

文章编号:1002-2082(2013)03-0447-05

傅里叶变换实时红外光谱复原的 FPGA 实现

王香云

(山西大学 工程学院, 山西 太原 030013)

摘要:为实时获取战场激光、大气污染物气体、毒气等被测物光谱信息的光谱复原,设计了基于现场可编程门阵列(FPGA)的实时光谱采集分析系统。该系统选用迈克尔逊干涉具和碲镉汞探测器获取待测光谱信息,将采集到的数据传入FPGA。利用硬件描述语言VerilogHDL在Xilinx FPGA芯片上依据傅里叶变换(FFT)实现干涉条纹到光谱数据的实时处理。实验结果表明,FPGA实际计算1 024点基2-FFT频谱分布信息与Matlab理论计算结果相同,可满足实时光谱探测的要求。

关键词:光谱复原;迈克尔逊干涉具;傅里叶变换;切趾函数;FPGA

中图分类号:TN247

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201334.0302003

Implement of Fourier transform in real-time infrared spectrum recovery based on FPGA

WANG Xiang-yun

(College of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract:In order to obtain the real-time spectrum recovery of spectrum information such as battlefield laser, atmospheric pollutants gases, poisonous gas, etc. the real-time spectrum acquisition and analysis system based on FPGA was designed. The spectral information was obtained by using a Michelson interferometer and HgCdTe detector, and the collected data was transmitted to FPGA. Using hardware language Verilog HDL on the chip of Xilinx FPGA, the system achieved real-time processing of the spectrum data from interference pattern based on FFT. The simulation result indicates that the spectrum distribution information calculated by 1 024-point radix 2-FFT with FPGA is the same as the theoretical calculation result of Matlab, which can meet the requirement for real-time spectral detection.

Key words:spectrum recovery; Michelson interferometer; Fourier transform; apodization function; FPGA

引言

随着光谱技术的快速发展,基于光谱识别的目标探测和实时处理系统在污染气体成分及浓度信息获取、来袭激光光谱监测以及化学战剂遥测等领域有重要的应用前景,其核心就是傅里叶变换红外光谱(FTIR, Fourier transform infrared spectrometer)技术^[1-3]。它通过把干涉条纹的图像信息转换为离散的数字量,然后再进行傅里叶变换从而获得相应的光谱信息。目前完成干涉条

纹光谱复原处理的硬件平台主要有PC机、专用ASIC电路、DSP和FPGA^[4-6]。PC机平台上通过Matlab或者Labview等软件来完成光谱复原,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。FPGA是通过硬件的方式实现光谱复原,具有高效、低成本、灵活性强等优点。如果能

收稿日期:2012-12-07; 修回日期:2012-12-26

作者简介:王香云(1979—),女,山西怀仁人,讲师,主要从事计算机仿真及嵌入式工作。E-mail:wangxiangyun12@163.com

在 FPGA 中实现干涉条纹光谱复原,对基于光谱的识别和探测如大气污染物遥测、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]。为此,本文研究如何通过 FPGA 实现傅里叶变换实时红外光谱复原。

1 傅里叶变换红外光谱仪的系统设计基本原理

本文研究的傅里叶变换红外光谱探测系统采用的傅里叶变换光谱技术,其核心是通过干涉具产生干涉条纹,利用干涉条纹与目标光谱之间的傅里叶变换关系反演得到目标光谱信息,且该方法具有高光谱分辨力和高光通量等优点,能探测微弱激光信号。实时光谱探测系统主要分光路和电路两部分组成,在实时探测中,为获取待测光谱信息,建立了迈克尔逊干涉光学装置^[9-10],原理框图如图 1 所示。当一束光照到干涉仪的分束器后,一半的光反射到静镜 A,又从静镜反射回到分束器 SB,另一半的光透过分束器到动镜 B,又从动镜反射到分束器,到分束器后形成两束相干光,该装置使光满足干涉的条件,通过动镜 B 的左右移动,产生了一个可变的光程差。产生的干涉光通过收集镜送到探测器上,最终得到干涉条纹。探测器采集到的数据传入 FPGA 中,在硬件 FPGA 芯片中完成干涉条纹的滤波、切趾,再通过 FFT 算法将干涉条纹中的光谱信息进行复原。

