

傅里叶变换光谱仪非渐变相位误差的校正方法

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 研究了相位误差起伏性较大、不满足随波数缓慢变化时的干涉型傅里叶变换光谱仪谱线相位误差的校正方法, 根据实序列傅里叶变换的性质和离散傅里叶变换的性质, 将过零单边干涉图采样数据和短双边干涉图采样数据分别作为复数序列的实部和虚部, 组成一组复数序列, 对此复数序列进行一次傅里叶变换, 能够避免当相位误差起伏性较大时, 对相位误差进行多项式拟合带来的较大误差, 可以获得高精度的光谱。研究结果表明, 当相位误差不能满足随波数缓慢变换时, 传统的 Mertz 乘积法不能校正此时的相位误差, 而实验中提出的方法能够校正此类相位误差, 并且获得理想的光谱曲线, 可以广泛地应用到干涉型傅里叶变换光谱仪的光谱反演中。

关键词 傅里叶光学; 傅里叶变换; 相位误差校正; 光谱还原

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s115002

Rapidly Changing Phase Error Correction of Fourier Transform Spectrometer

Zhang Peng Zhang Zhihui

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

Abstract Rapidly changing phase error correction of interferential fourier transform spectrometer is researched. A complex number is reconstructed, which the real part is the data of zero-crossing single sided interferogram and the imaginary part is the data of short double sided interferogram. After once Fourier transform of the reconstructed complex number, the method can avoid the serious error caused by polynomial fitting of phase error as the phase error is rapidly changing. Then the high precision spectrum can be obtained, based on the characters of real number Fourier transform and discrete Fourier transform. The simulation results show that when phase error can't change gradually with wave number, conventional Mertz method can't correct the phase error which is serious, however, the method which is proposed by this paper can correct the phase error, and can gain perfect spectrum. The new method can be widely applied to spectral reducing of interferential Fourier transform spectrometer.

Key words Fourier optics; Fourier transform; phase error correction; spectral reducing

OCIS codes 070.4790; 120.3180; 300.6300

1 引 言

傅里叶变换光谱仪是通过检测干涉信号和对干涉图进行傅里叶变换来测定和研究光谱的仪器, 具有多通道、高通量、高光谱分辨率、高信噪比等独特优点^[1]。理想情况下, 干涉图是关于零光程差对称的, 可以由单边干涉图的傅里叶余弦变换或双边干涉图的傅里叶变换计算得到理想的复原光谱^[2,3]。然而对于实际仪器, 由于光学系统的不对称性、电路

系统产生的相位影响、采样不均匀以及采样位置误差等因素的影响, 在光谱数据中加入了 \sin 分量, 使复原光谱与真实数据之间存在一定的相位误差, 在傅里叶变换光谱仪中必须加以校正^[4]。

经典的相位误差校正方法主要有: Mertz 乘积法^[5-7]和 Forman 卷积法^[4,8]。用 Mertz 乘积法校正相位误差时, 相位误差必须满足随波数缓变的条件; 用 Forman 卷积法校正相位误差时, 当相位误差

收稿日期: 2012-01-04; 收到修改稿日期: 2012-02-22

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金(9140C120313100C12)资助课题。

作者简介: 张 鹏(1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事红外光谱技术方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

较严重时,需要进行多次傅里叶变换和卷积运算,计算量非常大,运算速度慢,不能满足测量的实时性要求。因此,本文根据实序列傅里叶变换的性质和离散傅里叶变换的性质,提出一种新的光谱还原方法,当相位误差较大,不能满足随波数缓变的条件时,此方法能够快速、精确的从非对称性较严重的干涉图反演出光谱,有效减小谱线失真。

2 离散傅里叶变换的性质

设有两组点数都为 N 的实数数据 c 和 d ,将此序列分别作为复数的实部和虚部构成复数序列:

$$t(n) = c(n) + id(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

另设 c 和 d 的傅里叶变换分别为 C 和 D ,则

$$C(k) = \sum_{n=0}^{N-1} c(n)W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$D(k) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n)W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中 $W_N^{nk} = \exp(-j2\pi nk/N)$ 为傅里叶变换的旋转因子。因此, t 的傅里叶变换为

$$T(k) = C(k) + iD(k), \quad (4)$$

又因为 $C^*(-k) = C(k), D^*(-k) = D(k)$, 所以

$$T^*(-k) = C(k) - iD(k). \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可以计算出

$$C(k) = \frac{T(k) + T^*(-k)}{2}, \quad (6)$$

$$D(k) = \frac{T(k) - T^*(-k)}{2i}. \quad (7)$$

根据离散傅里叶变换的定义^[9],可以得知

$$T(-k) = T(N-k). \quad (8)$$

3 相位误差的校正

由于干涉图中心附近的条纹具有很高的信噪比,用此部分计算相位不会引入额外的噪声。因此,干涉图的短双边部分可以用来代替整个干涉图计算相位误差,并用此相位误差来校正光谱。

