

文章编号: 1001-3806(2011)06-0804-04

基于 FPGA 的傅里叶变换光谱仪光谱复原技术

郝健¹, 张记龙^{1,2*}, 崔丹凤², 景宁¹

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了实时获取化学战剂、大气污染物等被测物的光谱信息, 设计了一种基于现场可编程门阵列实现单边干涉图光谱复原的高速数据处理系统。该系统采用将去直流、切趾, 快速傅里叶变换、相位校正等光谱复原处理集成在一块现场可编程门阵列芯片内实现的方法, 具有集成度高、速度快、成本低等优点。在 ISE10.1 开发平台上设计了数据处理系统硬件电路, 通过 WQF-520 型傅里叶变换红外光谱仪采集干涉数据传给现场可编程门阵列进行处理, 实验结果与 MATLAB 仿真结果比较, 相对误差在 1.2% 以内。结果表明, 该系统可正确复原光谱, 适用于时间调制和空间调制的干涉式光谱仪系统。

关键词: 光谱学; 干涉条纹; 频谱复原; 现场可编程门阵列

中图分类号: O433; TN911.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.022

Spectrum recovery of Fourier transform spectrometer based on FPGA

HAO Jian¹, ZHANG Ji-long^{1,2}, CUI Dan-feng², JING Ning¹

(1. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to obtain the real-time spectrum distribution information of such as chemical warfare, atmospheric pollutants by Fourier transform spectrometer, a data processing system, which can realize the single sideband interference fringes collection and spectrum recovery, was designed based on field programmable gate array (FPGA). In the system, apodization, fast Fourier transform (FFT), and phase correction was integrated in a FPGA chip with the advantages of high integration, high speed and low cost. The XC2VP30 chip of Xilinx's corporation was used to design the data processing module hardware circuit. Then the data collected by WQF-520 Fourier transform infrared spectrometer was transferred to FPGA for processing. Comparing the FPGA results with Matlab simulation results, the difference is within 1.2%. The results show that the system can recover spectrum correctly and is suitable for the interferometric spectrometer system of time modulation and space modulation.

Key words: spectroscopy; interference fringes; spectrum recovery; field programmable gate array

引言

傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 技术是利用干涉图与光谱图之间的对应关系, 通过干涉条纹的傅里叶变换获得含有被测物质各种信息的特征光谱, 几乎被应用于科研和工业的每一个领域。FTIR 光谱仪又分为时间调制型和空间调制型两种^[1-3], 但无论哪一种都需要对获取的干

涉图进行处理, 以获得含有各种信息的光谱图, 因此, 后期的数字信号处理对于能否获得理想复原光谱起到至关重要的作用。

目前完成频谱复原处理的硬件平台主要有 PC 机、专用集成电路 (application specific integrated circuit, ASIC)、数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 和现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA)。PC 机上实现频谱复原是最为普遍的, 但缺点是系统庞大、便携性差, 而且无法满足许多实时性较强的领域。ASIC 电路高昂的研发费用导致其无法在大范围领域中得到应用。DSP 由于编码机制和结构的特点, 在实时瞬态应用中还是略显缓慢^[4-6]。FPGA 以其高效、低成本、可重构性强等优点, 在超高速应用领域和数字信号处理方面得到广泛应用。采用绝对值法通过 FPGA 实现光谱复原已有研究, 但绝对值法只

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61040062); 科技部国际合作计划资助项目 (2010DFR10520); 山西省国际科技合作计划资助项目 (2010081038)

作者简介: 郝健 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字信号的 FPGA 处理。

* 通讯联系人。E-mail: zjlu@sina.com

收稿日期: 2011-01-19; 收到修改稿日期: 2011-03-08

适用于双边干涉图,如果能在 FPGA 中实现单边干涉图频谱复原,对基于光谱的识别和探测在大气污染物遥测、战场激光预警机以及毒气探测等实时性较强的应用场合意义是重大的^[7-8]。作者研究的目的是如何将采集得到的单边干涉图通过 FPGA 进行数字信号处理完成光谱复原。

