服干涉图不对称对复原光谱准确度的影响, 文中对 Mertz 相位校正算法进行改进, 应用到弹光调制快速光谱重建算法中。

3.1 Mertz 相位校正法

非对称干涉图可表示为:

$$I_d(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x + \varphi(\nu)) d\nu \quad (3)$$

$$I_d(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) e^{-i\varphi(\nu)} e^{-i2\pi\nu x} d\nu \quad (4)$$

由公式(4)可知, 非对称干涉图 $I_d(x)$ 是 $B(\nu)e^{-i\varphi(\nu)}$ 的傅里叶反变换。则由非对称干涉图计算的复原光谱为:

$$B(\nu)e^{-i\varphi(\nu)} = \int_{-\infty}^{\infty} I_d(x) e^{i2\pi\nu x} dx \quad (5)$$

由公式(5)可知, 干涉图的相位误差将使复原光谱的相位谱产生附加相位 $-\varphi(\nu)$, 不改变幅度谱。因此计算出相位误差函数 $\varphi(\nu)$ 可正确复原入射光谱。因此, Mertz 基于公式(5), 在频域计算小双边干涉数据的相位谱, 利用公式(6)实现傅里叶变换后重建光谱的校正。

$$\text{Re}(B(\nu)) = \text{Re}(B'(\nu)) \cos(\varphi(\nu)) + \text{Im}(B'(\nu)) \sin(\varphi(\nu)) \quad (6)$$

弹光调制干涉仪利用高速探测器可获得双边干涉数据。在计算相位谱 $\varphi(\nu)$ 时可采用整幅干涉图计算, 提高了相位谱的准确度。

3.2 基于 Mertz 法和 NUFFT 算法的快速光谱重加算法

改进的非均匀快速傅里叶变换算法是一种将基于 Gaussian 卷积的插值算法与 FFT 算法相结合的非均匀快速傅里叶变换算法。为了减小相位误差对测量精度的影响, 文中研究了带有相位校正的非均匀快速傅里叶变换算法。

一个周期内弹光调制非均匀的 N 个干涉数据可

以表示为:

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N-1} f_j \delta(x-x_j) \quad (7)$$

将非均匀数据 $f(x)$ 与高斯函数 $g_r(x)$ 进行卷积运算, 即对非均匀点进行平滑处理。

$$f_r(x) = f(x) * g_r(x) = \int_0^{\infty} f(y) g_r(x-y) dy \quad (8)$$

由于 $f_r(x)$ 是一个平滑地、无限积分函数, 可定义 x 轴上的离散等间隔采样函数:

$$f_r(m\Delta x) = \sum_{j=0}^{N-1} f_j \cdot g_r(m\Delta x - x_j) \quad (9)$$

式中: Δx 为插值后数据间隔; m 为第个数据点; x_j 为第 j 个非等间隔的数据值。由公式(9)可估计出每个非均匀采样点对附近相邻几个均匀点的贡献量, 通过对贡献量的累加可估计插值后均匀点的值。

当以 100 kHz 的频率采样弹光调制干涉信号时, 一个周期内弹光调制干涉数据量大约为 1000 个。为了利用 FFT 算法, 采用非整数倍插值, 保证插值后的数据为 2048 个。

为了抑制旁瓣效应, 采用对称的三角函数 $D(m\Delta x)$ 对插值后等间隔数据进行切趾处理。即对 $f_r(m\Delta x)D(m\Delta x)$ 进行快速傅里叶变换, 有:

$$F_r(k) \approx \sum_{m=0}^{M_r-1} f_r(m\Delta x) \times D(m\Delta x) e^{-i2\pi km/M_r} \quad (10)$$

式中: M_r 为过采样的数据量, 实验中 $M_r=2048$ 。

为了减小高斯函数对频谱的影响, 在频域要退卷积。对公式(10)进行退卷积, 得到估计的非均匀信号 $f(x)$ 的傅里叶变换为:

$$F(m\Delta v) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\pi}} \sum_{m=0}^{M_r-1} e^{(m\Delta v)^2} F_r(m\Delta v) \quad (11)$$

基于采集的弹光调制干涉信号是双边干涉数据, 可利用重建光谱计算其相位谱 $\phi(m\Delta v)$ 。

$$\phi(m\Delta v) = \arctan \frac{\text{Im}(F(m\Delta v))}{\text{Re}(F(m\Delta v))} \quad (12)$$

利用所计算的相位谱对重建光谱进行校正, 即:

$$\begin{aligned} \text{Re}(B(m\Delta v)) &= \text{Re}(F(m\Delta v)) \cos(\phi(m\Delta v)) + \\ &\quad \text{Im}(F(m\Delta v)) \sin(\phi(m\Delta v)) \end{aligned} \quad (13)$$

