

单边干涉图的数据处理方法研究*

相里斌¹ 袁艳²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要 干涉成像光谱仪干涉图的采样方式一般有两种, 即单边采样和双边采样, 单边采样干涉图往往保留零光程差附近的部分“短双边”采样数据以利于数据处理. 本文对空间调制干涉成像光谱仪不同干涉图采样方式下的光谱复原方法进行了研究, 讨论了空间调制干涉成像光谱仪单边干涉图的切趾与相位修正, 提出了更为合理和准确的方法. 研究发现, 合理设置短双边数据在减小仪器的原始数据量的同时, 能够保证复原光谱的准确度.

关键词 空间调制干涉成像光谱仪; 单边干涉图; 切趾; 相位修正

中图分类号 TP731 **文献标识码** A

0 引言

空间调制干涉成像光谱仪是上世纪 90 年代出现的一种新型 Fourier 变换成像光谱仪^[1-5], 由于没有运动部件, 仪器的稳定性大大提高, 迅速发展成为航空航天应用的新一代成像光谱仪^[6,7], 我国“环境一号”、“嫦娥一号”卫星都采用了这种成像光谱仪.

但是, 如何在完成空间调制干涉成像光谱仪硬件研制的基础上获得理想的复原光谱一直是个难题, 深入细致的研究已不可回避.

本文对单边采样和双边采样干涉图的光谱复原方法进行对比研究, 提出对空间调制干涉成像光谱仪适当保留干涉图的短双边数据足以保证复原光谱精度, 同时, 与双边采样干涉图相比, 数据量减小近一半, 这对工程应用十分重要. 但是, 采用传统方法对单边干涉图进行光谱复原时会遇到谱线变形等问题, 本文分析了这种变形的原因, 并给出了修正方法.

1 空间调制干涉成像光谱仪

典型的空间调制干涉成像光谱仪原理如图 1. 它主要由七部分组成: 前置光学系统、入射狭缝、横向剪切分束器、傅氏镜、柱面镜、面阵探测器与信号处理系统.

在面阵探测器上, 垂直方向获得目标的空间信息, 水平方向上获得光谱信息(干涉图), 典型的干涉图像如图 2.

当波数范围为 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ 时, 空间调制干涉成像光谱仪的干涉图与入射光谱强度分布间的关

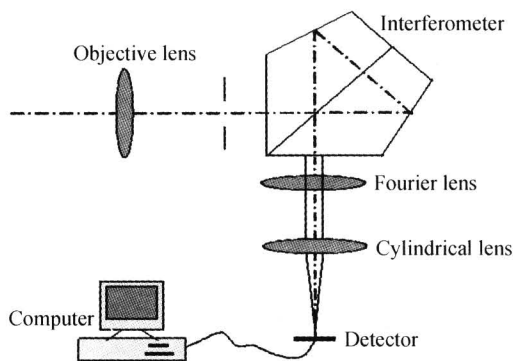


图 1 空间调制干涉成像光谱仪原理
Fig. 1 Principle diagram of SMIFTS

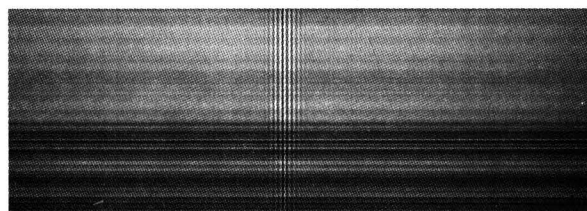


图 2 空间调制干涉成像光谱仪干涉图像
Fig. 2 Interference pattern of SMIFTS

系为^[8]

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \sin c \left[\frac{d s \nu}{f} \right] e^{-i 2 \pi x \nu} d \nu \quad (1)$$

式中, x 是光程差, ν 是波数(即波长的倒数); $\sin c$ 函数项是空间调制干涉成像光谱仪由于像元尺寸带来的调制函数, d 是横向剪切干涉仪的剪切量, s 是像元宽度, f 是傅氏镜的焦距.

2 干涉图采样方式

在 Fourier 变换光谱学理论中^[9], 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”. 对应干涉图形式如图 3.

