

文章编号 1004-924X(2007)01-0016-06

# 光纤傅里叶变换光谱仪采样系统

李保生<sup>1</sup>, 刘 勇<sup>2</sup>, 于清华<sup>2</sup>, 王 安<sup>2</sup>

- (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:**提出了一种用于连续扫描光纤傅里叶变换光谱仪(FFTS)的干涉图采样系统,将激光干涉信号用 Hilbert 变换产生正交信号,由于相位反转点的存在,导致 Hilbert 变换产生的信号出现畸变,对变换结果进行了修正。该信号和原信号成为两个互相正交信号,利用这两个信号整形后的相位关系可得到光程扫描的起始点和光程扫描的方向。根据光程扫描的起始点和方向选择可上升沿部分的参考光和测试光干涉信号,用改进的 Brault 算法重新得到等光程间隔抽样的干涉图。该设计方法可以用 DSP 技术实现简单、紧凑型的采样系统,不仅可提高 FFTS 的信噪比,还可以推广到传统的傅里叶光谱仪中。

**关键词:**采样系统;光纤傅里叶光谱仪;激光干涉

**中图分类号:**TH744.3 **文献标识码:**A

## Sampling system of optical fiber Fourier transform spectrometer

LI Bao-sheng<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, YU Qing-hua, WANG An<sup>2</sup>

- (1. College of Instrument Science and Optical & Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A novel design applying to sample system of optical Fiber Fourier Transform Spectrometer (FFTS) was proposed. Two quadrature signals, one of which comes from laser interference with Hilbert transform of another with correction after phase inversing, were generated. Using phase relation of two square waves, the initial position and the direction of OPD scanning were determined. These parameters was used to decide the portion of up-scanning of interference and test beam to obtain the uniform interval interferogram with similar Brault algorithm. A compact and simple sample system would be designed by DSP for further practice. The designing method not only can be applied to the FFTS, but also can be generalized to conventional Fourier transform spectrometer.

**Key words:** sampling system; Fiber Fourier Transform Spectrometer(FFTS); laser interference

收稿日期:2006-02-23;修订日期:2006-08-14.

基金项目:中国科学院科技创新基金资助项目(No. CXXJJ-161);中国科学院合肥研究院基金及创新科研专题资助项目(No. 20020603)

## 1 引言

光纤傅里叶变换光谱仪(FFTS)是利用光纤干涉仪将各种不同频率的光调制成余弦信号,这些余弦信号迭加后形成的干涉图经过傅里叶逆变换得到光谱。与传统的傅里叶变换光谱仪不同的是,FFT S采用全光纤器件组成。由于计算机只能对数字化的干涉图进行傅里叶变换。因此,需要对实测的干涉图进行控制测量和数据采集。经典的傅里叶变换光谱仪通常用主干涉仪和辅助干涉仪完成复杂的数据采集工作。数据采集过程既要保证等间隔采样,又要保证各次扫描的干涉图都从同一起点开始采集。一方面为了提高测量数据的重复度和精度;另一方面,在弱信号探测中,由于信号很弱,信噪比很低,可以通过严格地控制光程采样周期,进行多周期的平均,提高信噪比<sup>[1,2]</sup>。白光干涉仪是最早使用的一种方法。一般的干涉仪都是单向扫描收集数据,扫描一次后动镜回到原处再开始第二次扫描,为了准确地定出采样起始点,需要白光干涉仪,以便使每次采样都从同一起点开始,多次重复扫描累加时,各次数据能吻合。白光是一复合光,只有在干涉仪零光程差处才出现尖锐的干涉图,为了保证红外干涉仪和白光干涉仪具有同一零光程差点,干涉仪系统的装配和调整都须十分精确。灵敏的白光干涉信号一旦漂移,调整起来十分困难。此外,一个白光干涉仪仅仅能给定一个确定的零光程差位置,限制了干涉仪系统的灵活使用。同时这套白光干涉仪系统使仪器复杂,造价增高,并给使用带来很多麻烦。故近年各厂家都采用其它技术代替白光干涉仪,其中比较成熟的方法是激光回相扫描法和可逆计数法<sup>[3]</sup>。