相位校正后, 重建光谱即:

$$B(m\Delta v) \approx \text{Re}(B(m\Delta v)) \quad (14)$$

在利用改进的 Mertz 法进行相位校正时, 克服了

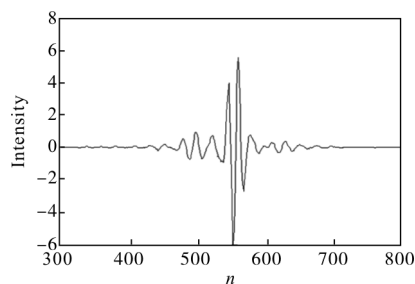
Forman 法的卷积运算量大、绝对值法的误差大缺点, 同时, 易于 NUFFT 算法相结合, 提高重建光谱的速度和准确度。

4 仿真与实验

4.1 仿真测试

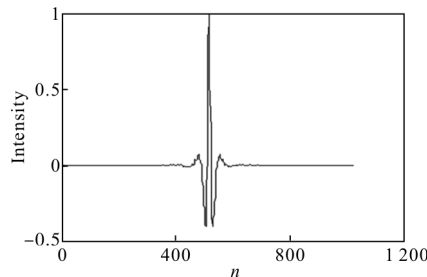
为了验证弹光调制干涉信号预处理算法的有效性, 文中基于 Matlab 软件, 编程产生 300 K 的红外黑体光谱。基于弹光调制傅里叶变换光谱仪的工作原理及公式(2), 产生非对称的干涉图, 如图 3(a)所示。通过文中提出的干涉信号预处理方法, 利用干涉图零光程差点的幅值最大特点, 提取整周期的干涉信号, 采用 NUFFT 算法实现干涉信号的插值和快速傅里叶变换, 并基于 Mertz 法完成重建光谱的相位校正。相位校正后的干涉图如图 3(b)所示, 其仿真结果如图 4 所示。

图 4(a)是在干涉信号对称性比较差时, 没有进行 Mertz 法相位校正的光谱图。从图中可以看出, 在近红外波段仿真值与实际值存在比较小的误差, 但是在远红外波段误差则比较大; 而图 4(b)是在光谱重建算法中加入了改进的 Mertz 相位校正算法。其重建的光谱与实际值误差比较小, 提高了复原光谱的准确度。



(a) 非对称干涉图

(a) Asymmetric interferogram

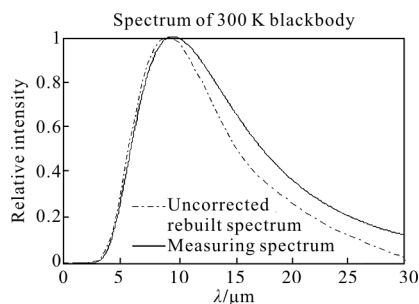


(b) 校正后对称干涉图

(b) Corrected symmetric interferogram

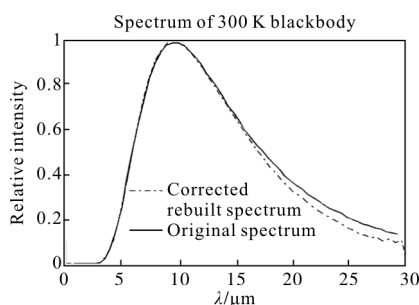
图 3 干涉图

Fig.3 Interferograms



(a) 未相位校正的光谱图

(a) Phase uncorrected spectrum



(b) 相位校正后光谱图

(b) Phase corrected spectrum

图 4 300 K 黑体的光谱图

Fig.4 Spectrums of 300 K blackbody

4.2 实验测试

基于实验室设计的弹光调制干涉仪、高速数据处理系统等，搭建了弹光调制傅里叶变换光谱测试平台，如图 5 所示。通过该平台对开放光程下的大气成份进行了探测。从图 6 中可以看出，由于光学系统、电学系统的相位延迟影响，采集的干涉图存在不对称。通过文中提出的弹光调制干涉信号数据处理方法，基本准确的重建了大气窗口的光谱曲线，如图 7 所示。从图 7 中，可以定性的分析出大气窗口中的 H₂O、CO₂、CH₄ 等对光谱的吸收。

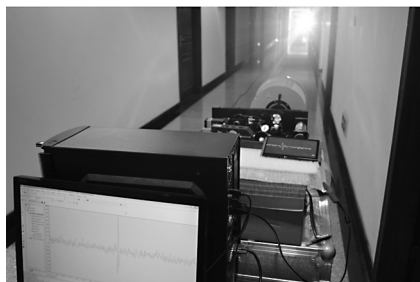


图 5 弹光调制傅里叶变换光谱测试平台

Fig.5 Testing platform of PEM-FTS

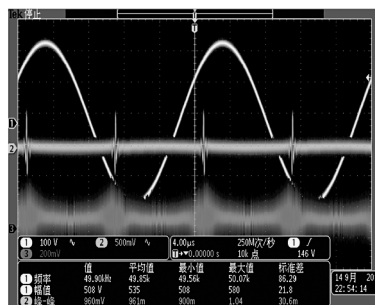


图 6 驱动信号及干涉图

Fig.6 Driving signals and interferograms

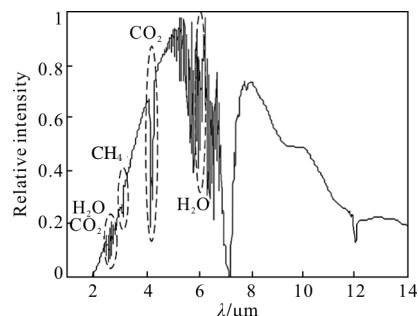


图 7 重建的大气光谱曲线

Fig.7 Rebuilt atmosphere spectral curve

表 1 对大气窗口中的 H₂O、CO₂、CH₄ 气体吸收峰的理论值、采用相位校正时重建光谱、未采用相位校正重建光谱中的吸收峰进行了对比。从表中可以看出经相位校正后，测量值明显接近与理论值，误差比较小。