* 国家自然科学基金(60532070)资助

Tel: 029-88887626 Email: xiangli@ms.xab.ac.cn

收稿日期: 2006-08-09

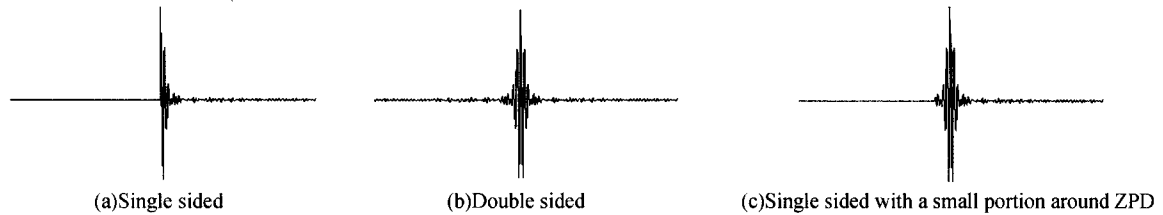


图3 干涉成像光谱仪的干涉图

Fig. 3 interferogram of fourier transform spectrometer

针对三种采样方式,复原光谱的数学表达式分别为(略去一些常量)

单边采样

$$B(\nu) = \int_0^L I(x) e^{-i2\pi\nu x} dx \quad (2)$$

双边采样

$$B(\nu) = \int_{-L}^L I(x) e^{-i2\pi\nu x} dx \quad (3)$$

过零采样

$$B(\nu) = \int_{-\Delta}^{\Delta} I(x) e^{-i2\pi\nu x} dx \quad (4)$$

式中: L 表示最大光程差, Δ 表示过零采样量.

在没有任何误差的理想情况下,上述三种方法都能够获得较准确的复原光谱. 但当存在误差时,双边采样方式能够最好地进行修正,单边采样方式则十分困难,过零采样在不同过零量时情况不同,总体上讲过零量越大、修正能力越强.

3 对复原光谱的讨论

一般干涉成像光谱仪的光谱复原需要经过探测器读出信号(包括光学系统带来的像面不均匀性)修正、相位误差修正、切趾、逆傅里叶变换等环节. 探测器读出信号修正十分重要,但不影响本文讨论内容,故不考虑.

相位误差的产生因素很多,例如读出干涉图时很难正好从 $x=0$ 的原点开始、分束板均匀性不好、探测器的光谱响应不均匀、电子线路误差以及采样步距不均等. 相位误差的一般表达式为^[10]

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

如果设法求得相位因子 $\varphi(\nu)$, 就可以得到真实的复原光谱

$$B(\nu) = e^{[-i\varphi(\nu)]} \int_{-\infty}^{\infty} I'(x) e^{(-i2\pi\nu x)} dx \quad (6)$$

若相位因子是波数的线性函数 $\varphi(\nu) = 2\pi\xi\nu$, 则式(6)变为

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I'(x - \xi) e^{(-i2\pi\nu x)} dx \quad (7)$$

这等价于将干涉图沿 x 轴横移了 ξ , 这就是零点偏移相位误差.

本文研究对象是空间调制干涉成像光谱仪,其

零点偏移相位误差是最常见的. 因此,讨论中重点考虑零点偏移相位误差,同时,为了避免探测器读出等随机误差的影响,采用计算机模拟的方法.

模拟中除特殊说明外,假设双边干涉图采样点数为 512, 单边为 256, 过零采样为 276, 其中 20 点是过零量.

3.1 理想情况下的光谱复原

在不考虑任何误差的理想情况下,利用单边采样与双边采样干涉图得到的复原光谱相同,如图 4.

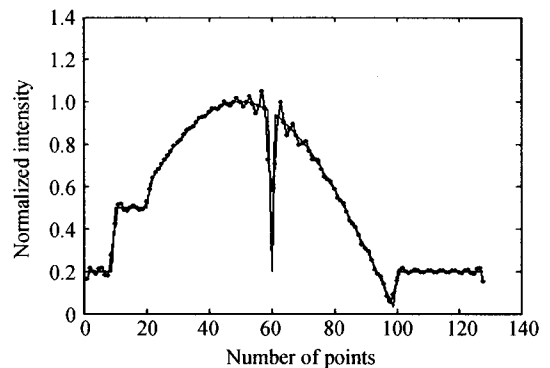


图4 理想情况下的复原光谱

Fig. 4 Recovered spectrum under ideal condition

3.2 过零采样干涉图的处理方法

采用传统方法对过零采样干涉图进行光谱复原时,发现复原光谱曲线变得平滑、分辨率下降、谱线形状变化,如图 5.