1989年日本 NTT 光电实验室的 Kazumasa Takada 等人提出了一种方法。该方法把激光的干涉条纹用偏振分束镜产生两路相位差为  $90^\circ$  的信号,经过复杂的电路处理,完成了  $\lambda/8$  的硬件过零触发采样,并且利用可逆计数器实现了光程差位置确定和扫描方向鉴别,实现了对大规模集成电路动态随机内存垂直电容器存贮器单元深度测量<sup>[4]</sup>。1990年该方法成功应用于光纤傅里叶变换光谱仪中确定干涉图扫描光程的初始位置,实现了多次扫描干涉图对应位置的多次平均,提高

了 FFTS 的信噪比<sup>[5,6]</sup>。

在连续扫描 FFTS 系统中,实现单向的扫描过程的采样,需要复杂的电路设计。本文设计了一种 FFTS 数据采样系统,不仅实现了等间隔采样,而且确定了光程扫描的采样起始点。在采样系统中使用了以下新方法:(1)只用一路激光干涉信号采用 Hilbert 变换产生和原信号相位相差为  $90^\circ$  的信号,形成两路正交的信号;(2)采用改进型的 Brault 算法<sup>[8]</sup>实现了等间隔采样。和其它方法相比,这种方法简化了光路,减少了采样通道数,将原来需要由光路和电路完成的部分功能改用算法实现,便于 DSP 芯片的快速处理,降低了电路设计的难度。

## 2 采样系统基本原理

### 2.1 Hilbert 变换原理

Hilbert 变换能巧妙地将信号移相  $-90^\circ$ ,并且保持信号的幅值不变,因此可以利用 Hilbert 变换将激光干涉余弦信号转化成一个正弦信号,如图 1 所示。

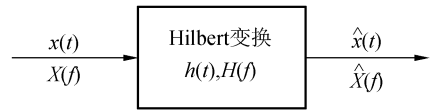


图 1 Hilbert 变换原理图

Fig. 1 Graph of Hilbert transform

给定一连续信号  $x(t)$ ,其 Hilbert 变换  $\hat{x}(t)$  定义为<sup>[9]</sup>:

$$\hat{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = h(t) * x(t), \quad (1)$$

其中  $h(t) = \frac{1}{t-\tau}$  与 Hilbert 变换的时间脉冲相应,写成频域表达式:

$$H(f) = \begin{cases} -j & f > 0 \\ j & f < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

将式(1)写成频域表达式:

$$\hat{X}(f) = H(f)X(f), \quad (3)$$

从式(1)、(2)、(3)不难看出,该变换的实质是将信号正频率分量的相位移动  $-90^\circ$ ,而将负频率分量的相位移动  $90^\circ$ 。如果  $x(t) = \cos(2\pi ft)$ ,则  $\hat{x}(t) = \sin(2\pi ft)$ 。因此余弦函数和正弦函数组

成一对 Hilbert 变换对。激光干涉信号(去除直流成分)是一个余弦函数,可以通过 Hilbert 变换得到其正交信号正弦分量。

## 2.2 改进型 Brault 算法

由于压电陶瓷的非线性效应以及干涉仪对温度、压力的敏感性,探测器探测到的信号是等时间间隔采样,而不是等光程差间隔采样。根据光程差和波数的倒数数学关系,不等光程差间隔采样会造成恢复的光谱产生许多附加的谱线,导致谱线产生畸变。光程差测量越准确,恢复谱的波数精度就越高。为了保证高波数精度,必须对测试光源干涉图等光程间隔采样。等光程间隔采样一般有两种做法:参考光干涉条纹过零点触发采样<sup>[7,8]</sup>;另外一种就是 Brault<sup>[9]</sup>方法,把参考光和测试光源的数据同时采样,然后用数字滤波算法实现等光程差间隔重新抽样处理。第一种方法过多依赖硬件,比较复杂。本文设计中采用了第二种方法,并进行了改进。采用高速数据采集卡同时对参考光和测试光进行,用函数插值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均匀抽样的干涉图。

