

光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究

刘 勇 巫建东 朱 灵 朱 震 翟玉锋 范彦平

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 光纤傅里叶变换光谱仪(FFTS)干涉图的采样方式一般有两种,即单边采样方式和双边采样方式。详细介绍了在两种不同采样方式下的光谱复原技术,给出了数学表达式和计算过程,比较了两种算法的优缺点,并对单边复原算法进行了改进,提高了使用乘积法进行相位校正的效率。对研究结果进行了实验验证,用两种算法计算得到的复原谱与标准谱线进行比较,二者基本重合,证明了算法的有效性。

关键词 光纤光学;光纤傅里叶变换光谱仪;光纤干涉仪;干涉图;相位校正

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1697

Spectral Recovery in Fiber Fourier Transform Spectrometer

Liu Yong Wu Jiandong Zhu Ling Zhu Zhen Zhai Yufeng Fan Yanping

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract There are two types of sampling to obtain fiber Fourier transform spectrometer (FFTS) interferogram, single-sided sampling and double-sided. The techniques for obtaining recovered spectrum from the two types of interferogram sampling are discussed in detail. The mathematical expressions and calculation procedures are proposed. The advantages and shortcomings of each technique are compared. The single-sided recovery algorithm is ameliorated and the phase correction efficiency is improved. The research results are proved through the experiment. The recovered spectra by two algorithms agree well with the standard spectrum, which proves the methods are effective.

Key words fiber optics; fiber Fourier transform spectrometer; optical-fiber interferometer; interferogram; phase correction

1 引 言

光纤傅里叶变换光谱仪(FFTS)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。与传统的傅里叶光谱仪(FTS)相比,光纤傅里叶变换光谱仪采用全光纤设计,由于没有运动部件,仪器的稳定性大大提高,并且具有信噪比和分辨率高、测量速度快、抗电磁干扰等优点。

理想情况下,干涉图是关于零光程差对称的,光谱可以由双边干涉图的傅里叶变换或者单边干涉图的傅里叶余弦变换计算所得^[1~3],它们均能获得理想的复原谱。但是,在实际中由于中心条纹抽样误差和仪器特性的影响,获得的双边干涉图并不完全对称,单边干涉图也不能准确的从零光程差点开始

采集,因而计算出来的谱存在相位误差^[4],必须进行相位校正。本文对双边采样和单边采样干涉图的光谱复原方法进行了对比研究,通过自行研制的基于Mach-Zehnder结构的光纤傅里叶变换光谱仪进行了光谱测量,获得了较理想的复原光谱。

2 干涉图采样方式

在傅里叶变换光谱学理论中,干涉图采样有两种方式:单边采样和双边采样。双边采样在零光程差点两侧进行采样,可获得理论上对零光程差点对称的双边干涉图。单边采样只在零光程差点一侧进行采样,为了校正相位误差,通常不从零光程差点起采样,而是从负方向 $-L_2$ 点开始,经过零光程差点、

收稿日期: 2008-04-22; **收到修改稿日期**: 2008-09-27

基金项目: 中国科学院创新基金项目(CXJJ-161)和中国科学院合肥研究院院子基金(20020603)资助项目。

作者简介: 刘 勇(1969—),男,副研究员,主要从事光电子技术的研究与应用方面的研究。

+ L_2 点,一直到最大光程差点+ L_1 ($L_2 \ll L_1$)。对应的干涉图如图 1 所示。

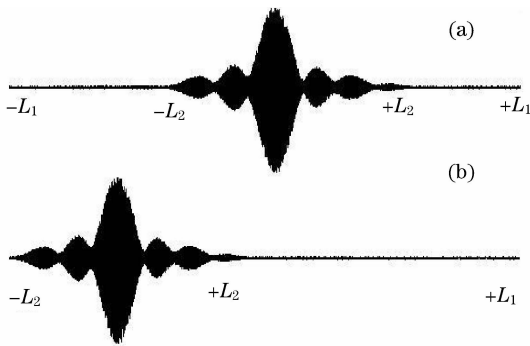


图 1 两种形式的干涉图。(a)双边采样;(b)单边采样

Fig. 1 Two types of interferogram. (a) Double sided sampling; and (b) single sided sampling

两种干涉图的光谱复原表达式为^[4]

双边采样

$$B(\bar{\nu}) = \int_{-L_1}^{L_1} I(\delta) [\exp(-i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\delta; \quad (1)$$

单边采样

$$B(\bar{\nu}) = \int_{-L_2}^{L_1} I(\delta) [\exp(-i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\delta. \quad (2)$$

在没有任何误差的理想情况下,上述两种方法均能获得较准确的复原光谱。但当存在误差时,双边采样方式在计算时能自行进行校正,单边采样方式则需要通过另外的相位校正方法才能得到较正确的复原光谱。