用 Mertz 乘积法校正光谱的相位误差时,要求相位误差必须满足随波数缓变的条件。否则,反演的光谱图会出现许多附加谱线,引起测量谱线展宽,降低探测灵敏度和波数精度。由于非线性光程扫描等因素造成相位误差随波数跌宕性变化时,就不再满足 Mertz 乘积法校正相位误差的条件。此时,采集到的干涉图的非对称性较严重,如图 1 和图 2 所示。根据 Mertz 计算相位误差的方法,用此短双边干涉图计算出的相位误差谱如图 3 所示。从图 3 中

可以看出,此时相位误差幅度起伏较大,不再随波数缓变,难以用多项式拟合出较精确的高分辨率相位误差谱,从而不能准确地校正由于相位误差产生的光谱畸变。

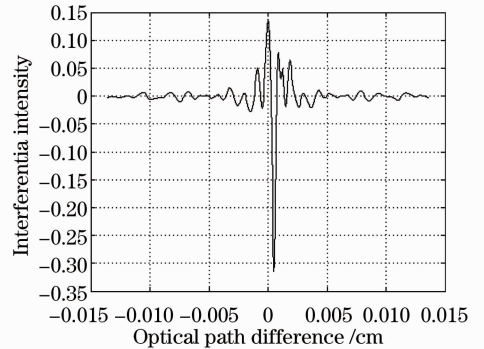


图 1 相位误差较严重时,采集的短双边干涉图
Fig. 1 Short double sided interferogram which contains serious phase error

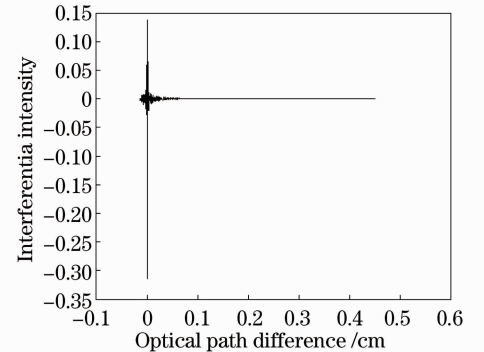


图 2 相位误差较严重时,采集的过零单边干涉图
Fig. 2 Single sided interferogram which contains serious phase error

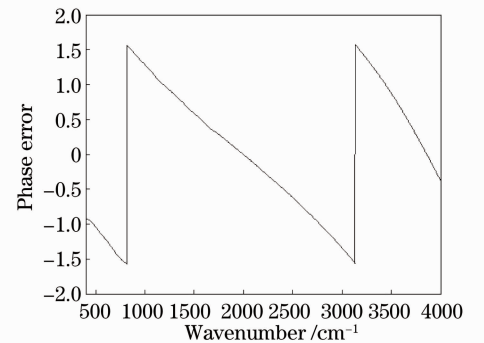


图 3 相位误差
Fig. 3 Phase error

当相位误差不再随波数缓变时,为了减小相位误差对光谱造成的畸变,根据离散傅里叶变换的性质和实序列傅里叶变换的性质,提出基于一次傅里叶变换的快速反演光谱方法,用以校正跌宕性较严重的相位误差。步骤如下:

1) 采集短双边干涉图数据和过零单边干涉图数据,如图 1 和图 2 所示。

2) 以采样间隔 Δt 分别对过零单边干涉图左侧补零和短双边干涉图两侧补零,使过零单边干涉图和短双边干涉图的点数相同并且数据点数关于零光程差对称。

3) 采用文献[10]的方法对过零单边干涉图加权处理,减小短双边部分的数据点被重复使用两次造成的误差。

4) 根据离散傅里叶变换的奇偶对称性^[11],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和快速傅里叶变换,得到复数序列 T 。

5) 根据(6)式和(7)式,将复数序列 T 变换为两个复数序列 C 和 D 。

$$C(k) = \frac{T(k) + T^*(-k)}{2} = a_1(k) + ib_1(k), \quad (9)$$

$$D(k) = \frac{T(k) - T^*(-k)}{2i} = a_2(k) + ib_2(k), \quad (10)$$

式中 $a_1(k)$ 、 $b_1(k)$ 分别是 $C(k)$ 的实部和虚部, $a_2(k)$ 、 $b_2(k)$ 分别是 $D(k)$ 的实部和虚部。则反演的光谱大小为

$$A(k) = \frac{a_1(k) \cdot a_2(k) + b_1(k) \cdot b_2(k)}{\sqrt{a_2^2(k) + b_2^2(k)}}. \quad (11)$$

利用上述方法,可以得到高精度、高分辨率的光谱,如图 4 所示。为了与实验中提出的方法得到的反演光谱做对比,利用 Mertz 乘积法对采集的干涉图反演,获得的光谱如图 5 所示。