## 3 采样系统设计

图 2 是 FFTS 采样系统的示意图。这个系统由三个部分组成:Hilbert 变换、光程扫描周期、等间隔处理。参考光和测试光的干涉信号分别在图中表示为 R 和 T。R 和 T 经过光电探测器  $D_1$  和  $D_2$  后,经过高速数据采集卡同时采样两路信号,得到 R 信号,完成干涉图光程差位置确定,R 和 T 用改进型 Brault 等间隔抽样算法进行抽样得到测试光干涉图。下面分别来介绍这三个部分的设计及实现。

### 3.1 Hilbert 变换设计

参考光信号是一个余弦信号  $\text{Ref}_1$ (去除直流分量),经过 Hilbert 变换后产生一个正弦信号  $\text{Ref}_2$ ,为了便于描述,用  $\text{Ref}_1$  表示余弦信号  $x(n)$ , $\text{Ref}_2$  表示正弦信号  $\hat{x}(n)$ 。第二部分介绍了连续 Hilbert 变换的原理。在上述系统中,需要进行变换的是一个离散采样信号。离散 Hilbert 变换的时域形式如下<sup>[8]</sup>:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k), \quad (4)$$

其中  $x(n)$  是激光干涉信号的采样离散信号, $h(k)$  是 Hilbert 变换的离散脉冲响应, $\hat{x}(n)$  是  $x(n)$  的离散 Hilbert 变换后的信号。 $\hat{x}(n)$  是  $x(n)$  和  $h(n)$  的卷积。因此可以通过在时域设计一个 FIR 的 Hilbert 变换器决定  $h(n)$  的值,还可以通过频域 Hilbert 变换器来实现变换。时域的误差相对较小。这里选择采用时域 FIR,设计长度为 64 的 Hilbert 变换器。采用(4)式可以很容易得到  $x(n)$  的 Hilbert 变换。此外,采用 FIR 产生的相位延迟通过延时抽样而被消除。

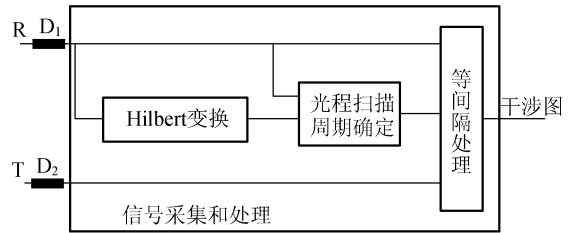


图 2 FFTS 采样系统

Fig. 2 Sampling system of FFTS. R: interference of reference beam; T: interference of test beam

### 3.2 正交分量的修正

采用单边干涉图光程扫描情况下,为便于进行相位校正,光程差一般采用从  $-L_1$  到  $L_2$  扫描,当光程差突然发生截止时,产生相位反转,而  $\hat{x}(n)$  在此处并未随  $x(n)$  发生反转,导致相位在此处发生畸变。因此需要对  $\hat{x}(n)$  进行修正。如果在从  $-L_1$  到  $L_2$  扫描过程中, $x(n)$  的相位是正常的,而认为从  $L_2$  到  $-L_1$  扫描过程中的相位发生了反转。要修正  $\hat{x}(n)$  就必须找到反相位点的位置。在相位反转点,由两个正交信号  $x(n)$  和  $\hat{x}(n)$  的瞬时振幅产生突变,用阈值法确定这个突变点的位置。对从这个点开始到下一个突变点之间的信号进行反相处理,得到  $\hat{x}(n)$  和  $x(n)$  正交的信号。这个信号和通过光电方法得到的信号是类似的。需要指出的是,用这种方法确定光程差扫描周期要求光程差扫描的起点和终点的相位差必须不能是  $0$  或  $\pi$  的整数倍,否则相位反转点不易检测到。通常相位反转点的位置受很多因素的影响,在每次扫描过程中可能是不同的,因此这个点不能作光程扫描的采样起始点。

