

光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法

李保生¹, 刘勇², 王安²

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:提出了一种干涉图均匀抽样的新方法. 采用高速数据采集卡同时采样参考光信号和测试光信号, 依据参考光信号与采样点数和测试光信号与采样点数的关系对测试光信号重新抽样得到等光程间隔采样的干涉图. 数值仿真和实验研究表明:干涉图均匀抽样法实现了光纤傅里叶变换光谱仪干涉图的等间隔采样, 消除了附加的谱线可用于傅里叶变换光谱仪的采样系统中, 尤其是在短波段干涉光谱仪中有很强的优势.

关键词:傅里叶变换光谱; 光纤干涉仪; 等间隔采样

中图分类号:TH744.12+3 **文献标识码:**A

UNIFORM SAMPLING METHOD OF OPTICAL FIBER FOURIER TRANSFORM SPECTROMETER

LI Bao-Sheng^{1,3}, LIU Yong², WANG An²

(1. School of Instrument Science and Opt-electric Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Equal interval sampling of interferogram is realized by a novel uniform sampling method in optical fiber Fourier spectrometer (FFTS). The reference beam and test beam are simultaneously over-sampled. The Interferogram of test beam versus optical path difference is obtained by the relation of sample time versus fringes number and that of interference fringes of test beam versus sample time. Simulation calculation and experimental studies show that the method is effective for eliminating unequal interval sample and many affixation spectra lines. The method can be used in the sample systems not only in FFTS, but also in conventional Fourier spectrometer. Specially, it can also play a significant role in short wavelength Fourier spectroscopy than other methods.

Key words: Fourier transforms spectroscopy; optical fiber interferometer; equal interval

引言

自从傅里叶变换光谱仪出现以来, 抽样问题就受到广泛的关注^[1-3]. 动镜移动速度的均匀性、方向的准直性会导致抽样的干涉图对称、在中心条纹处抽样问题、不均匀性问题^[1-4]. 关于干涉图对称、在中心条纹处抽样问题通过相位误差校正方法来解决, 而抽样的均匀性常用参考光条纹过零点触发抽样得到^[1].

第一台光纤傅里叶变换光谱仪(FFTS)是1985年由A. D. Kersey等率先建立的^[5]. 光纤器件代替了传统光学器件, 利用温度或者压电效应改变光纤的长度代替了动镜的移动实现光程差的扫描, 降低

了机械、光学加工要求. 利用压电效应产生光程差的方法是把光纤绕在一个压电陶瓷上, 利用压电陶瓷伸缩特性可以拉伸光纤. 由于压电陶瓷的迟滞回线、蠕变、非线性等问题导致直接采样得到的干涉信号是等时间间隔采样, 而不是等光程间隔采样, 造成干涉信号的相位调制. 根据光程差和波数的倒数关系, 利用不等光程间隔采样的干涉图恢复的光谱会产生许多附加谱线, 引起测量谱线展宽, 降低了探测灵敏度, 降低了波数精度.

为了得到高精度的光谱, 必须进行等光程间隔抽样. 在传统的傅里叶变换光谱中, 采用He-Ne激光产生的干涉信号进行等光程间隔抽样^[2]. 一般采用电路方法实现, 用参考光源产生的干涉图消除直

分量后过零点触发采样得到均匀抽样干涉图^[1-3]. 这种方法过多依赖硬件实现, 不灵活, 不易扩展. 使用 He-Ne 激光作为参考光源, 在可见、紫外这种采样间隔是不够的. 另一种方法是 Brault 方法^[6], 采用硬件计数器将参考光干涉电转化成采样时间和条纹个数的关系 $t(x_n)$, 然后同时采样 $t(x_n)$ 和测试光源的干涉信号, 用自适应滤波算法实现等光程差间隔抽样. 这种方法需要额外的计数器, 精度高, 但实现成本较高、且较复杂. 在光纤傅里叶变换光谱中, 有时需要分析温度、压力等外界因素的影响, 需要较高的采样频率以保持干涉图中这些信息来分析 FFTS 的特性. 国内至今没有有关光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样分析和方法方面的相关报道.

本文在 Brault 方法的基础上提出了均匀抽样的新方法, 采用高速数据采集卡同时采样参考光信号和测试光信号, 依据参考光信号与采样点数和测试光信号与采样点数的关系重新抽样得到均匀抽样的干涉图. 该方法精度高、误差小、且对噪声不敏感.