1 傅里叶变换红外光谱仪数据处理系统原理

傅里叶变换红外光谱仪的基本原理如图 1 所示。由自然光或主动光源发出的光经过样品吸收后,由前置光学系统收集并引入干涉仪进行干涉,将被测信号转变成时域光信号的干涉图,经碲镉汞(mercury cadmium telluride, MCT)探测器转变成电信号,进行信号滤波放大处理, A/D 变换将干涉图信号转化为数字信号后,进行快速傅里叶变换及其它需要的数据处理后,最后获得光谱图数据。

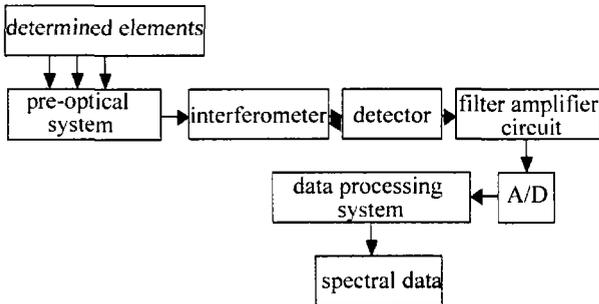


Fig. 1 Principle diagram of Fourier transform infrared spectroscopy

干涉图的数据处理主要包括去直流、切趾、快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)和相位校正 4 部分。

干涉图就是一叠加在直流信号上的波动信号,直流成分在计算复原光谱时需要剔除,因为直流分量的频谱泄露会严重影响低频频谱的准确性,从而导致无法确定低频处的频谱到底是信号中的低频成分还是直流分量的泄露。去直流的方法很多,有多项式线性拟和法、1 阶差分法、小波法等。

理论上光程差从负无穷到正无穷,但实际中光程差总是有限的,动镜的有限移动距离将导致干涉图两端数据的突然切断,可看作理想干涉图与一矩形函数的乘积,时域的乘积相当于频域的卷积,由于矩形函数的傅里叶变换为 sinc 函数,它与干涉数据的卷积会使输出光谱产生的畸变,产生所谓的小“足”,而切趾就是通过权重函数来消除这些足。但切趾在削弱旁瓣的同时也带来了主瓣加宽、分辨率降低的问题。对红外光谱图而言,主瓣加宽导致分辨率降低一些是可以容忍的,但旁瓣的干扰导致微弱信号被淹没以及带来虚假信号是不可以容忍的^[9-10],因此切趾是非常必要的。

复原光谱时必须知道零光程差的准确位置,而在实际工程中,很难正好从 $\delta = 0$ 的位置采集到数据点,相当于干涉图整体进行了漂移。许多物理原因也会引入相位误差,如光学元件、红外探测器、滤波放大电路、A/D 采样等。由于这些不可避免的误差,干涉图会发生一定的畸变,必须进行相位校正来恢复干涉图的原形,常用的相位修正的方法有绝对值法、Forman 法、Mertz 法等。图 2 为未校正干涉图,图 3 为校正后对称的干涉图。

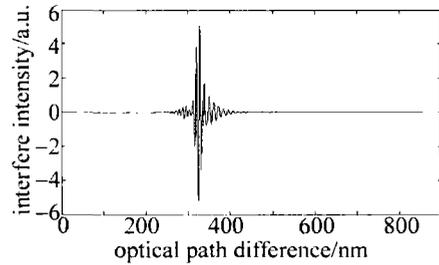


Fig. 2 Original interferogram

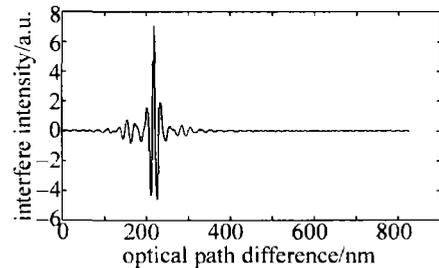


Fig. 3 Interference pattern after correction

绝对值法适用于双边采样,实现的精度较高,但缺点是必须为双边的干涉图,导致数据量太大,计算时间较长,硬件资源消耗非常严重。Forman 法和 Mertz 法则只需短双边的过零采样即可完成相位校正,如果能在硬件中实现过零采样数据处理,在同样点数的情况下分辨率可以提高 1 倍。由于 Forman 法涉及到卷积,在硬件中实现较为复杂,也体现不出 FPGA 并行处理的优势,而 Mertz 法只是 Forman 法的一个简化,根据时域的卷积相当于频域的乘积,在频域中通过乘法即可完成误差校正,所以本设计用 Mertz 乘积法实现单边干涉图的相位校正。