3 光谱复原技术

从实际采样得到的有误差的干涉图中复原光谱需要经过相位修正、切趾、逆傅里叶变换等环节,其中相位校正的好坏是决定复原光谱质量的主要因素,下面先介绍相位误差的来源,然后分别讨论从双边和单边干涉图中进行相位校正得到复原光谱的技术。

由前面讨论知,FFTS 中实际采样得到的干涉图,其相位稳定点往往并不是干涉图的真正的零光程位置,零光程位置存在测量误差。

如果用 β 表示零光程的误差,而用 δ_T 表示真实的光程差,则测量光程差 δ_M 可以表示为

$$\delta_M = \delta_T - \beta. \quad (3)$$

由傅里叶光谱变换基本公式,可得

$$B_1(\bar{\nu}) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta_M) [\exp(-i2\pi\bar{\nu}\delta_T)] d\delta_T. \quad (4)$$

根据相移定理,可得

$$B_1(\bar{\nu}) = \exp(i\varphi(\bar{\nu})) \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta_M) [\exp(-i2\pi\bar{\nu}\delta_M)] d\delta_M = B_0(\bar{\nu}) \exp[i\varphi(\bar{\nu})], \quad (5)$$

其中 $\varphi(\bar{\nu}) = -2\pi\bar{\nu}\beta$,由此可见,零光程测量误差引起谱的相位发生变化,因此把这种误差叫做相位误差。

3.1 从双边干涉图复原光谱

在双边干涉图情况下,如果计算(5)式的幅度谱,则变成

$$B_c(\bar{\nu}) = |B_1(\bar{\nu})| = [B_1(\bar{\nu})B_1^*(\bar{\nu})]^{\frac{1}{2}} = [P_1^2(\bar{\nu}) + Q_1^2(\bar{\nu})]^{\frac{1}{2}} = B_0(\bar{\nu}), \quad (6)$$

其中 $P_1(\bar{\nu})$ 和 $Q_1(\bar{\nu})$ 分别是(5)式傅里叶变换的实部和虚部。比较(5)式和(6)式,很容易发现,实际的谱 $B_0(\bar{\nu})$ 是计算的谱 $B_1(\bar{\nu})$ 的实部和虚部的平方和,结果和零光程的测量误差 β 无关。因此,采用双边干涉图进行光谱计算时,因存在相位误差,使得用(5)式计算出的光谱虚部不为零,这时候用求模的方法即可校正相位误差,获得复原光谱。这种方法不需要对干涉图的零光程差点精确定位,不需要再单独进行相位校正就能获得较好的复原光谱。

图 2 中实线为光栅光谱仪测量得到的光源的谱分布,虚线为在相同条件下 FFTS 所测得的双边干涉图复原光谱,比较后发现,二者几乎完全重合,证明了双边法的有效性。但从图中也可以看出,在双边法计算得到的谱中,噪声总是正的。事实上,用这种方法计算出来的噪声不再是常数,而是随着信号的减小而增加。

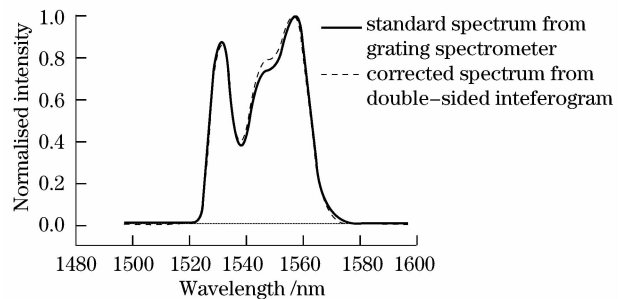


图 2 光谱比较

Fig. 2 Comparison of the spectrum

3.2 从单边干涉图复原光谱

在傅里叶变换光谱仪中,为了提高分辨率、降低数据量和运算量,常采用单边干涉图进行光谱计算,单边干涉图的相位误差不能用求模方法自动消除。在传统的 FTS 中,主要的相位误差校正方法有:乘

积法和卷积法^[5~8]。乘积法在频域内完成相位校正,而卷积法在时域内完成相位校正。乘积法虽然在复原的光谱中存在较大的残余误差,但是乘积法计算速度快、实时性好,所以仍然广泛应用于 FTS 中,因此还利用乘积法介绍从单边干涉图中进行光谱复原的计算。

由(5)式可得

$$B_1(\bar{\nu}) = B(\bar{\nu}) \exp[i\varphi(\bar{\nu})] = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta) \exp(-i2\pi\bar{\nu}\delta) d\delta = m_r(\bar{\nu}) + im_i(\bar{\nu}), \quad (7)$$

