

doi: 10.3788/gzxb20124107.0878

一种新的过零单边干涉图切趾加权函数

张鹏, 张志辉

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要:提出一种新的切趾函数,用此切趾函数对过零单边干涉图加权,使具有相同光程差的两点光强与旋转因子的乘积之和为它们的平均值,减小了由于计算过程中零光程差点附近的数据被利用两次造成的误差.研究表明:与 Mertz 提出的切趾函数相比,本文提出的切趾函数对非对称性较严重的过零单边干涉图数据处理有更好的加权效果,能够有效减小光谱失真,同时计算效率得到了一定程度的提高,可广泛应用到傅里叶变换光谱仪中的过零单边干涉图处理中.

关键词:傅里叶变换光谱仪;单边干涉图;切趾

中图分类号:O433.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)07-0878-5

0 引言

傅里叶变换光谱仪是通过检测干涉信号,然后对干涉图进行傅里叶变换来测定光谱的仪器^[1-2].理想情况下,干涉图关于零光程差是对称的,但是由于检测干涉信号很难从零光程差开始、分束板存在吸收损耗和不均匀性、电子线路误差等,导致干涉图出现一定程度的不对称性和相位误差^[3],降低探测灵敏度,并导致谱线畸变.因此,相位误差的校正是光谱复原技术的核心问题,它决定了干涉成像光谱仪的使用范围,标志着干涉成像光谱仪性能的优劣和干涉成像光谱技术的高低^[4].

相位误差校正方法主要有:卷积法^[5]和乘积法^[6].卷积法在时域内完成相位校正,残余误差较小;而乘积法在频域内完成相位校正,有较大的残余误差,但是乘积法计算简单,计算速度快,实时性好,所以乘积法广泛的应用在光谱分析中.因此本文利用乘积法对相位误差进行校正.

在乘积法相位误差校正中,过零单边干涉图的零光程差点附近领域内的数据被计算两次,为了消除这种现象产生的误差,过零单边干涉图需要乘以一个切趾函数进行加权处理.当干涉图非对称性比较严重时,采用传统的切趾函数对干涉图加权处理之后,会导致谱线失真,不利于光谱在物质定性和定量分析中的应用^[7].因此,本文提出一种阶跃切趾函数,对非对称性较严重的干涉图进行加权处理,使短双边干涉图中具有相同光程差的两点光强与旋转因

子的乘积之和为它们的平均值,能够有效减小谱线失真,这种切趾函数同样适用于基本对称干涉图的加权处理中.

1 光谱还原基本原理

傅里叶变换光谱仪的基本原理是:利用干涉仪将各种不同波数的光迭加后形成干涉图,经过傅里叶逆变换得到光谱.为了获得干涉图数据,就必须对干涉图进行采样.干涉图采样有两种方式:单边采样和双边采样.在单边采样方式中,一种是从零光程差点至最大光程差点之间的采样,另一种是适当保留部分过零数据的单边采样,通常称之为“过零采样”.在没有任何误差的理想情况下,上述三种采样方式获得的干涉图,经过傅里叶变换之后,都能够获得较准确的还原光谱.当干涉图存在相位误差时,虽然双边采样还原光谱不用校正相位误差,但是双边采样数据量较大,数据传输将成为限制使用的一个瓶颈,如果使用高比率数据压缩,势必会引入其它误差.一般采用过零单边采样还原光谱,在零光程差点附近领域内的数据就包含了相位的信息.

采用过零单边采样还原光谱的基本原理^[8]:假设一束光谱分布是 $B(\nu)$ 的光束,经过相位误差为 $\theta(\nu)$ 的迈克尔逊干涉仪之后,形成的干涉光强为

$$I(x) = 2 \int_0^{+\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x + \theta(\nu)) d\nu \quad (1)$$

式中 ν 是波数, x 是光程差,如果令 $\theta(-\nu) = -\theta(\nu)$ 、 $B(\nu) = B(-\nu)$,则式(1)就可写成

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \exp(i2\pi\nu x) \exp[i\theta(\nu)] d\nu \quad (2)$$

基金项目:重点实验室基金项目(No. 9140C120313100C12)资助

第一作者:张鹏(1987-),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为红外光谱技术. Email: eiqd@ei41.com