假设波数为 ν ,强度光谱为 $B(\nu)$,相位光谱为 $\phi(\nu)$ 时,包含相位误差的干涉图 $I'(x)$ 为:

$$I'(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) e^{i\phi(\nu)} e^{i2\pi\nu x} d\nu \quad (1)$$

$I'(x)$ 作傅里叶变换得到包含相位误差的强度光谱 $B'(\nu)$ 为:

$$B'(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I'(x) e^{i2\pi\nu x} dx = B(\nu) e^{i\phi(\nu)} \quad (2)$$

利用干涉图 $I'(x)$ 傅里叶余弦变换和正弦变换,求出实数部分 $C(\nu)$ 和虚数部分 $S(\nu)$, $B'(\nu) = C(\nu) + iS(\nu)$ 。

Mertz 法是先对小双边切趾后做 FFT,将得到的实部虚部式按 $\arctan[S(\nu)/C(\nu)]$ 求得相位误差 $\phi(\nu)$,根据短双边干涉图长度和整体干涉图长度,对相位误差

进行插值补零,得到修正后的相位误差,再求的整体干涉图的频谱,由下式即可得到校正后的频谱:

$$B(\nu) = \text{Re}\{B'(\nu)e^{-i\phi(\nu)}\} = \text{Re}\{[C(\nu) + iS(\nu)][\cos\phi(\nu) - i\sin\phi(\nu)]\} = C(\nu)\cos\phi(\nu) + S(\nu)\sin\phi(\nu) \quad (3)$$

2 FPGA 数据处理系统设计

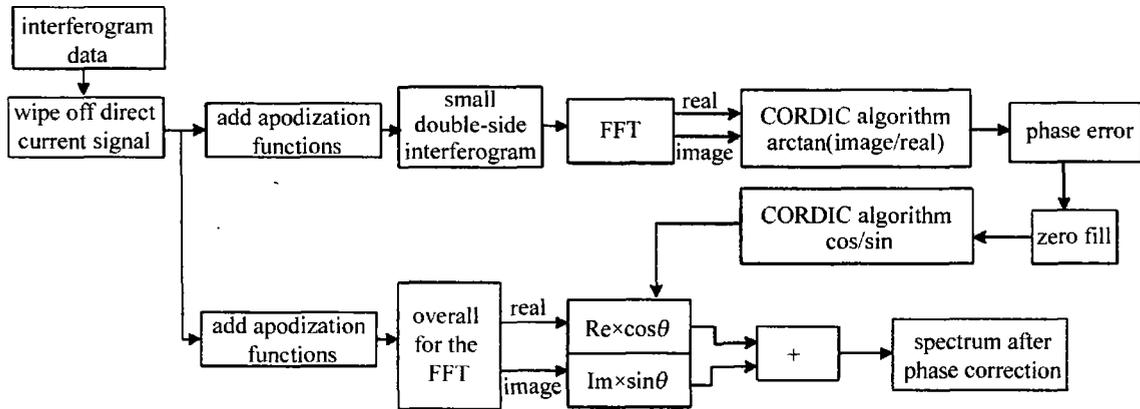


Fig. 4 Mertz method block diagram of hardware implementation

硬件实现过程中,去直流采用适合于硬件实现的拟合法,原始数据一边顺序写入 FPGA 芯片内部的数据随机存取存储器(random access memory, RAM) RAM₁,一边进入 RAM₂ 进行累加求和,并将累加结果除以总点数得到平均值,从 RAM₁ 中读出的数据和 RAM₂ 中的均值通过减法器相减,以实现去直流分量的处理。

加窗在 FPGA 中实现时可先通过 MATLAB 计算窗函数的值并转化为 2 进制补码的形式,将其导入只读内存(read-only memory, ROM)中,ROM 中的值与去直流分量后的数据通过一个乘法器相乘即可完成切趾操作。