其中 $m_r(\bar{\nu})$ 、 $m_i(\bar{\nu})$ 分别是 $B_1(\bar{\nu})$ 的实部和虚部。

相位误差 $\varphi(\bar{\nu})$ 也可以从(7)式中得到

$$\varphi(\bar{\nu}) = \arctan[m_i(\bar{\nu})/m_r(\bar{\nu})]. \quad (8)$$

由于 $B(\bar{\nu})$ 是实数,复原光谱可由下式得到

$$B(\bar{\nu}) = \operatorname{Re}\{B_1(\bar{\nu})\exp(-i\varphi(\bar{\nu}))\} = \operatorname{Re}[B_1(\bar{\nu})]\cos\varphi(\bar{\nu}) + \operatorname{Im}[B_1(\bar{\nu})]\sin\varphi(\bar{\nu}). \quad (9)$$

由(9)式可看出,只要计算出相位误差,则复原光谱可由上式得到。在 FTS 系统中,抽样偏心和光纤色散等所造成的相位误差是随波长缓慢变化的,因此可通过一段短的双边干涉图计算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得到相位校正后的复原光谱。

传统的插值方法是逐点进行多项式插值,此方法的缺点是计算速度慢,这里采用对干涉数据补零扩展后作离散傅里叶变换的方法可大大提高插值效率^[9]。依据离散傅里叶变换性质,对数据序列补零扩展后,其傅里叶变换的谱型不变,只是在中间点进行了 sinc 函数插值^[10]。因此可在短双边干涉数据后面补零,使它与单边干涉图数据相等,这样计算出来的相位误差就是已经经过插值的,可直接与单边干涉图的相位谱相减。

图 3 为从短双边干涉图中计算出的相位误差的正弦和余弦曲线,参考光用中心波长为 1550 nm 的分布反馈式激光二极管(LD)光源,测试光用的是 ASE 光源。图 3(a)为采集到的整个单边干涉图,(b)为截取的短双边干涉图,这里取 4096 个点,根据上面提到的插值方法,将短双边干涉图补零,使之与单边干涉图的数据量相等,作快速傅里叶变换得到相位误差,图(c)和(d)分别是相位误差的正弦和余弦曲线,这里只取了 ASE 光谱范围的部分(1520~1570 nm),从图中可以看出,相位误差是随波长缓慢变化的函数,因此可以证明用低分辨率的相位误差插值得到高分辨率的相位误差的方法是可行的。

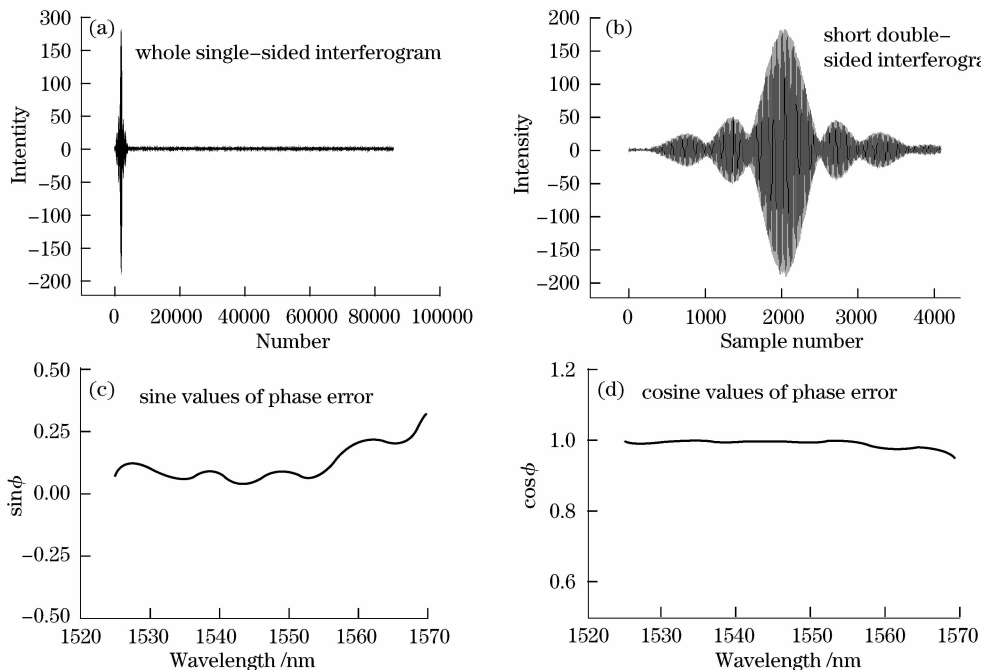


图 3 从短双边干涉图得到相位误差的正弦和余弦曲线

Fig. 3 Sine and cosine curve of phase error deriving from short double-sided interferogram

