

基于 LabVIEW 的光纤傅里叶变换 光谱仪数据处理技术*

陈明星, 朱 灵, 张 龙, 刘 勇, 王 安

(安徽省光子器件与材料重点实验室 中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要: 为了提高编程效率与增强光谱仪数据分析处理能力, 结合 LabVIEW 软件在信号处理方面的优势, 利用虚拟仪器技术实现了光纤傅里叶变换光谱仪干涉图处理与光谱复原。采用均匀抽样算法, 利用由光纤 Mach-Zehnder 干涉仪输出的参考光干涉图过零点取样, 实现对测试光干涉图的等光程间隔采样, 消除了由压电陶瓷非线性光程调制引起的误差。采用求摸法复原出光谱图, 自动消除了相位误差。利用 LabVIEW 软件完成了对宽带 ASE 光源的干涉图数据采集、显示与处理并最终得到光谱图。结果表明, 与光栅光谱仪测得的光谱相比, 光谱线型趋于一致。

关键词: 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 傅里叶变换光谱仪; 干涉图; 数据处理; LabVIEW

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Data processing technique for optical-fiber Fourier transform spectrometer based on LabVIEW

Chen Mingxing, Zhu Ling, Zhang Long, Liu Yong, Wang An

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To improve programming efficiency and data analyzing and processing capability in spectrometer, considering the advantages of LabVIEW in signal processing, we have realized interferogram processing and spectrum reproduction of fiber Fourier transform spectrometer using virtual instrument technology. Uniform sampling algorithm is used. Reference light interferogram produced by optical-fiber Mach-Zehnder interferometer is sampled using zero crossing sampling to accomplish equal optical path interval sampling of the interferogram of the test light. Thus, the nonlinear error induced by the nonlinear modulation of piezoelectric ceramic is eliminated. The spectrogram is reconstructed using modular multiplication algorithm to eliminate phase error automatically. Data acquisition, display and processing of the interferogram produced by broadband light source ASE are completed using LabVIEW software. The spectrogram is obtained finally. Result demonstrates that the spectrum-line shape tends to be uniform compared with that obtained using grating spectrometer.

Key words: optical-fiber Mach-Zehnder interferometer; Fourier transform spectrometer; interferogram; data processing; LabVIEW

1 引 言

傅里叶变换光谱仪具有多通道、高通量、高分辨率、高波数精度等多种优点, 是光谱分析的强有力工具, 可用

于宽光谱、复杂光谱或极弱光谱的测量。傅里叶变换光谱法被广泛应用于分子光谱学和天体物理学中的红外光谱分析。该方法是通过计算干涉仪输出的干涉图的傅里叶逆变换得到光谱图, 进而获取光谱信息^[1]。与传统的傅里叶

变换光谱仪相比，光纤傅里叶变换光谱仪(fiber Fourier transform spectrometer, FFTS)采用全光纤设计，用光纤耦合器代替分束器，用压电拉伸调制器代替扫描动镜。由于没有运动部件，因而仪器的稳定性大大提高，并具有信噪比高、测量速度快、抗电磁干扰等优点^[2-3]。不过由于压电陶瓷的非线性光程调制等问题导致直接采样得到的干涉信号不是等光程间隔采样，造成干涉图频率调制且光谱谱线展宽、谱线强度下降并伴有附加谱线，从而降低了探测灵敏度和波数精度。因此需要对干涉图进行均匀抽样，实现干涉图等光程间隔采样^[4]。与传统文本语言编程相比，LabVIEW 编程更适合 FFTS 系统对干涉信号进行滤波、插值、加窗、快速傅里叶变换等信号处理方法的需求，进而提高了测量系统干涉图的数据采集、分析和处理能力^[5-6]。

本文基于图形化的编程语言 LabVIEW，实现了参考光与测试光干涉图的数据采集，利用参考光对测试光干涉图均匀抽样及干涉图幅度谱计算，有效地消除了非线性光程调制误差与相位误差。

2 FFTS 原理

FFTS 系统光学部分的核心是光纤 Mach-Zehnder 干涉仪，采用压电陶瓷拉伸器实现该干涉仪的光程差调制。DFB 半导体激光(1 305 nm)作为参考光和宽带 ASE (1 520~1 570 nm) 作为测试光分别从 Mach-Zehnder 干涉仪两端输入，经干涉仪输出的两相干光经过铟镓砷光电探测器转化为电信号，经凌华公司的 PCI 9118 数据采集卡 A-D 转换为数字信号，送入计算机运用 LabVIEW 软件进行数据处理。FFTS 原理框图如图 1 所示。