数据通过去直流加窗处理后,一路通过限制双口 RAM 的容量采集到小双边,作快速傅里叶变换,将得到的虚部和实部相除,通过 Cordic 算法做 arctan 得到误差相位,采用双口 RAM 实现补零操作后再对其分别作正余弦变换,将得到的结果保存在异步 RAM 中。同时另一路对全部的干涉图数据做 FFT,得到的实部乘以 cosθ,虚部乘以 sinθ,结果相加即可得到的校正后的频谱图。

由于傅里叶变换光谱仪中采集点是通过 He-Ne 激光器精确采集的,分辨率为 4cm⁻¹,可以确定 FPGA 进行 FFT 数据处理的点数为 4096,利用 ISE10.1 自带的 IP 核设计了 4096 点 16bit 的基-2 算法 FFT 模块。

系统平台选用 Xilinx 公司 Virtex-2 Pro 系列 FPGA 开发板,该开发板主芯片是 XC2VP30,30816 个逻辑单元,136 个 18 位乘法器,2448kbit 的 Block RAM,资源足够满足系统设计要求。

图 4 为采用 Mertz 乘积法通过 FPGA 实现数据处理流程图。

通过采用缩减定点算法实现 16 位输入 16 位输出。图 5 为 FFT 仿真结果。由于整个运算只采用了一个蝶形运算单元,所以硬件消耗还是很低的,当工作频率在 100MHz 时,完成一次 4096 点 FFT 只需要 335μs。



Fig. 5 Functional simulation results of FFT algorithm

Cordic 算法又称坐标旋转数字计算方法,主要用于三角函数、双曲函数、指数和对数的运算。该算法使得矢量的旋转和定向运算只需要加减和移位即可。本设计通过 Cordic 算法实现了相位校正过程中所需的 atan, sin, cos 运算。图 6 为 atan 算法仿真结果,图 7 为 sin/cos 算法仿真结果,需要注意的是,atan 和 sin 运算实现过程中,输出使能端置 1 后第 17 个时钟下降沿数据才开始真正输出,因此,需要在输出使能后设计一个 17clk 的延时,以确保数据的正确性。



Fig. 6 Functional simulation results of atan algorithm



Fig. 7 Functional simulation results of sin/cos algorithm
芯片资源消耗情况如表 1 所示。

Table 1 Implement of spectrum recovery consumption XC2VP30 resource

input data	work frequency	use logic unit	use BRAM	use MULT 18 x 18	system time-consuming
4096 point 16bit	100.949MHz	7222	41	20	about 953μm

3 实验测试

采用北京瑞利分析仪器公司的 WQF-520 型傅里叶变换红外光谱仪、气室、流量控制器组成实验平台,将探测器得到的干涉图传给 FPGA,采用 Mertz 乘积法进行数据处理后,在上位机上显示处理后的结果。图 8 为去直流后的干涉图,图 9 为经过 FPGA 运算的到光谱图,图 10 为 MATLAB 仿真得到的频谱图,图 11 为标定后光谱与理论值的相对误差,图 12 为气室中将 CO 和空气在不同比例混合后的实验测试结果。