图 4 为将从单边干涉图中直接计算所得谱(虚线)和乘积法相位校正后的谱(实线)进行比较,虚线

中存在明显的畸变,在 1520 nm 的附近谱线强度出现负值,这种畸变是由相位误差引起的。实线是经

过相位校正后的谱线,发现谱线的畸变消除了,谱线的负值部分也被校正了,在低强度信号的部分负值是由于噪声的正负随机变化引起的,这说明经过乘积法校正后,相位误差被明显的消除了。而且与双边干涉图得到的谱相比,单边干涉图相位校正后谱线的噪声是正负随机变化的,谱线细节也更明显,因此具有更高的光谱分辨率。

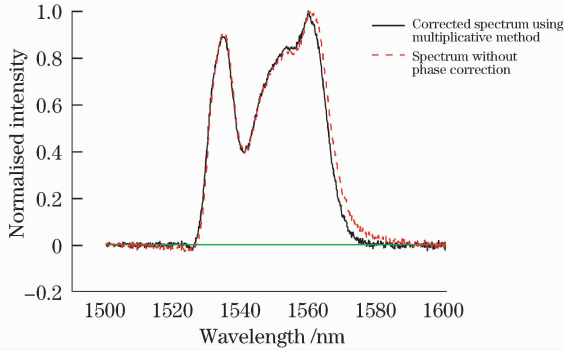


图 4 光谱比较

Fig. 4 Comparison of the spectrum

4 结 论

对光纤傅里叶变换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,研究表明,用双边干涉图计算法和单边干涉图相位校正法均能获得较好的复原光谱。双边干涉图计算法的主要优点是采用求模方法复原光谱,在计算过程中就已经消除了相位误差,不需要对数据进行额外的相位校正。但双边干涉图法有两个缺点:(1)双边干涉图的数据量大,要达到与单边干涉图同样的分辨率,数据量要增加一倍;(2)在计算得到的谱中,噪声不再是常数,而是随着信号的减小而增加,而且总是正的。对于单边干涉图,由于存在相位误差,直接计算的谱线将产生畸变,而乘积法是在频域内对相位误差进行校正比较有效的方法,在 FFTS 系统中相位误差随波长缓慢变化的,因此可以用短双边干涉图的傅里叶变换得到相位误差,用低分辨率的相位误差经过插值后去校正高分辨率谱中的相位误差。单边干涉图计算法的优点是相同的分辨率下,需要的数据量和运算量只有双边法的一半,且谱线噪声随机正负变化。

在仪器的方案设计时,针对不同的实际情况,可以采用不同的光谱复原方法。在干涉图信噪比较高,对计算实时性要求不高的情况下,使用双边干涉图算法可以获得很理想的复原谱。但当仪器的分辨率要求较高时,数据量很大,计算的实时性将受到影响,这时,采用单边干涉图就成为很好的方案,它能够在保证光谱复原质量的情况下,有效降低干涉图数据量,减轻存储和运算的压力,获得高分辨率的光谱。

参 考 文 献

- 1 Kersey A. D., Dandridge A., Tveten A. B. *et al.*. Single-mode fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(11): 463~464
- 2 Zhao Peiqian, Mariotti J. M., Lena P. *et al.*. Performance analysis of an infrared single-mode all-fiber-optical Fourier transform spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4200~4205
- 3 Liu Yong, Li Baosheng, Liu Yan *et al.*. Optical fiber Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(10): 1951~1954
刘 勇,李保生,刘 艳 等. 光纤傅里叶光谱变换光谱分析装置[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(10): 1951~1954
- 4 Bell R. J.. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*[M]. New York: Academic Press, 1972.
- 5 Mertz L.. Auxiliary computation for Fourier spectrometry[J]. *Infrared Phys.*, 1967, **7**(1): 17~20
- 6 Forman M. L., Stell W. H., Vanasse G.. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(1): 59~62
- 7 Li Baosheng, Liu Yong, Wang An. Phase error correction by multiplicative method in optical fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2007, **24**(3): 300~305
李保生,刘 勇,王 安. 光纤傅里叶变换光谱仪中谱线相位误差的乘积法校正[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(3): 300~305
- 8 Li Baosheng, Liu Yong, Wang An. Processing of Interferogram Symmetrization in Optical Fiber Fourier Spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(6): 1077~1080
李保生,刘 勇,王 安. 光纤傅里叶变换光谱仪干涉图的对称化处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(6): 1077~1080
- 9 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
- 10 Hu Guangshu. *Digital Signal Porcessing* [M]. Bei jing: Tsinghua Press, 2003, 137~138
胡广书. *数字信号处理*[M]. 北京:清华大学出版社, 2003, 137~138