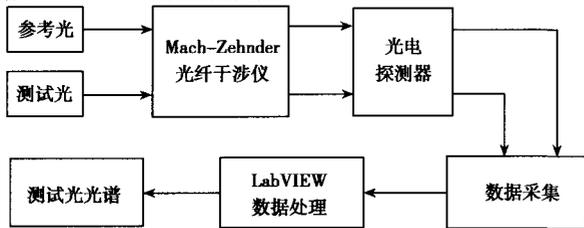


图 1 FFTS 原理框图

Fig.1 Principle diagram of FFTS

从光纤 Mach-Zehnder 干涉仪输出光强的交流部分可表示为^[7]：

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} [B_0(\bar{\nu}) \exp(i2\pi \bar{\nu} \delta)] d\bar{\nu} \quad (1)$$

干涉图 $I(\delta)$ 的傅里叶逆变换就是光谱：

$$B_0(\bar{\nu}) = \int_{-\infty}^{\infty} [I(\delta) \exp(-i2\pi \bar{\nu} \delta)] d\delta \quad (2)$$

上式中从干涉仪输出光强 $I(\delta)$ 与谱分布 $B_0(\bar{\nu})$ 构成傅里叶变换对。实际光谱计算是基于 LabVIEW 软件采用快速傅里叶变换(FFT)算法完成的。

3 LabVIEW 实现干涉图采集与处理

3.1 LabVIEW 编程优势

LabVIEW 是一种用图标代替文本行创建应用程序的图形化编程语言(G 语言)。与传统 C 语言编程相比，LabVIEW 采用数据流编程方式，用图标表示函数，用连线表示数据流向，无需编写大量代码，稍有编程经验的人也很容易掌握^[8]。LabVIEW 提供了包括采集、分析、显示、存储等数据量庞大的集成模块，极大地减轻了编程的复杂度。比如，本文中的线性插值、样条插值及幅度谱计算分别用一个图标即可实现。

3.2 干涉图数据采集

干涉图数据采集需用到数据采集模块，数据采集模块是一个非常重要的模块，它的结果正确与否直接影响到数据处理的结果。本实验通过在 LabVIEW 中开发了多通道信号采集程序，无需编写代码即可方便地实现信号连续采集，实时显示通道信号并刷新。其实现方式为中级模拟输入，采集模型如图 2 所示^[8]。这种采集方式通过开辟一段循环缓冲区，设备连续采集数据并将数据向缓冲区中存放的同时，LabVIEW 依据设置，将缓存中的数据一段一段地读取出来，从而方便地实现后续干涉图处理，而且这样的设计方法可以避免 AI Config.vi 和 AI Clear.vi 被反复调用，提高程序执行效率。利用图 2 的采集模型，采集到的参考光、测试光干涉图及方波三路信号显示于前面板，如图 3 所示。

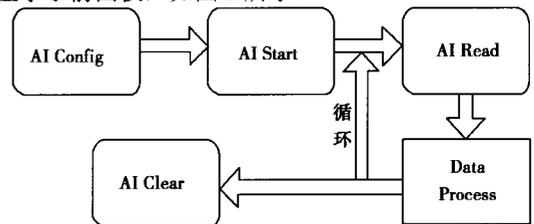


图 2 干涉图数据采集模型

Fig.2 Interferogram data acquiring model

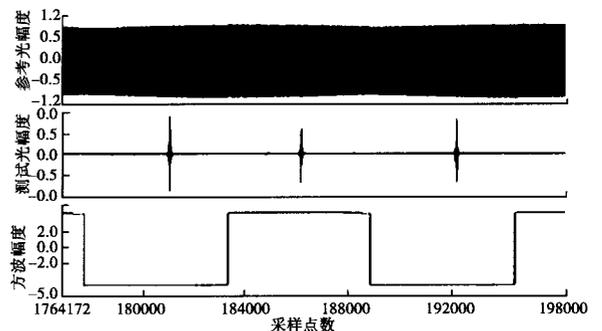


图 3 软件前面板采集图形

Fig.3 Acquiring diagram on front panel

3.3 干涉图均匀抽样

理想情况下，采集到的测试光干涉图是等光程间隔的，对其傅里叶逆变换后即可得到测试光光谱。但实际采集到的测试光干涉图中每两个采样点间隔并不是等光程间隔的，主要是由于压电陶瓷迟滞回线的存在导致光程随扫描时间非线性变化。因此，需要对实际的测试光干涉图进行均匀抽样。对测试光干涉图均匀抽样的表达式如下^[9]：