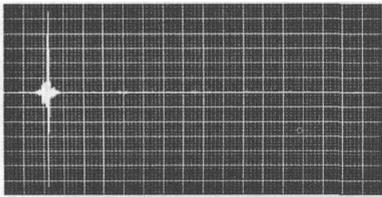


Fig. 8 Wipe off direct current signal of interferogram

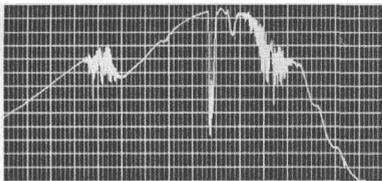


Fig. 9 Rebuilding spectrum signal by FPGA

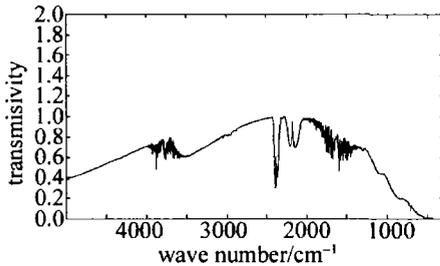


Fig. 10 Rebuilding spectrum signal by MATLAB

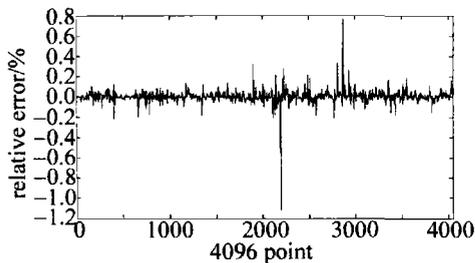


Fig. 11 Relative differences of demarcate spectrum and theoretical value

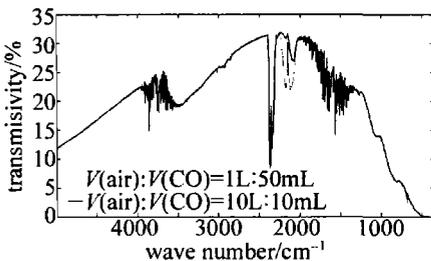


Fig. 12 Different concentrations of CO and air ratios in the comparison spectrum

将 FPGA 运算结果与 MATLAB 仿真结果比较,相

对误差在 1.2% 左右,能够满足系统精度要求,产生的误差主要来源于对数据进行截位操作,由于要保持各级之间输入输出数据相同,所以必须进行截位,而在多级运算中这一误差会逐级加大,在设计中只对部分小数进行截取,使误差尽量降低。

根据气体密度越大,其光辐射的吸收就越强的特征,在试验中通过控制流量使 CO 和空气分别按 1:20, 1:1000 混合,将 FPGA 处理后的数据导入 MATLAB 中比较,发现 CO 在 $2218\text{cm}^{-1} \sim 2044\text{cm}^{-1}$ 范围内有较明显特征峰,表明采用 FPGA 实现光谱复原是可行的。

4 结论

设计了一种在 FPGA 内实现单边干涉图频谱复原的高速数据处理系统,利用 FPGA 并行处理的优势,将整体干涉图的频谱运算和误差函数的计算同时进行,耗时近似于做一次整体干涉图的时间。所有的硬件逻辑单元都在一块 FPGA 芯片中实现,具有功耗低、体积小、集成度高、速度快、可重复编程和擦写等许多优点,可运用于实时光谱处理领域。

参考文献

- [1] MANZARDO O, HERZIG H P, CULDIMANN B, *et al.* New design for an integrated fourier transform spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4178: 310-319.
- [2] OSIPOV S I, LAPCHUK V P. Laboratory model of static Fourier spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3237: 158-161.
- [3] YU K, LEE D, KRISHNAMOORTHY U, *et al.* Micromachined Fourier transform spectrometer on silicon optical bench platform[J]. Sensors and Actuators, 2006, 130/131: 523-530.
- [4] LIU Y, ZHAO Y Ch, GENG X R, *et al.* Analysis of the phase error non-linearity of FTS and discussion about mertz method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(7): 1809-1812 (in Chinese).
- [5] HUANG M, XIANG L B, LU Q B, *et al.* Research on spatially modulated fourier transform imaging spectrometer data processing method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 855-858 (in Chinese).
- [6] ZHANG Y, ZHAO Y, WU X M, *et al.* Advancement on multi-spectrum detecting and laser multi-spectrum detecting technology[J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 188-191 (in Chinese).
- [7] TIAN E M, ZHANG J L, LI X, *et al.* Study on miniature static fourier transform spectrometer used in laser warning receiver[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 853-857 (in Chinese).
- [8] XIANG L B, YUAN Y. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1869-1873 (in Chinese).
- [9] LI B Sh, LIU Y, WANG A. Phase error correction by multiplicative method in optical fiber Fourier transform spectrometer[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24(3): 300-305 (in Chinese).
- [10] ZHANG W J, ZHANG B, ZHANG X, *et al.* Effects of apodization functions of imaging fourier transform spectrometer on reconstructed spectrum[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(3): 227-232 (in Chinese).