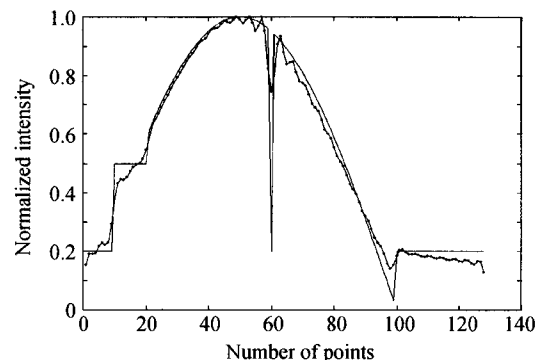


图5 过零采样方式的复原光谱

Fig. 5 Recovered spectrum from single sided interferogram

分析原因可以发现,当采用图 3(c)过零采样干涉图进行光谱复原时,零光程差两边 20 点(即小双边干涉图)部分被重复使用两次,而 21 至 256 点干涉图只使用了一次. 因此,对应复原光谱的相应低

频部分被加强了一倍, 高频分量相对减小, 这是光谱变形、平滑的原因.

为证明上述分析的结果, 采用理想情况下的单边干涉图进行复原, 但将 1 至第 20 点的强度放大一倍, 得到了与图 5 完全相同的结果, 证明该分析是正确的.

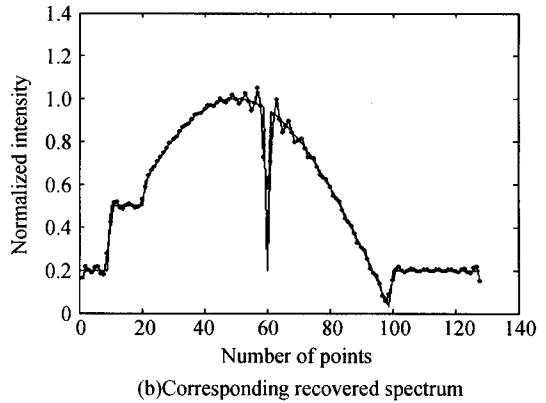
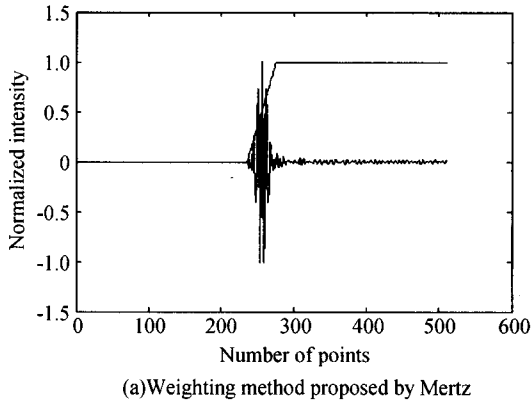


图 6 干涉图加权与复原光谱
Fig. 6 Weighted interferogram and corresponding recovered spectrum

处理时, 采用了如图 7(a) 的切趾函数. 图 7(b) 是切趾后的复原光谱, 这种方法被沿用了许多年.

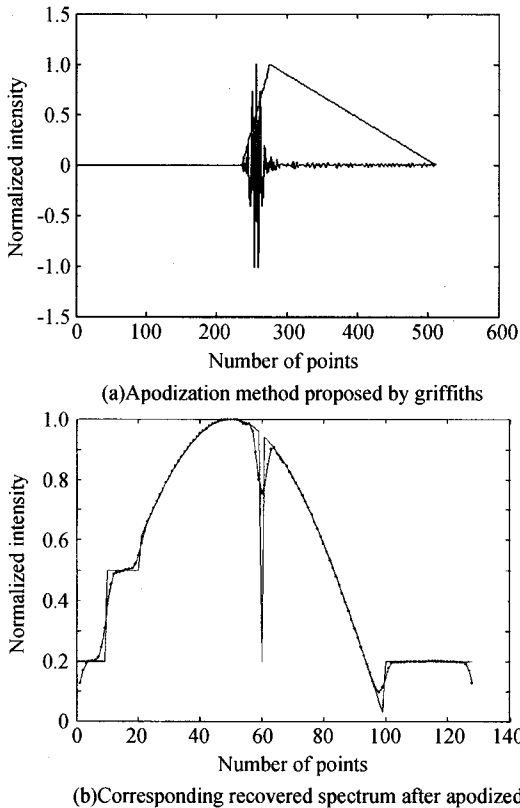


图 7 干涉图切趾与复原光谱
Fig. 7 Apodized interferogram and corresponding recovered spectrum

事实上, 这种切趾方法本质上对小双边干涉图没有切趾, 这使得原本希望采用三角形切趾却得到了梯形切趾的效果. 这一点在过零量较小时表现不明显, 但在过零量较大时会很明显.