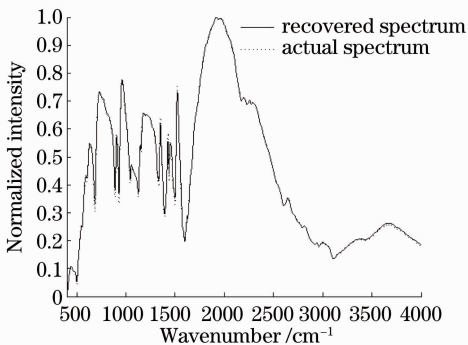


图 4 采用实验中提出的方法获得的还原光谱

Fig. 4 Recovered spectrum based on the method proposed in the experiment

从图 4 和图 5 中可以看出,当代表误差的 \sin 分量远大于代表信号的 \cos 分量时,相位误差随波

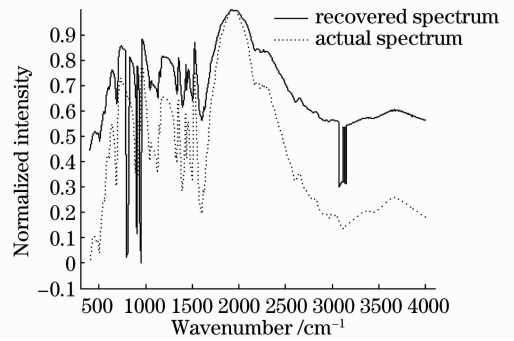


图 5 采用 Mertz 法获得的还原光谱

Fig. 5 Recovered spectrum based on the Mertz method

数的起伏很大,传统的 Mertz 乘积法已经不能反演出准确的光谱,而利用实验中使用的方法,可以获得与实际光谱基本重合的还原光谱,从而证明此方法是可行的。这是因为由短双边干涉图计算的相位误差谱是一个低分辨率的谱,为了校正高分辨率的谱,必须对相位误差谱进行多项式拟合或者插值。当相位误差起伏性较大时,相位误差拟合带来的额外误差也较大,拟合之后的相位误差不能准确地反映整个干涉图的相位误差;而实验中利用插零算法代替插值算法得到高分辨率的相位误差谱,就避免了插值引入的额外误差,因此能够精确地反演出光谱。另外,从图 4 可以看出,在光谱的尖端位置,反演光谱与实际光谱之间的误差相对于光滑波段较大,这是由于文献[10]对过零单边干涉图的加权方法在 \sin 分量较小时,能够较好地减小短双边干涉图的数据被重复使用两次造成的误差;在 \sin 分量较大时,有可能加重干涉图的非对称性,可以进一步研究适合于非对称性较严重的干涉图的加权函数。

4 结 论

实验中对 \sin 分量较大的傅里叶变换光谱仪谱线相位误差的校正方法进行了研究。根据离散傅里叶变换的性质和实序列傅里叶变换的性质,提出基于一次傅里叶变换的快速反演光谱方法,用以校正跌宕性较严重的相位误差,并重构了光谱。研究表明,实验中提出的方法能够准确地反演出高分辨率、高精度的光谱,不仅适用于相位误差较严重的光谱重构,而且也适合相位误差随波数缓变的光谱重构,使用范围更加广泛。

参 考 文 献

- Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin *et al.*. Method of reconstruction on Fourier transform spectroscopy[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(2): 268~272

- 李苏宁, 朱日宏, 李建欣等. 傅里叶干涉成像光谱技术中的重构方法[J]. 应用光学, 2009, **30**(2): 268~272
- 2 A. D. Kersey, A. Dandridge, A. B. Tveten *et al.*. Single-mode fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(11): 463~464
- 3 Peiqian Zhao, J. M. Mariotti, P. Lena *et al.*. Performance analysis of an infrared single-mode all-fiber-optical Fourier transform spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34** (21): 4200~4205
- 4 Sun Yamin, Yin Dekui. An improved algorithm for correction of remote sensin 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
- 5 K. H. Michaelian. Interferogram symmetrization and multiplicative phase correction of rapid-scan and step-scan photoacoustic FT-IR data[J]. *Infrared Phys.*, 1989, **29**(1): 87~100
- 6 Li Zhigang, Wang Shurong, Li Futian. Data processing for interferogram of ultraviolet Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, **20**(2): 203~205
李志刚, 王淑荣, 李福田. 紫外傅里叶变换光谱仪干涉图数据处理[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, **20**(2): 203~205
- 7 Liu Yong, Wu Jiandong, 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
- 8 Michael L. Forman. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(1): 59~63
- 9 J. Kauppinen, J. Partanen. Fourier Transforms in Spectroscopy [M]. New York: Wiley-VCH, 2001. 35~49
- 10 Xiang Libin, 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
- 11 Xing Ting, Wang Mochang, Gong Huixing. 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

栏目编辑: 胡冰