因为激光的干涉条纹是余弦函数,离散信号  $x(n)$  取值一般是  $n=0,1,2,\dots,n-1$ 。在计算中为了减小误差,对于  $n=0$  的点一般取采样信号第一个极大值的位置开始。经过上述步骤后,得到两个相互正交的信号  $x(n)$  和  $\hat{x}(n)$ 。

### 3.3 光程扫描周期确定

确定光程扫描周期实际上就是要确定光程扫描的采样起始点和结束点。在连续扫描系统中,就是要确定光程差扫描的起始点和扫描方向,再加上激光条纹计数,则整个扫描过程就可以确定了。光程扫描的结束点位置根据扫描方向的变化来确定,而激光条纹计数实际上是在重新抽样算法中间接实现。因此,这里仅需要确定光程扫描的起始点和扫描方向。在 FFTS 中由于光程差是通过压电陶瓷拉伸光纤产生的,而压电陶瓷的上升沿和下降沿是不重合的,为了减少误差,在干涉图的取样过程中通常选用压电陶瓷扫描的上升沿或者下降沿。以下讨论中选用压电陶瓷扫描上升沿来获取干涉图。在连续扫描的 FFTS 中,当压电陶瓷从零电压开始扫描或者扫描到最大电压时,激光的干涉条纹发生相位反转,经过 Hilbert 变换后的两路正交的  $Ref_1$  和  $Ref_2$  进入光程扫描周期确定部分,将两个信号经过整形得到占空比为 50% 的方波。根据方波信号的相位关系,确定光程扫描的方向,进而确定出光程扫描周期以及半周期。利用两路正交方波辨向的原理如图 3 所示。当光程从某一位置(一般是零光程或者负光程位置)扫描至最大值过程中,两个方波的波形如图 3A 所示。 $Ref_1$  的上升沿对应  $Ref_2$  为低电平, $Ref_1$  的下降沿对应  $Ref_2$  为高电平, $Ref_1$  相位滞后  $Ref_2$  相位  $90^\circ$ 。反过来,当光程从最大值扫描到某一位置过程中,两个方波的波形如图 3B 所示。 $Ref_1$  的上升沿对应  $Ref_2$  为高电平, $Ref_1$  的下降沿对应  $Ref_2$  为低电平, $Ref_2$  相位滞后  $Ref_1$  相位  $90^\circ$ 。根据方波的上升沿的高低电平不仅可以确定光程扫描方向,而且可以确定光程扫描的采样起始点。为了进一步提高每次周期确定的精确性,可以将两路信号进行四倍频处理或按照 Kazumasa Takada<sup>[5]</sup> 提出的方法对两路信号进行运算得到上升沿脉冲和下降沿脉冲,然后确定光程差的采样起始点和每个位置。在这个系统设计中,仅需要确定光程扫描的采样起始点。需要指

出的是,光程扫描的采样起始点实际上从方波的第一个上升沿或者下降沿的开始判断,在光程扫描的采样起始点和结束点之外小于方波周期的部分光程被忽略了。为了提高进一步提高定位精度,可以将两个整形后的方波信号反相,得到四个方波信号。根据四个方波信号就可以确定相位关系,从而更精确地确定光程差的初始位置和每个位置<sup>[3]</sup>。