为了解决此问题, Griffiths^[9] 采用了 Mertz 提出的加权方法来消除上述现象, 实际上就是对小双边干涉图各点乘以不同的系数, 使相同光程差的两个对应点的干涉强度之和保持单点的幅值, 便可以修正复原光谱, 如图 6.

此外, Griffiths 在对过零采样干涉图进行切趾

本文提出一种新的切趾方式, 能够保证复原光谱的准确性和切趾效果. 该切趾方式如图 8(a), 由两步组成: 第一步: 采用小双边干涉图加权方法修正过零干采样涉图; 第二步: 采用大双边切趾函数 (如图 8(a) 三角形切趾) 进行切趾.

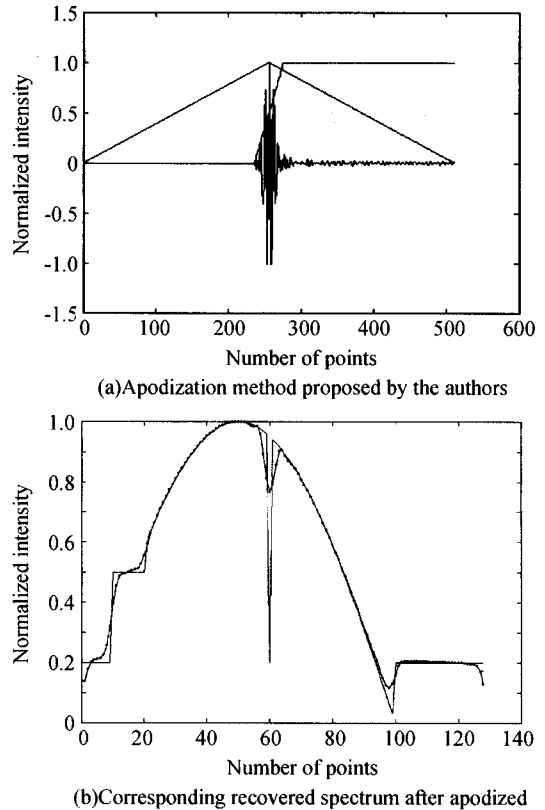


图 8 本文切趾方法与复原光谱
Fig. 8 Proposed apodization function and corresponding recovered spectrum

显然,对于各种切趾函数,这种方式都是适用的,其切趾效果与理想情况下采用相应切趾函数对单、双边干涉图进行切趾相同.

采用这种方法,得到图 8(b)的复原光谱.

本文提出的方法与 Griffiths 的方法在物理意义上是有区别的.放大过零量,再用计算机模拟结果

给予说明.图 9(a)给出了过零 200 点时采用 Griffiths 方法复原光谱的情况.可以看出,这时切趾方法的效果已不明显;图 9(b)给出了采用本文方法切趾干涉图后的复原光谱,切趾的效果仍然是明显的.事实上,采用本文方法获得的复原光谱与双边采样干涉图时的复原光谱基本重合.

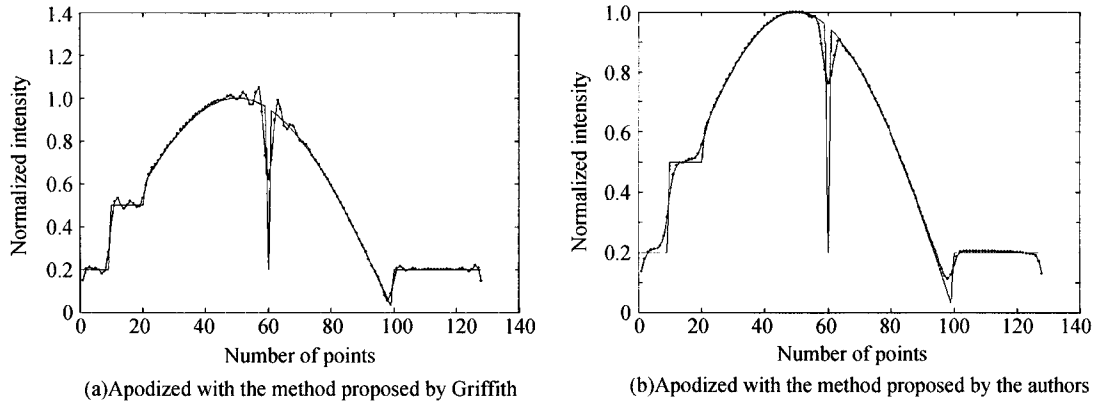


图 9 较大过零量时的复原光谱

Fig. 9 Recovered spectrum with larger number of the short side of the interferogram

3.3 相位误差的修正

讨论零点偏移相位误差的影响时,假设整条干涉曲线偏移了干涉图采样步距的一半.