1 均匀抽样方法

在连续扫描的光纤傅里叶变换光谱仪中, 均匀抽样问题实际上可以归纳为两个问题: 什么时候抽样和怎样抽样的问题. 什么时候抽样实际上要精确、快速的确定出等光程间隔的位置. 怎样抽样的问题是根据等光程间隔的位置, 对测试光干涉图的均匀抽样. 抽样表达式如下^[6]:

$$I_i = I[x_i(t)]$$

上式表示测试光干涉图第 i 个抽样点的光强等于在参考光干涉条纹 x_i 的采样时间 $t(x_i)$ 时采样的测试光强度.

采用高速 A-D 转换卡对参考光和测试光的干涉信号同步采样分别得到 $I_{ref}(t_n)$ 和 $I_{tes}(t_n)$, 其中 n 为采样个数. 为了得到测试光的强度随光程等间隔抽样的干涉图 $I_{tes}(x_n)$, 先要从 $I_{ref}(t_n)$ 获得采样时间和干涉条纹个数的关系 $t(x_n)$. 这里采用参考光条纹 $I_{ref}(t_n)$ 过零点取样, 即在参考光条纹的每个过零点记录采样时间 (实际上是记录采样点序号, 因为采样时间间隔恒定), 形成了条纹数 (这里条纹数是分数) 和采样时间的对应关系 $t(x_n)$. 这里的过零点是由零点附近的点线性插值确定.

对于测试光干涉信号 $I_{tes}(t_n)$, 它实际上是一个光强随时间 (采样时间) 变化的关系. 结合 $I_{tes}(t_n)$ 和 $t(x_n)$, 就可以得到光强相对于光程差扫描的等间隔

抽样干涉图 $I_{tes}(x_n)$. 这里从采样时间的出发, 针对每个采样时间在 $t(x_n)$ 查找对应采样时间的干涉条纹数来建立条纹数和测试光强度的关系; 也可从每个条纹出发, 针对每个条纹, 由 $t(x_n)$ 得到取样时间, 根据取样时间从 $I_{tes}(t_n)$ 中得到强度值, 正确的插值方法可以减少光强的抽样误差. 在本文中 $t(x_n)$ 分割以及从 $I_{tes}(t_n)$ 抽样 $I_{tes}(x_n)$ 时均采用三阶多项式插值.

2 数值仿真

为了验证上面的均匀抽样方法, 仿真了光纤傅里叶变换光谱仪产生的干涉图. 需要指出的是, 以下所有的谱计算采用了双边干涉图的三角切趾, 这里计算出的谱线强度值没有实际意义. 下面从这个干涉图出发展开讨论, 考虑以下几种情况:

2.1 理想情况下的均匀抽样

仿真了两个通道参考光和测试光的理想干涉信号, 比较了重新抽样 (用均匀抽样方法抽样) 前后的干涉图及谱. 比较干涉图发现, 抽样算法前后基本一致. 经过重新抽样前后, 谱线峰值强度误差很小. 由于在两种情况下采用不同的采样间隔, 谱线的强度没有实际意义, 且这种误差对光谱测量不会造成影响. 从重新抽样前后的相位误差来看, 两种情况下的曲线是基本平行的, 干涉图基本上保持了原有的对称性. 由于重新抽样会产生很小的误差, 导致正弦分量不为零, 相位是常数且不依赖于波数, 不影响光谱的测量.

2.2 非线性光程扫描情况下均匀抽样

光纤傅里叶变换光谱中, 光程差的扫描一般是由压电陶瓷拉伸光纤产生的. 但是由于压电迟滞回线的存在, 会导致光程差随扫描时间变化不是线性的. 这里采用均匀抽样算法可以消除这种非线性效应.

假设光程差随压电陶瓷位移而线性变化, 忽略其他的因素影响, 仅考虑压电陶瓷的电压位移曲线的非线性影响. 这里采用压电微位移器拉伸光纤, 采用了以下条件: 压电陶瓷的电压扫描从 0 ~ 200V, 变化范围从 2.6 ~ 64.0 μm . 根据以上条件仿真得到的干涉图, 干涉条纹的疏密变化, 实际上发生了频率调制, 引起被测谱线附近出现一系列附加的谱线, 导致被测谱线出现扩展, 被测谱线的强度值下降, 测量灵敏度降低. 用均匀抽样方法重新抽样后的干涉条纹疏密近似不变, 频率调制被消除了. 从幅度谱来看, 图 1(a) 中 A 是未进行均匀抽样的干涉图计算得到