收稿日期:2011-12-15; **修回日期:**2012-01-17

从式(2)可以看出,干涉图 $I(x)$ 是 $B(v)\exp [i\theta(v)]$ 的傅里叶变换. 因此

$$B_1(v) = B(v)\exp [i\theta(v)] = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cdot \exp (-i2\pi vx) dx = m_r(v) + im_i(v) \quad (3)$$

式中, $m_r(v)$ 、 $m_i(v)$ 分别是 $B_1(v)$ 的实部和虚部. 相位误差为

$$\theta(v) = \arctan \frac{m_i(v)}{m_r(v)} \quad (4)$$

由式(3), 可得光谱分布为

$$B(v) = B_1(v)\exp [-i\theta(v)] = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cdot \exp \{-i[2\pi vx + \theta(v)]\} dx \quad (5)$$

因为光谱的幅值是实数, 所以

$$B(v) = \text{Re}\{B_1(v)\exp [-i\theta(v)]\} \quad (6)$$

根据式(4), 通过短双边干涉图计算, 可以得到低分辨率的相位误差, 再通过插值的方法得到高分辨率的相位误差, 这个相位误差和用单边干涉图计算得到的相位谱相减后的余弦乘以单边干涉图的幅度谱就可以得到相位校正之后的复原光谱.

2 阶跃切趾函数

根据光谱还原基本原理可以看出, 当采用过零单边干涉图进行光谱复原时, 短双边数据被重复使用两次, 导致复原光谱响应低频部分加强了一倍, 高频分量相对减少, 使光谱曲线变得平滑、分辨率下降. 为了消除上述现象, Mertz 提出图 1 虚线表示的

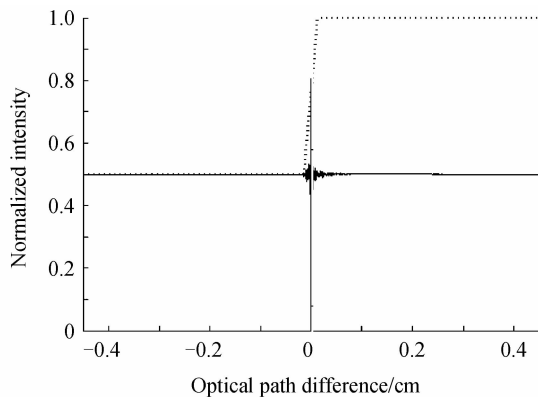


图 1 Mertz 切趾函数
Fig. 1 The Mertz apodization function

切趾函数, 表示为

$$y = \begin{cases} 0 & x < -L \\ \frac{x+L}{2L} & |x| \leq L \\ 1 & x > L \end{cases} \quad (7)$$

式中, L 是短双边干涉图的最大光程差. 用此切趾函数与过零单边干涉图相乘, 使短双边干涉图中具有相同光程差的两点干涉强度之和等于单点的幅值^[9]. 当干涉图关于零光程差点基本对称时, 这种切

趾函数能达到预期的加权效果. 但是, 由于相位误差的存在, 使得原来完全由 \cos 分量组成的对称干涉图, 加入了 \sin 分量, 干涉图发生畸变, 当相位误差超出一定的范围时, 干涉图存在严重的非对称性, 此时采用这种加权方法不但不能抵消非对称带来的计算误差, 反而会加重不对称性, 达不到预期的加权效果. 这种情况随着过零点数据量的减少变得更加明显, 这点可以由表 1 中标准偏差随着过零点数据减少逐渐增大可以看出. 因此, 本文提出一种新的切趾函数对过零单边干涉图进行加权处理, 如图 2 中的

表 1 不同过零采样点数时, 两种切趾函数对复原光谱的影响

Table 1 The influence of two apodization functions when the sampling number is differential

Zero-crossing sampling number	The calculational time(ms)/ The mertz apodization	Standard deviation/ The step apodization	The improved calculational efficiency
70	578.712/0.0142	577.877/0.0104	0.14%
140	588.326/0.0128	585.126/0.0114	0.54%
215	595.849/0.0075	589.795/0.0072	1.02%