对相位修正的研究已有很多^[11-13],本文不再赘

述.以下模拟是采用了经典相位修正方法之后的结果.图 10(a)是采用单边干涉图复原的结果,光谱发生了较大的变形;图 10(b)是双边干涉图复原的结果,基本没有变形(可假设为理想结果);图 10(c)

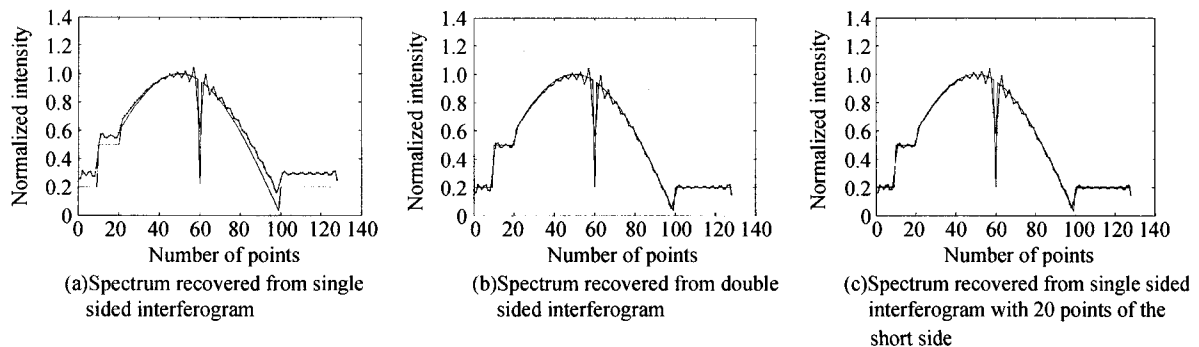


图 10 零点偏移相位误差的影响及修正

Fig. 10 Zero shifting phase error and correction

是采用过零 20 点干涉图复原的结果,基本没有变形.

用标准偏差来定量描述复原光谱的变形情况.

定义

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (B(n) - B'(n))^2}{N-1}} \quad (8)$$

为复原光谱的标准偏差,其中: N 是复原光谱点数, B 是假设的原始光谱, B' 是复原光谱.

图 10(a), (b), (c) 分别对应的标准偏差分别为: $E_1 = 0.0752$ 、 $E_2 = 0.0587$ 、 $E_3 = 0.0578$.以双边采样复原光谱的结果为参照,单边采样、过零采样与双边采样时的标准偏差之差分别为 $\delta E_{12} = 0.0165$ 、 $\delta E_{23} = 0.0009$.显然,过零采样干涉图复原光谱与双边采样干涉图复原光谱更为接近,而此时的数据量

却比双边采样数据量减少将近一倍.

在航天工程应用中,干涉成像光谱仪的数据量较大是一个突出的问题,不少单位在研究相应的数据压缩方法^[14,15],如果在干涉图采样时就考虑到数据量的影响,对后续的数据压缩以及全系统都将是十分有利的.

通过大量的计算机模拟实验发现,当干涉图过零量为最大光程差的 5% 以上时,复原光谱与双边干涉图复原光谱就十分接近了.工程实践中,一般考虑 10% 过零采样,这样,复原光谱的变形可以忽略,干涉图原始数据量仅为双边采样时的 55% 左右.

4 结论

本文对空间调制干涉成像光谱仪不同干涉图采

样方式下的光谱复原问题进行了研究,该研究方法对其它类型的干涉成像光谱仪同样适用.之所以突出“空间调制型”,是考虑到在这种形式中,干涉图的采样间隔是相同的(即为探测器像元尺寸),因此可以忽略采样间隔不均匀性带来的其他问题.同时,本论文研究内容对承担的“环境一号”、“嫦娥一号”星载干涉成像光谱仪具有一定的针对性和指导作用.