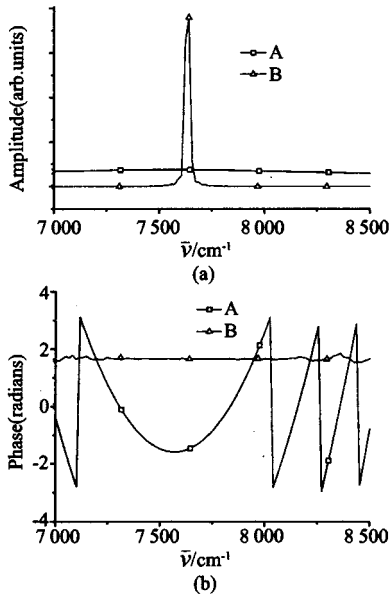


图1 考虑压电陶瓷非线性的谱比较。(a) 幅度谱,图中 A 为等间隔抽样前,B 为等间隔抽样后;(a) 相位谱,图中 A 为等间隔抽样前,B 为等间隔抽样后(图中谱强度是任意单位)

Fig.1 Spectra contrast with the nonlinear of the piezoelectric element. (a) amplitude spectra, A, before resampling; B, after resampling; (b) phase spectra, A, before resampling; B, after resampling (intensity unit is arbitrary in this figure)

的幅度谱,图 1(a)中 B 是均匀抽样后的干涉图计算得到的幅度谱.比较图 1 中的两条谱线发现,经过均匀抽样算法后,谱线的扩展被消除了,附加的谱线也被消除了.从相位谱来看,图 1(b)中 A 是未采用均匀抽样算法的相位谱,B 是采用均匀抽样算法处理后的相位谱.从图 1(b)中 A 可以看出,压电陶瓷的非线性造成的干涉图的不对称性是比较显著的,相位误差是波数的函数.比较图 1(b)中 A 和 B 不难发现,经过均匀抽样算法处理后,相位调制被消除了,相位误差对波数的依赖性被消除了.

2.3 存在白噪声情况下的均匀抽样

为了研究白噪声对均匀抽样算法的影响,在仿真的干涉图中加入白噪声.图 2(a)中 A 和 B 是均匀抽样前后的幅度谱.图 2(b)中 A 和 B 是均匀抽样前后的相位谱.在图 2(a)中,比较 A 和 B 不难看出,在受白噪声影响的情况下经过均匀抽样算法的干涉图消除了压电陶瓷的非线性影响.且噪声对幅度谱的影响不大,谱线的扩展和不对称性也被消除了如图 2(a).从图 2(b)中 B 可以看出,在高信噪比区域相位谱是常数,同时在弱信号区域的相位随机起伏.根据 L. Mertz 关于傅里叶变换中的相位谱的讨论^[7],在强信号情况下,代表误差分量的正弦分量远远小于表示信号分量的余弦分量,所以在强信

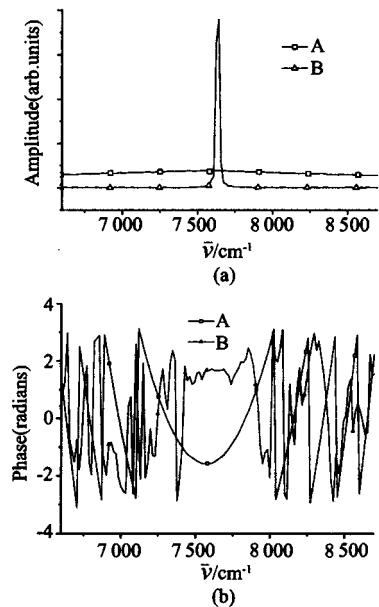


图2 考虑压电陶瓷非线性和白噪声的谱比较。(a) 幅度谱,图中 A 等间隔抽样前,B 为等间隔抽样后;(a) 相位谱,图中 A 等间隔抽样前,B 为等间隔抽样后(图中谱强度是任意单位)

Fig.2 Spectra contrast with nonlinear of piezoelectric element and white noise of detector. (a) amplitude spectra, A, before resampling; B, after resampling; (b) phase spectra, A, before resampling; B, after resampling (intensity unit is arbitrary in this figure)

号区域相位谱受白噪声影响很小,近似是常数.而在弱信号区域,代表误差的正弦分量基本相当表示信号的余弦分量,因此相位起伏不大.而在无信号区域,误差分量远大于信号分量,因此相位起伏很大.因此,在存在白噪声的情况下,由压电陶瓷引起的干涉图频率调制和谱线扩展消除了.在实际的 FTIS 系统中,白噪声可以用滤波处理来抑制.

上面的研究表明,在理想情况下比较未采用和采用均匀抽样算法情况下,不难发现均匀抽样引起的误差很小且和波数无关,不影响光谱的测量.在压电陶瓷非线性存在的情况下以及压电陶瓷非线性和白噪声同时存在情况下,经过抽样算法处理后,附加的谱线和谱线的展宽被消除了,由压电陶瓷的非线性导致干涉图的不对称性也被消除了,二者的谱线基本上重合,说明了均匀抽样算法对白噪声不敏感.因此均匀抽样方法有效地实现了等间隔抽样,具有误差小、灵活、方便、容易扩展到短波段,且对白噪声不敏感.