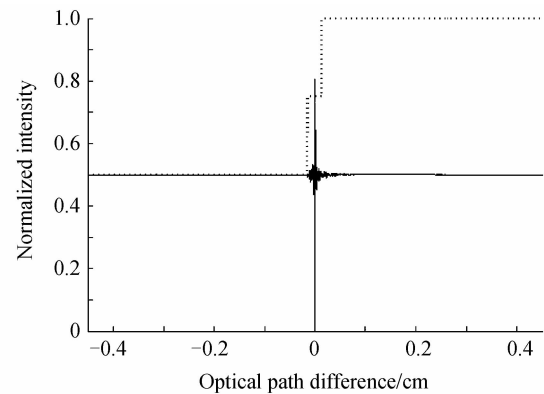


图 2 阶跃切趾函数
Fig. 2 The step apodization function

虚线所示, 此切趾函数为

$$y = \begin{cases} 0 & x < -L \\ 0.5 & |x| \leq L \\ 1 & x > L \end{cases} \quad (8)$$

由于此函数值是跳跃的, 因此把它称为阶跃切趾函数. 从图 2 中可以看出, 用此切趾函数对非对称干涉图进行加权处理之后, 短双边干涉图中具有相同光程差的两点光强与旋转因子的乘积之和为它们的平均值, 减小了具有相同光程差两点光强之间的差距, 进一步减弱了由于干涉图的非对称性带来的计算误差, 比图 1 中的切趾函数具有更好的加权效果.

3 仿真与讨论

图 4、图 5 分别是光谱分布为图 3 的光谱经过

傅里叶变换光谱仪之后的过零单边干涉图和短双边干涉图,从图 5 中可以看出,此干涉图的非对称性比较严重,如果采用 Mertz 提出的切趾函数对此干涉图加权,则零光程差点右边的数据所占的权重将进一步扩大,加重了干涉图的非对称性.而采用本文提出的阶跃切趾函数,则避免了这种现象.

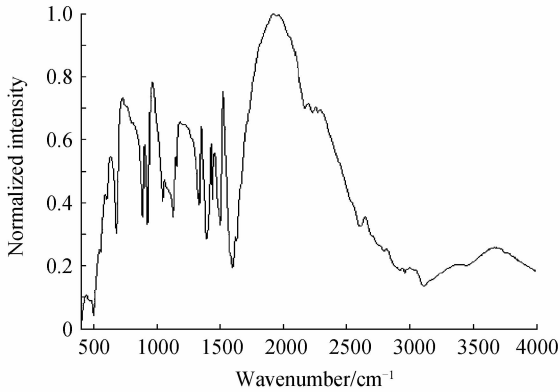


图 3 光谱分布
Fig. 3 Spectrum distribution

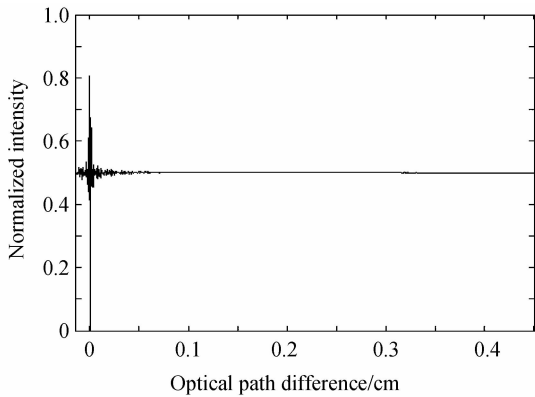


图 4 过零单边干涉图
Fig. 4 Zero-crossing single sided interferogram

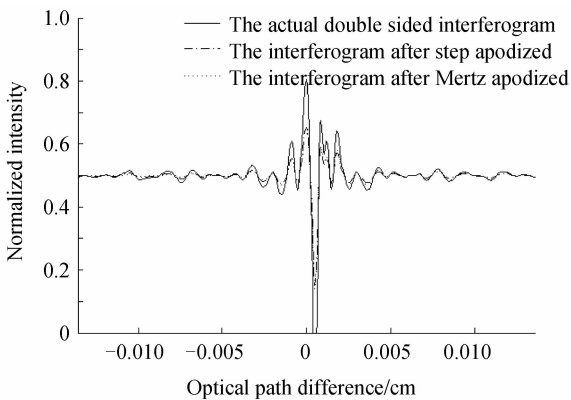


图 5 短双边干涉图
Fig. 5 Short double sided interferogram

对过零单边干涉图的左侧补零,使过零单边干涉图零光程差点两端的数据点数一样,用本文提出的阶跃切趾函数对补零之后的过零单边干涉图进行加权处理.对短双边干涉图双侧进行补零,使补零后的短双边干涉图的数据与过零单边干涉图的数据一