本文研究发现,对空间调制干涉成像光谱仪而言,10%以上过零采样足以保证复原光谱的准确性,能够有效修正系统的某些误差.但在使用过零采样干涉图进行数据反演时,存在一些细致的问题,本文通过对加权修正干涉图、切趾方法等的研究,给出了明确的结论.

采用过零采样方式,干涉成像光谱仪的原始数据量与双边采样相比将减少近一半,这对工程应用十分重要.事实上,在仪器方案设计时,应统筹考虑复原光谱理论与有关工程问题.采用双边采样干涉图对复原光谱工作固然理想,但当仪器的分辨率较高、数据量很大时,数据传输将成为一个瓶颈,如使用高比率数据压缩,势必还会引入误差.这时,采用过零采样干涉图就成为一种很好的方案,它能够在保证复原光谱质量的同时,有效降低干涉图原始数据量,减轻系统其它环节的压力,从而从整体上提高仪器的性能.

参考文献

- 1 Hammer P D, Valero F P J, Peterson D L. An imaging interferometer for terrestrial remote sensing. *Proc of SPIE*, 1993, **1937**: 244~255
- 2 Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H. Monolithic Fourier transform imaging spectrometer. *Appl Opt*, 1995, **34** (31): 7228~7230
- 3 Smith W H, Hammer P D. Digital array scanned interferometer: sensors and results. *Appl Opt*, 1996, **35** (16): 2902~2909
- 4 相里斌. 干涉成像光谱技术研究. 博士后研究工作总结报告. 西安:中国科学院西安光机所, 1995. 8~1997. 8
- 5 Xiangli B. Study on the fourier transform imaging spectrometry. Post-doctoral final report. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1995. 8~1997. 8
- 6 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术. *光学学报*, 1998, **18**(1): 16~22
- 7 Xiangli B, Zhao B C, Xue M Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 16~22
- 8 Otten III L J, Butler E W, Rafert J B. The design of an airborne Fourier transform visible hyperspectral imaging system for light aircraft environment remote sensing. *SPIE*, 1995, **2480**: 418
- 9 Otten III L J, Sellar R G, Rafert J B. MightySat II. 1 Fourier transform hyperspectral imager payload performance. *Proc of SPIE*, 1995, **2583**: 566~575
- 10 Xiangli Bin, Gao Zhan, An Baoqing. Static imaging Fourier transform spectrometer. *SPIE*, 1998, **3502**: 30~34
- 11 Griffiths P R. Fourier transform infrared spectrometry. New York: Wiley Interscience Publication, 1986
- 12 Bell R J. Introductory fourier transform spectroscopy. Beijing: Academic Press, 1972
- 13 Connes J. Recherches sur la spectroscopie par transformation de Fourier. *Rev Opt*, 1961, **40**: 40~45
- 14 Mertz L. Auxiliary computation for Fourier spectrometry. *Infrared Phys*, 1967, (7): 17~23
- 15 Forman M L, Steel W H, Vanasse G A. Correction of asymmetric interferograms obtained in fourier spectroscopy. *J Opt Soc Am*, 1966, **56**: 59~63
- 16 Mailjes C, Vermande P, Castanie F. Spectral image compression. *J Optics (Paris)*, 1990, **21**(3): 121~132
- 17 吕群波, 相里斌. 基于分类的干涉光谱图像压缩. *光子学报*, 2004, **33**(6): 681~684
- 18 Lü Q B, Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 681~684

Some Aspects of the Data Processing of the Single Sided Interferogram

Xiangli Bin¹, Yuan Yan²

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

² Beihang University, Beijing 100083

Received date: 2006-08-09

Abstract There are two types of the interferogram of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer (SMIFTS), namely single sided and double sided. In the case of single sided interferogram there are usually a small portion of sampling points around the zero path difference (ZPD) for phase correction. In this paper, some aspects of data processing of the single sided interferogram are discussed in detail including apodization and phase correction. A novel weighting and apodization method is proposed and better recovered spectra are obtained by computer simulation. It is found that under adequate conditions, the reconstructed spectra from single sided interferogram are good enough for application mean while the raw data rate is smaller than double sided sampling.

Keywords Spatially modulated imaging fourier transform spectrometer (SMIFTS); Single sided interferogram; Apodization; Phase correction



Xiangli Bin was born in 1967, graduated from the University of Science and Technology of China in 1990. He received the Ph. D. degree of Optics in 1995. From 1999 to 2005, he was the director of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS and then the director of the Bureau of High Technology Research and Development. His present research activities are on imaging Fourier transform spectroscopy and space optics. He has published more than 110 papers.