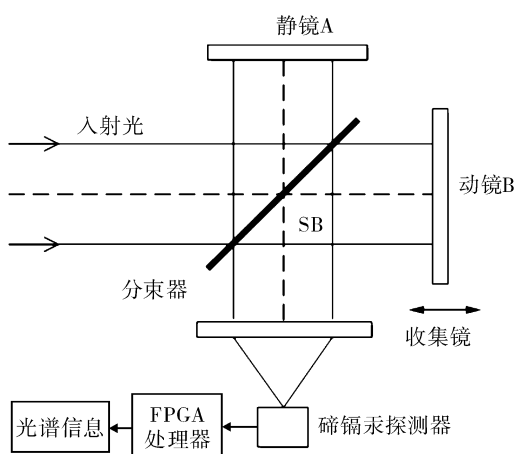


图 1 傅里叶变换红外光谱仪系统原理图

Fig. 1 Schematic of Fourier-transform infrared spectrometer

当入射光波长为 λ , 振幅为 a , 波数为 ν 的单色光束平行于静镜 A 的方向入射到分束器 SB 上,假

设分束器的反射系数和投射系数分别为 r 和 t , 当它通过迈克尔逊干涉具后, 探测器上接收到的信号幅度为

$$A = rta(1 + e^{-i\phi}) \quad (1)$$

式中: $\phi = 2\pi\nu\delta$ 表示静镜 A 与动镜 B 反射后形成的两束相干光之间的相位差; δ 为两束相干光的光程差。探测器接收到两束相干光的信号强度为

$$I_D(x, \nu) = A \cdot A^* = 2r^2t^2a^2 + 2r^2t^2a^2\cos\phi = 2r^2t^2a^2(1 + \cos\phi) = 2RTB_0(\nu) \cdot (1 + \cos\phi) \quad (2)$$

式中: $R = r^2$, $T = t^2$ 表示分束器的反射率和透射率; $B_0(\nu)$ 是入射光束的强度分布。(2) 式包含两部分, 直流成分和交流成分, 其中交流分量反映了入射光谱信号的变化, 直流分量反映的是背景光, 为无用信息。所以对实际光谱测量有影响的仅仅是交流分量, 这样:

$$I(\delta) = 2RTB_0(\nu)\cos\phi \quad (3)$$

(3) 式是理想状态下单色光的干涉条纹函数, 考虑到干涉信号强度还与前置光路系统的设计、探测器的光谱响应效率、分束器的材料等相关, 在实际应用中, 上述方程还需乘以一个与波数有关的校正因子 $H(\nu)$, 令光强分布 $2RTH(\nu) = B(\nu)$ 得到实际单色光的干涉图方程:

$$I(\delta) = B(\nu)\cos(2\pi\nu\delta) \quad (4)$$

按照线性叠加原理, 对于连续光源, 干涉图是对单色光干涉图方程的积分:

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu)\cos(2\pi\nu\delta)d\nu \quad (5)$$

要想得到光谱图, 需要对上式进行傅里叶逆变换:

$$B(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\nu)\cos(2\pi\nu\delta)d\nu \quad (6)$$

若探测器接收到被测信号干涉图, 则可以通过对其进行傅里叶变换得到入射光的光谱信息, $B(\nu)$ 就是要得到的复原光谱。

2 FPGA 数据处理系统

2.1 干涉数据采集与处理整体方案设计

对于傅里叶变换的光谱复原需要进行实时处理, 即当得到光源干涉条纹的信号后, 处理系统需要在处理当前数据的同时接收下一帧的干涉条纹数据, 这就需要系统具备高速的数据处理能力。FPGA 具有高速的并行处理能力, 可完成系统实