样多.根据离散傅里叶变换的奇偶对称性^[10],将过零单边干涉图的数据序列和短双边干涉图的数据序列分别作为一个复数序列的实部和虚部,组成一个复数序列.采用三角切趾函数,对此复数序列进行切趾处理,然后经过一次离散傅里叶变换.根据傅里叶变换的共轭对称性质,就可以得到还原光谱.图 6 是分别采用 Mertz 和本文提出的切趾方法对过零单边干涉图加权处理之后,采用上述方法进行傅里叶变换获得的还原光谱仿真图,图 7 是仿真图的部分光

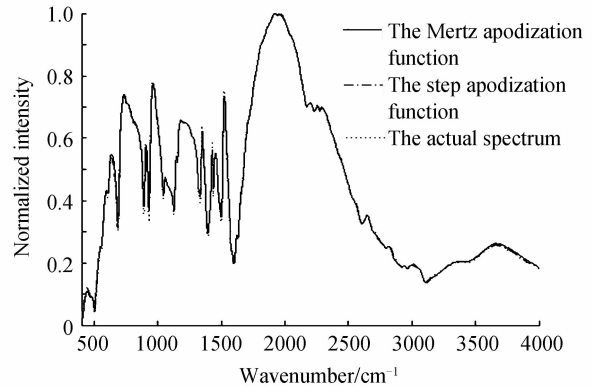
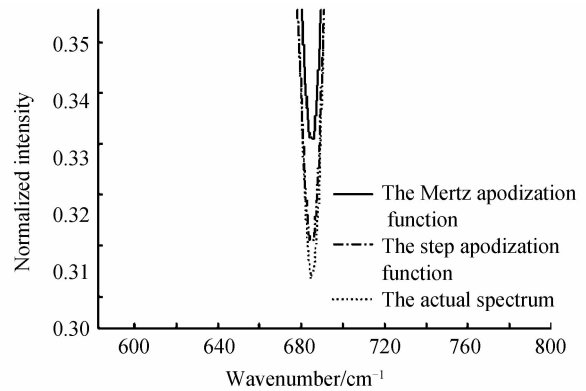
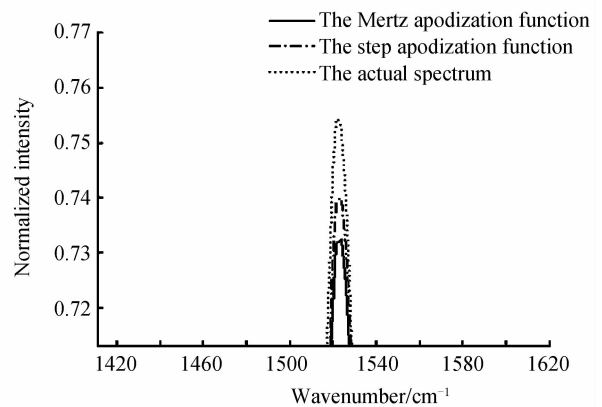


图 6 采用 Mertz 和本文提出的切趾方法,获得的还原光谱仿真图
Fig. 6 The simulated figures of spectrum based on the apodization function proposed by Mertz and the article respectively



(a) The first amplificatory figures



(b) The second amplificatory figures

图 7 还原光谱部分尖端放大图
Fig. 7 The amplificatory figures of some spectral cusps

谱尖端放大图.从图 6 和图 7 中可以看出,阶跃切趾函数比 Mertz 提出的切趾函数具有更好的加权效果,尤其在光谱的尖端位置,与实际光谱更加吻合,有效减小了光谱的失真.

经过大量实验获得光谱的干涉图数据,分别用两种切趾方法对过零单边干涉图进行切趾处理,反演仿真结果表明:利用本文提出的阶跃切趾函数对过零单边干涉图加权,是可行的,而且具有更好的加权效果,适用范围更广;另外,若短双边干涉图采样数据点数为 N ,由式(7)可知,Mertz 切趾函数自身需要加法、乘法和除法运算均是 N 次,而阶跃切趾函数在短双边干涉图范围内的值是常量,不需要额外的运算,因此能够有效降低计算复杂度,节约运算时间.而且当过零量较大时,阶跃切趾函数的优越性将更加明显.表 1 是分别采用 Mertz 和阶跃切趾函数对过零单边干涉图处理,获得还原光谱的运行时间,以及采用标准偏差^[3]来定量描述复原光谱的变形情况.