表 1 大气窗口中气体吸收峰对比

Tab.1 Gas absorption peaks in the atmospheric window

Absorption gas	Theory absorption peak/μm	Corrected absorption peak /μm	Uncorrected absorption peak /μm
H ₂ O	2.7	2.596	2.596
H ₂ O	3.2	3.13	3.06
H ₂ O	6.25	6.35	6.426
CO ₂	2.7	2.668	2.624
CO ₂	4.3	4.254	4.234
CH ₄	3.39	3.32	3.26

5 结论

基于弹光调制干涉信号的高速、连续、相位非线性特性，在研究非均匀快速傅里叶变换算法的基础

上,文中对弹光调制干涉信号的预处理和相位校正技术进行研究,提出了以相邻干涉图零光程差点具有绝对最大值的特性获取一幅完整的干涉图;基于Mertz法在频域进行乘法相位校正,易与非均匀快速傅里叶变换相结合,提出了基于Mertz法和改进NUFFT算法的快速光谱重建算法。并仿真红外黑体的弹光调制干涉图,经验证此方法误差小、速度快。

参考文献:

- [1] Buican T N. Birefringence interferometers for ultra-high-speed FT spectrometry and hyperspectral imaging: I. Dynamic model of the resonant photoelastic modulator [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, 42(1): 51-58.
- [2] Buican T N. High retardation-amplitude photoelastic modulator: US, 415B2[P]. 2010-7-27.
- [3] Greenguard L, Lee J Y. Accelerating the nonuniform fast fourier transform[J]. *Siam Review*, 2004, 46(3): 443-454.
- [4] Kestur S, Park S, Irick K M, et al. Accelerating the nonuniform fast Fourier transform using FPGAs [C]//18th IEEE Annual International Symposium on Field Programmable Custom Computing Machines, 2010.
- [5] Zhang Minjuan, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, et al. Fast spectral rebuild garithmetic of PEM-FTS nolinear Pphase iInterfergram data [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2013, 40(5):0515001. (in Chinese)
张敏娟,王召巴,王志斌,等. PEM-FTS非线性干涉信号的快速光谱反演算法[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0515001.
- [6] Michaelian K H. Interferogram symmetrization and multiplicative phase correction of rapid.scan and step-scan photocoustic FTIR data[J]. *Infrared Phys*, 1989, 29(1): 87-100.
- [7] Avishai B D, Agustin I. Computation of a spectrum from a single-beam Fourier transform infrared interferogram [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1181-1189.
- [8] Ye Song, Xiong Wei, Wang Xinqiang, et al. Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 53(5): 0330001. (in Chinese)
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, 53(5): 0330001.
- [9] Shi Hailiang, Xiong Wei, Li Zhiwei. Phase error correction of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0330003. (in Chinese)
施海亮,熊伟,李志伟. 空间外差光谱仪相位误差修正[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0330003.
- [10] Wang Xinqiang, Ye Song, Zhang Lijuan, et al. Study on phase correction method of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1424-1428. (in Chinese)
王新强,叶松,张丽娟,等. 空间外差光谱仪相位校正技术的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1424-1428.
- [11] Meng Xiangtao, Xiang Zheng, Guo Jing, et al. Signal detecting technique of FOG's micro angle vibration under nonuniform sampling [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 2588-2592. (in Chinese)
孟祥涛,向政,郭景,等. 非均匀采样条件下光纤陀螺微小角振动信号检测技术 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 2588-2592.
- [12] Zhang Yan, Chen Yong, Zhou Dingfu, et al. Influence of sharpen function on the object image of synthetic aperture ladar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2588-2592. (in Chinese)
张艳,陈涌,周鼎富,等. 锐化函数对合成孔径激光雷达成像图像的影响[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2588-2592.
- [13] Zhang Minjuan, Zhang Jilong, Wang Zhibin, et al. Phase correction technology research and improved based on single-sided interferograms in FTIR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(5): 1203-1208. (in Chinese)
张敏娟,张记龙,王志斌,等. FTIR单边干涉图相位校正技术的研究与改进 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(5): 1203-1208.
- [14] Zhang Lei, Yang Minzhu, Zou Yaopu, et al. Instrument line shape of infrared Fourier transform spectrometer and its engineer applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3322-3328. (in Chinese)
张磊,杨敏珠,邹曜璞,等. 红外傅里叶光谱仪的仪器线形函数及工程应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3322-3328.