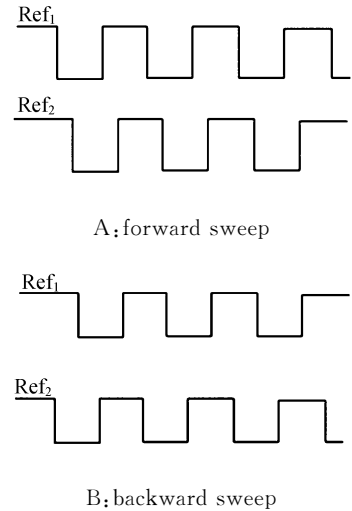


图 3 光程差扫描方向图

Fig. 3 Graph of sweeping direction of OPD

### 3.4 等间隔重新采样处理

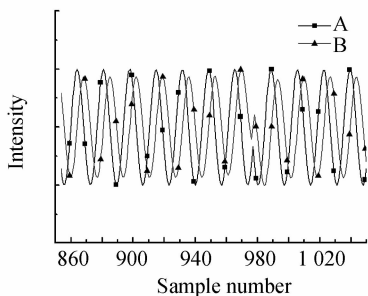
从前面的几步容易得到在光程扫描上升沿扫描过程中参考光和测试光通过光纤干涉仪产生的干涉信号  $I_{ref}(t)$ 、 $I_{tes}(t)$ ,利用参考光的干涉信号  $I_{ref}(t)$  过零点对时间进行采样可以得到时间对条纹采样  $t(x_i)$ ,其中  $x_i$  代表干涉条纹的个数。对  $t(x_i)$  进行 5 次多项式插值,得到条纹 10 次分割后的  $t(x_i)$ 。需要指出的是这里的条纹个数是分数。为得到测试光源的光强与光程差变化的关系,对  $I_{tes}(t)$  利用  $t(x_i)$  相对参考光条纹个数进行抽样,抽样的表达式如下<sup>[7]</sup>:

$$I_i = I[x_i(t)], \quad (5)$$

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。参考光的条纹个数乘以参考光波长就是光程差,经过上述处理后就得到了测试光的干涉图,对得到的干涉图做傅里叶变换后就可以得到光源的光谱。

## 4 数值模拟与讨论

为了验证系统设计,这里模拟了一个理想的激光干涉图。关于等间隔抽样算法已经在另外一篇文章中讨论了,这里仅讨论对光程扫描采样起始点的确定。这部分的关键在于 Hilbert 变换产生的信号是否能确实和原信号正交,而且保持确定的相位关系。图 4 中曲线 A 是原曲线,曲线 B 是经过 Hilbert 变换后的信号,可以清楚看到,在相位反转点变换产生的信号产生了畸变。修正后,得到图 5,其中曲线 A 是原信号,曲线 B 是经过修正的 Hilbert 变换。A 和 B 保持了正交,这两个信号和通过光电方法得到的两个正交信号是类似的,简化了系统设计。需要指出的是,图中的干涉条纹幅度进行了归一化处理,但是由于在相位反转点附近振幅发生了剧烈的变化使变换后该点附近的幅度出现突变,造成两条曲线归一化后的幅度不等。从图中可以看出,经过修正的曲线 B 的相位反转位置发生轻微的偏移,这种偏移是由于在相位反转点附近的 Hilbert 变换误差导致这个点附近相位产生了一个很小的震荡,这种震荡导致从瞬时幅度确定的相位反转点位置有一定偏移。因此这个相位反转点不能作为干涉图的采样起始点,因为每次扫描中这个点可能不同。由于激光干涉图上升沿的位置具有确定的光程差,所以采用两路正交信号的相位关系得到干涉图的采样起始点具有较高的重复度。本方法可节省光

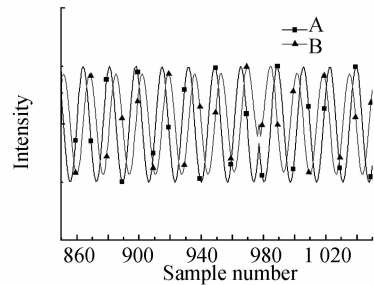


A: Laser interference; B: Hilbert transform

图 4 模拟激光干涉和 Hilbert 变换

Fig. 4 Simulated laser interference and its Hilbert transform

学器件和探测器,简化采样设计。本方法的主要问题在于相位反转后的处理,关键是相位反转点的确定。为了便于相位反转点的确定,必须使光程差扫描的初始和结束位置的相位差不等于 0 或  $\pi$  整数倍。关于均匀抽样算法部分在另外一篇文章中做了详细研究。