$$I_i = I[\delta_i(t)] \tag{3}$$

式(3)表示在参考光光程差 δ_i 对应的采样时间 $t(\delta_i)$

时测试光干涉图第 i 个抽样点的光强。运用 LabVIEW 8.2 实现均匀抽样的程序框图如图 4 所示。其中，先判断参考光干涉条纹零点附近的三个点，然后由该三点线性插值确定零点位置。再对 $t(\delta_i)$ 进行线性插值，以减小采样间隔从而减小“栅栏效应”。相邻两点间插入的点数可由软件前面板控件选择输入，本实验选为 9，因而插值后的每两个点间的光程差为 $\lambda_{ref}/20$ 。最后利用 $t(\delta_i)$ 对测试光干涉图进行样条插值，最终得到等光程间隔的干涉图。

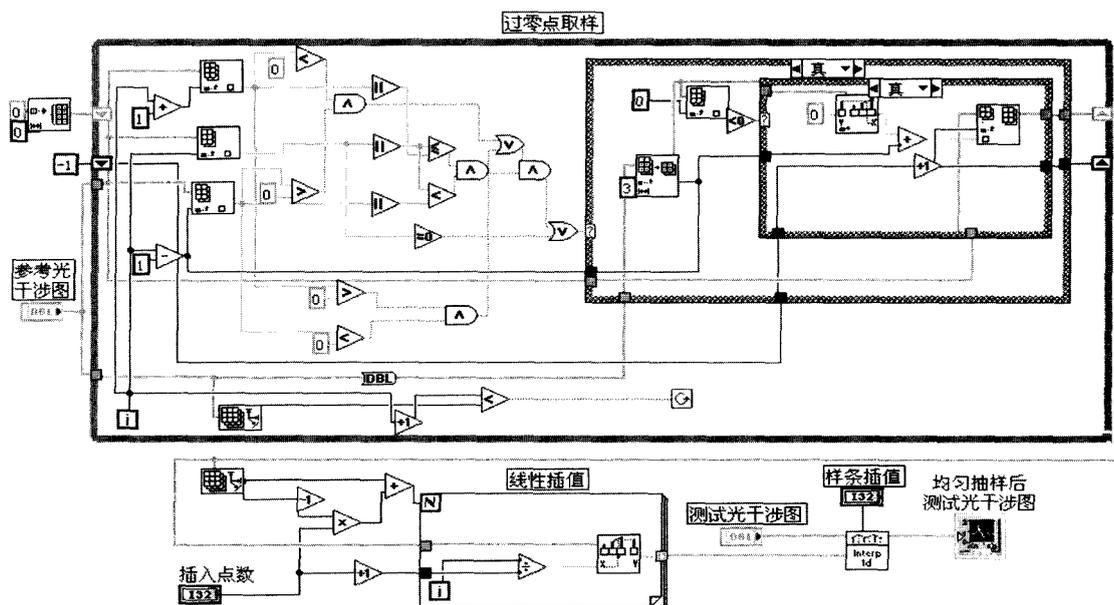


图 4 均匀抽样程序框图

Fig.4 Program diagram for uniform sampling

均匀抽样前后的测试光(ASE)的干涉图中心包络部分分别如图 5、图 6 所示。从图 5 中可以看出由于压电陶瓷非线性光程调制引起干涉条纹疏密变化即频率调制现象，图 6 是由图 5 经过均匀抽样后的干涉图，已基本消除了此调制现象，条纹疏密已近似不变。