从表 1 中可以看出,与 Mertz 切趾方法相比,采用阶跃切趾方法获得的复原光谱与实际光谱更加吻合,此时阶跃切趾方法的运算效率也更高,当数据量较大时,高效率获得复原光谱在实际工程应用中是非常重要的.

4 结论

本文对过零单边干涉图的采样数据处理进行了研究,提出了基于非对称干涉图的阶跃切趾函数,该方法同样适用于基本对称干涉图的数据处理.根据离散傅里叶变换的奇偶对称性,用过零单边采样数据和短双边采样数据构造了一个复数序列,对此复数序列进行傅里叶变换,根据傅里叶变换的共轭对称性质,重构了光谱.研究结果表明:第一,与 Mertz 切趾函数相比,过零单边干涉图经过阶跃切趾函数加权,获得复原光谱与实际光谱更加吻合,特别是在光谱尖端处,能够更好地反映出谱线峰值特征,此点在通过光谱对物质进行定性和定量分析中的应用是至关重要的;第二,阶跃切趾函数可用于对任何结构的干涉图进行加权,计算效率更高,使用范

围更广.

参考文献

- [1] XIANGLI Bin, ZHAO Bao-chang, XUE Ming-qiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **18**(1): 18-22.
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光子学报*, 1998, **18**(1): 18-22.
- [2] LÜ Qun-bo, YUAN Yan, XIANGLI Bin. Fourier transform imaging spectral data compression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 573-576.
吕群波, 袁艳, 相里斌. 傅里叶变换成像光谱数据压缩[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 573-576.
- [3] XIANGLI Bin, YUAN Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1869-1874.
相里斌, 袁艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1869-1874.
- [4] JIAN Xiao-hua, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang. A new method for spectrum reproduction and interferogram processing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 824-829.
简小华, 张淳民, 赵葆常. 研究干涉图处理与光谱复原的一种新方法[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 824-829.
- [5] SUN Ya-min, YIN De-kui. An improved algorithm for correction of remote sensing interferograms based on forman method[J]. *Signal Processing*, 2008, **24**(6): 1048-1051.
孙雅敏, 殷德奎. 基于 Forman 法对遥感干涉图像进行相位校正的改进[J]. *信号处理*, 2008, **24**(6): 1048-1051.
- [6] MICHAELIAN K H. Interferogram symmetrization and multiplicative phase correction of rapid-scan and step-scan photoacoustic FT-IR data [J]. *Infrared Phys*, 1989, **29**(1): 87-100.
- [7] SHI Da-lian, LÜ Qun-bo, CUI Yan, *et al.* Objective measurement of spectral distortion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1530-1533.
石大莲, 吕群波, 崔燕, 等. 光谱失真客观度量方法初探[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1530-1533.
- [8] LIU Yong, WU Jian-dong, ZHU Ling, *et al.* Spectral recovery in fiber fourier transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1697-1700.
刘勇, 巫建东, 朱灵, 等. 光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1697-1700.
- [9] GRIFFITHS P R. Fourier transform infrared spectrometry [M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1986.
- [10] XING Ting, WANG Mo-chang, GONG Hui-xing. A method to improve the computing efficiency of mertz method in fourier transform spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3): 355-359.
邢廷, 王模昌, 龚惠兴. Mertz 法傅里叶光谱计算过程的改进[J]. *光学学报*, 1999, **19**(3): 355-359.

A Novel Apodization Function of Single Sided Interferogram

ZHANG Peng, ZHANG Zhi-hui

*(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Research Institute of China
Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China)*

Abstract: A novel apodization function is proposed. The new apodization function multiplied by zero-crossing single sided interferogram can average the product of twiddle factor and intensity of two points having the same optical path difference, and reduce the error due to the data around zero optical path difference used twice. The simulation results show that the new apodization function fits better in some serious unsymmetrical interferograms than the Mertz apodization function and can minish the spectral distortion. Moreover, the computational complexity can be reduced significantly. The new apodization function can be widely applied to zero-crossing single sided interferogram data processing of fourier transform spectrometer.

Key words: Fourier transform spectrometer; Single sided interferogram; Apodization