A: Laser interference; B: Hilbert transform with correction at the inverse point of phase

图 5 模拟激光干涉和校正后的 Hilbert 变换

Fig. 5 Simulated laser interference and its Hilbert transform with correction

## 5 结论

本文提出的采样系统设计简化了光路和电路设计,便于 DSP 芯片的处理,可用于为 FFTs 设计简单、紧凑、低成本、高可靠性、小体积的采样系统。该方法确定了光程扫描的采样起始点,实现了等间隔采样,可以用来提高 FFTs 的信噪比,消除附加的谱线和谱线展宽。需要指出的是,在激光干涉图的对比度较低、信噪比较低的情况下, Hilbert 变换会在边界处产生误差。另外,光程差扫描的起始位置和结束位置必须不能处在干涉仪的相位差等于 0 或  $\pi$  整数倍的位置,否则会给计算带来困难。尽管如此,在大部分的系统中,激光的干涉条纹一般具有较高的对比度和较高的信噪比,而且光程差的扫描起始和结束位置一般容易控制,因此这种方法可广泛应用到光纤傅里叶变换光谱技术中,还可以推广到传统的傅里叶变换光谱仪中。

## 参考文献:

- [1] BELL R J. *Introductory Fourier transform spectroscopy*[M]. Academic Press, 1972.
- [2] GRIFFITHS P R. *Chemical infrared Fourier transform spectroscopy*[M]. John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- [3] 吴瑾光. 近代傅里叶变换光谱技术及其应用(上)[M]. 北京:科学文献出版社,1995.  
WU J G. *The application and technologies of Fourier transform infrared spectroscopy (FIIR) in recent years* [M]. Beijing: Science Literature Publisher, 1995. (in Chinese)
- [4] TAKADA K, CHIDA K, NODA J, *et al.*. Development of a trench depth measurement system for VLSI dynamic random access memory vertical capacitor cells using an interferometric technique with a Michelson interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1989, 28(15):3373.
- [5] TAKADA K, CHIDA K, NODA J. Fiber optic Fourier transform spectrometer with a coherent interferogram averaging scheme[J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(34): 5170-5176.
- [6] 李志刚, 韩文辉, 杨凤和, 等. 用于 FTS 干涉图信号处理的多阶带通滤波器研究[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2): 120-123.  
LI ZH G, HAN W H, YANG F H, *et al.*. Multistage bandpass filter used for interferogram signal processing of Fourier transform spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2):120-123. (in Chinese)
- [7] 李志刚, 齐文宗, 李福田. 软 X 射线-真空紫外傅里叶变换光谱仪及其光谱分辨率研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5):84-90.  
LI ZH G, QI W Z, LI F T. Soft X-ray and VUV Fourier transform spectrometer and spectral resolution[J]. *Opt. precision Eng.*, 1998, 6(5):84-90. (in Chinese)
- [8] MERTZ L. Auxilliary computation for Fourier spectrometer[J]. *Infrared Phys.*, 1967, 7 (1):17.
- [9] BRAULT J W. New approach to high-precision Fourier transform spectrometer design[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(16): 2893-2896.
- [10] LYONS R G. *数字信号处理*[M]. 北京:机械工业出版社,2005.  
LYONS R G. *Digital signal processing*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:李保生(1974—),男,甘肃武威人,讲师,博士,主要从事光纤干涉型光谱技术、光纤传感技术以及光电检测技术等方面的研究。E-mail:libaosheng@hfut.edu.cn