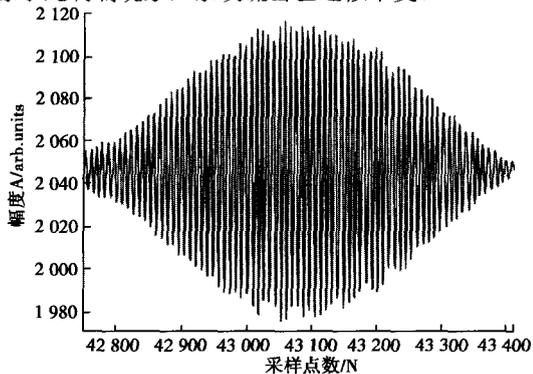


图 5 均匀抽样前 ASE 干涉图

Fig.5 Interferogram of ASE before uniform sampling

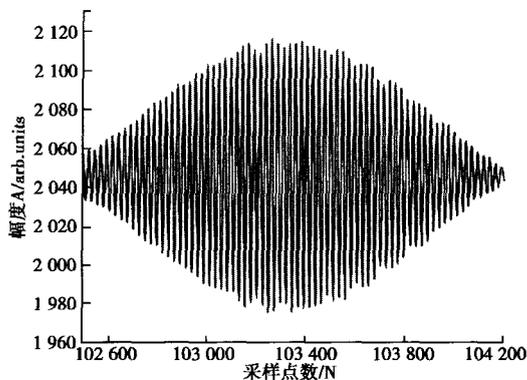


图 6 均匀抽样后 ASE 干涉图

Fig.6 Interferogram of ASE after uniform sampling

对均匀抽样前后的干涉图进行傅里叶逆变换后复原出的光谱图以及用光栅光谱仪测得的光谱如图 7 中 3 条曲线所示。对比均匀抽样前后两幅图可以明显看出，经过均匀抽样处理后的光谱曲线已消除了抽样前的光谱谱

线展宽、谱线强度值下降和附加谱的现象，其线型与光栅光谱仪的相比趋于一致，从而提高了系统的探测灵敏度和波数精度。

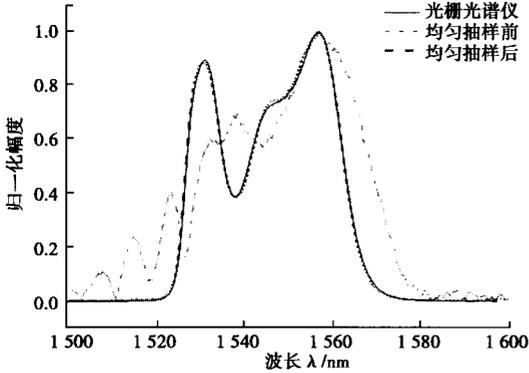


图 7 均匀抽样前后光谱比较图

Fig.7 Comparison of the spectrograms before and after uniform sampling

4 LabVIEW 实现光谱复原

理想情况下，经过上述均匀抽样后的等光程差间隔的测试光干涉图是关于零光程差对称的，因而干涉图是实偶函数，对其傅里叶变换后即可得到光谱图。但实际采集到的干涉图由于光纤色散、抽样偏心都会影响零光程差的位置，导致干涉图关于零光程差不对称，若直接对干涉图进行傅里叶变换会产生误差。设 δ_E 为零光程差的误差， δ_T 为真实的光程差，则测量光程差 δ_M 可表示为：

$$\delta_M = \delta_T - \delta_E \tag{4}$$

由式(2)再结合相移定理可得：

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

式中： $\varphi(\bar{\nu}) = -2\pi\nu\delta_E$ ，与式(2)比较，零光程差测量误差引起相位误差。若对式(5)两边求模，则变为：

$$B_c(\bar{\nu}) = |B_M| = \{[\text{Re } B_M(\bar{\nu})]^2 + [\text{Im } B_M(\bar{\nu})]^2\}^{1/2} = B_0(\bar{\nu}) \tag{6}$$

从而有效地消除了相位误差。

在 LabVIEW 中有对应的幅度谱图标直接连线即可实现干涉图的幅度谱，而且该幅度谱图标根据输入的每两个采样点的光程差间隔自动计算出变换后的波数间隔，因而很方便获得干涉图的幅度谱，如图 8 所示。

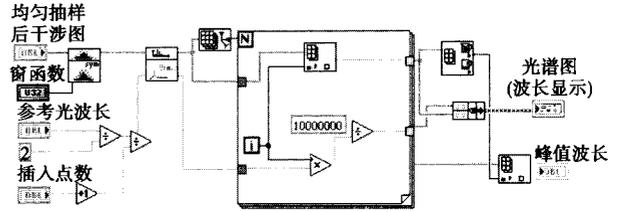


图 8 幅度谱、波长定标程序框图

Fig.8 Program diagram for amplitude spectrum and wavelength calibration

FFTS 系统中，参考光一方面用来对测试光干涉图进行等光程间隔采样，实现均匀抽样，以消除压电陶瓷非线性调制引起的误差；另一方面用来为测试光进行波长定标。对于均匀抽样后的干涉图，由前面的均匀抽样算法知干涉图横坐标中每两个采样点间的光程差为 $\lambda_{ref}/20$ ，对其进行幅度谱变换后得到的光谱图的横坐标对应的是波数显示（等间隔）。再根据波数与波长之间的转换关系，将波数显示的光谱图转换为波长显示的光谱图，从而实现波长定标。其具体算法如图 8 的程序框图所示。