3 实验处理

图 3(a) ~ (b) 是由以 He-Ne 为参考光和

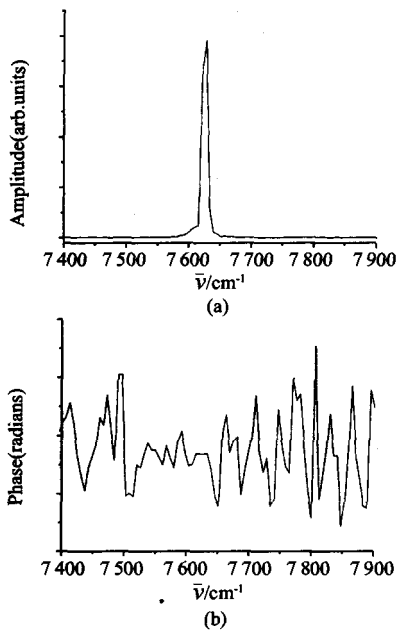


图3 实验得到的谱。(a)幅度谱;(b)相位谱(图中谱强度是任意单位)

Fig. 3 Experimental spectra. (a) amplitude spectra; (b) phase spectra (an intensity unit is arbitrary in this figure)

1. $305\mu\text{m}$ (波数为 7662.8cm^{-1}) DFB LD 为测试光时光纤傅立叶变换光谱仪经过三角切趾后计算得到的幅度谱和相位谱. 该光谱仪的理论光谱分辨率约为 7cm^{-1} , 而半导体激光器的有很小的线宽, 所以谱线的线宽是由仪器特征谱线决定的. 谱线的峰值在 7627.8cm^{-1} 附近, 波数发生了偏移, 主要是光纤的色散引起的. 在光纤色散的一阶近似条件下, 色散对光谱产生的效果实际上是谱线发生了偏移^[8]. 从图 3(a) 中可以看出, 附加的谱线和谱线的扩展被消除了. 从图 3(b) 中可以看出, 在高信噪比区域, 也就是幅度谱的峰值 7627.8cm^{-1} 相位谱是常数, 而在远离这个波数的区域, 相位随机起伏. 在强信号区域, 经过傅里叶变换后代表信号的余弦分量远大于正弦分量(表示相位误差), 相位误差不依赖于波数. 在弱信号区域, 两个分量大体相当, 相位起伏较小, 而在无信号区域, 则余弦分量远小于正弦分量则相位出现较大起伏. 因此, 均匀抽样方法消除了由压电陶瓷

的非线性造成的干涉图的不对称性, 附加谱线和谱线的展宽也被消除了, 进一步说明了均匀抽样算法的有效性.

4 结论

用不等间隔采样的干涉图恢复的谱会产生许多附加的谱线, 导致测量谱线展宽, 引起谱线畸变, 降低了探测灵敏度和波数精度. 均匀抽样算法是一种有效的等间隔抽样方法, 消除了不等间隔采样引起的谱线畸变和干涉图不对称. 数值仿真和实验研究表明, 均匀抽样方法有效地抑制了附加谱线和谱线扩展以及干涉图的不对称性. 和其它方法相比, 该方法灵活性高、稳定性好、实现相对容易实现、抽样精度高, 不仅用于光纤傅里叶光谱仪中的均匀抽样, 而且可以推广到传统的傅里叶光谱仪中. 在短波光学中通过提高条纹分割间隔数来提高均匀抽样频率有很明显的优势.

REFERENCES

- [1] Mertz L. Auxiliary computation for Fourier spectrometer [J]. *Infrared Phys.*, 1967, 7(1): 17—23.
- [2] Griffiths P R. *Chemical infrared Fourier transform spectroscopy* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1975.
- [3] Minami K, Kawata S, Minami S. Zero-crossing sampling of Fourier-transform interferograms and spectrum reconstruction using the real-zero interpolation method [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(29): 6322—6328.
- [4] Zhou Yan, Deng Zhang-Chao, Yi Jiang, et al. Design and application of reflecting FIR interferometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周艳, 邓中朝, 易江, 等. 内壁反射式远红外激光干涉仪的设计和应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 265—268.
- [5] Kersey A D, Dandridge A, Tveten A B, et al. Single-mode fiber Fourier transform spectrometer [J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(11): 463—464.
- [6] Brault James W. New approaches to high-precision Fourier transform spectrometer design [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(16): 2893—2896.
- [7] Mertz L. *Transformations in Optics* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1965.
- [8] Zhao P, Mariotti J M, Lena P, et al. Performance analysis of an infrared single-mode all-fiber-optic Fourier-transform spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4200—4209.