利用 FFTS 测量了宽带的 ASE 光源光谱，经过波数校正和波长定标后的光谱曲线如图 9 中虚线所示。在相同条件下，用 Advantest Q8384 光栅光谱仪测量的 ASE 光谱曲线如图 9 中实线所示。比较两曲线知，FFTS 测量 ASE 光谱的线型与光栅光谱仪测量结果趋于一致。

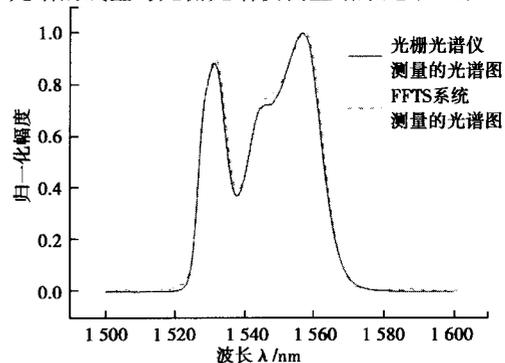


图 9 ASE 光谱比较图

Fig.9 Comparison of spectrograms from ASE

5 结 论

利用 LabVIEW 软件模块化的编程思想，采用均匀抽样算法，实现了测试光干涉图等光程间隔采样，有效地消除了由于压电陶瓷非线性光程调制引起的干涉图频率调制，光谱谱线展宽，附加谱线和谱线强度下降现象，提高了探测灵敏度和波数精度；基于 LabVIEW 软件计算了宽带 ASE 干涉图的幅度谱，有效地消除了抽样偏心引起的相位误差，将复原出的光谱图与光栅光谱仪的相比，其谱线线型一致。LabVIEW 软件在干涉图数据处理面有

很强的优势且在光电检测领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] BELL R J. Introductory Fourier transform spectroscopy[M]. New York: Academic Press, 1972:33-44.
- [2] ZHAO P, MARIOTTI J M, LENA P, et al. Performance analyses of an infrared single-mode all-fiber-optic Fourier-transform spectrometer[J]. Applied Optics, 1995, 34(21):4200-4209.
- [3] 王安, 朱灵, 张龙, 等. 全光纤傅里叶变换光谱仪的关键技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1777-1780. WANG A, ZHU L, ZHANG L, et al. Research on key technologies of all fiber Fourier transforms spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(7): 1777-1780.
- [4] 刘勇, 李保生, 刘艳, 等. 光纤傅里叶变换光谱分析装置[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(10): 1951-1954. LIU Y, LI B SH, LIU Y, et al. Optical-fiber fourier transform spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(10): 1951-1954.
- [5] BRASUNAS J C, CUSHMAN G, M. Uniform time-sampling Fourier transform spectroscopy[J]. Optical Society of America, 1997, 36(10): 2206-2210.
- [6] 吴斌, 蔡栋生, 杭利军, 等. 基于 LabVIEW 的光纤管道泄漏定位软件开发[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2096-2099. WU B, CAI D SH, HANG L J, et al. Development of pipeline leakage detection software based on LabVIEW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(10): 2096-2099.
- [7] LIU Y, LI B SH, LIU Y, et al. Optical fiber interferometric spectrometer[J]. Proc. of SPIE, 2006, 6150: 61501F-1-61501F-6.
- [8] 龙华伟, 顾永刚. LabVIEW 8.2.1 与 DAQ 数据采集[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 152-156. LONG H W, GU Y G. DAQ with LabVIEW 8.2.1 data acquisition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 152-156.
- [9] 李保生, 刘勇, 王安. 光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 201-204. LI B SH, LIU Y, WANG AN. Uniform sampling method of optical fiber Fourier transform spectrometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(3): 201-204.

作者简介



陈明星, 2007 年于淮北煤炭师范学院获得学士学位, 现为中科院安徽光学精密机械研究所硕士研究生, 主要研究方向是光纤传感和光纤傅里叶变换光谱技术。

E-mail: mxchen@mail.ustc.edu.cn

Chen Mingxing received his bachelor degree from Huaibei Coal Industry Teachers College in 2007. Now he is a master student in Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests are fiber optic sensing and fiber Fourier transform spectrum technology.



朱灵, 2003 年于安徽大学获得学士学位, 现为中科院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要研究方向是光纤传感和光纤傅里叶变换光谱技术。

E-mail: zhul@aiofm.ac.cn

Zhu Ling obtained his bachelor degree from Anhui University in 2003 and now is a doctoral student in Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main study interests comprise fiber optic sensing and fiber Fourier transform spectrum technology.