时采集和处理的要求。干涉数据采集与光谱复原系统设计框图如下图 2 所示。

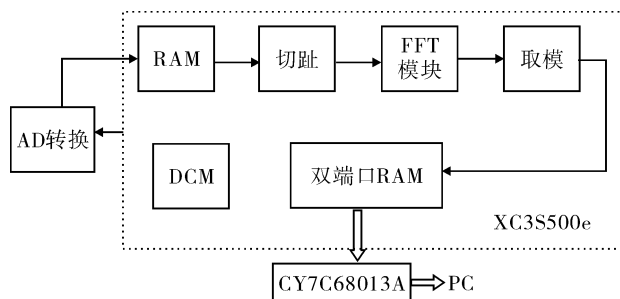


图 2 FPGA 数据处理系统框图

Fig. 2 Block diagram of FPGA data processing

系统核心处理芯片为 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 XC3S500e,探测器采集到微弱信号滤波放大后,经 AD 转换进入 FPGA 中进行后续的数字信号处理,在 FPGA 中进行切趾、快速傅里叶变换(FFT),傅里叶变换后数据的实部和虚部通过乘法器、加法器和开平方后得到探测信号的光谱信息,采用 USB 芯片 CY7C68013A 实现 FPGA 与电脑的数据传输。为保证采集光谱数据的完整性,取模后的数据保存在 FPGA 的双端口 RAM 中,USB 从 RAM 中读取数据,每一帧数据处理完成后进行下一帧的数据处理。整个采集与处理模块的时钟由 DCM 模块控制,系统时钟频率采用 50 MHz。

2.2 切趾函数的选择

由傅里叶变换光谱学的基本方程知,干涉条纹的光程差必须无限大,而且必须在无限小的光程差间隔采样,这样才能得到分辨率无限高的光谱图,而在实际中,无限大光程差的干涉具是不可能实现的,采集干涉条纹数据的点数也是有限的,实际得到的干涉图等于理想的干涉图和一个矩形函数 $D(\delta)$ 的乘积,于是(6)式变为

$$B(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) D(\delta) \cos(2\pi v \delta) dv \quad (7)$$

由(7)式可知,加上矩形函数得到的光谱信息和真实光谱相比有一些差异,所以通常采用切趾的处理方式,切趾最关键的是选择合适的切趾函数,遵循的原则是:主瓣尽量窄且对旁瓣的抑制能力强,常见的窗函数有汉宁窗、汉明窗、三角窗、布莱克曼窗等。切趾函数选择的整个过程是先在 Matlab 中生成 $\sin(2\pi \times 1000t)$ 的正弦信号,然后对此信号进行频率为 5 kHz 的采样,采集 256 点数据后再添加汉明窗等 6 种窗函数,然后分别对添

加 6 种窗函数后的信号进行傅里叶变换,比较添加 6 种窗函数对频谱的影响,结果如图 3。

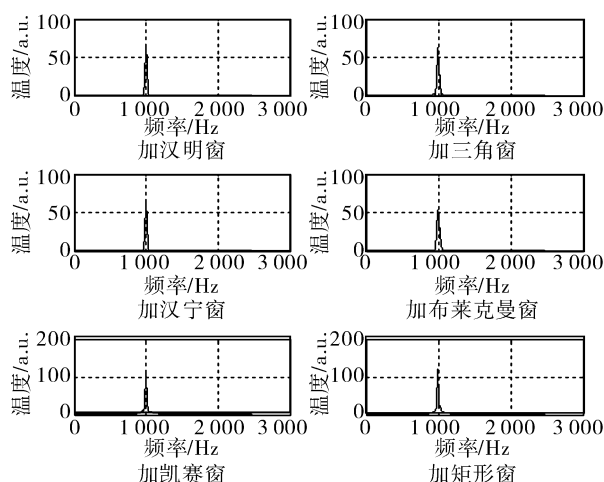


图 3 添加切趾函数得到的傅里叶变换

Fig. 3 FFT results of difference apodization functions

比较图 3 可知,加矩形窗后的主瓣宽度最窄,但对旁瓣的抑制能力最差,加布莱克曼窗后对旁瓣的抑制能力最好,但是主瓣宽度是几个窗函数中最宽的,在剩下几个相同的主瓣宽度下,汉明窗对旁瓣的抑制能力最强,综合比较,汉明窗是比较适合的切趾函数。

切趾在时域相当于一个信号相乘的过程,在 FPGA 中通过一个乘法器和 ROM 就能够实现,把选取好切趾函数的值例化到 FPGA 的 ROM 中,保证 ROM 读地址和存储干涉条纹数据的 RAM 读地址一致,数据同时进入乘法器,即完成了切趾运算。

2.3 光谱复原处理算法

傅里叶变换红外光谱探测系统中,干涉条纹光谱复原的核心算法是 FFT 算法。实时处理系统中,干涉条纹经过去直流和切趾之后可以看作是虚部为 0 的复数进入 FPGA 进行快速傅里叶变换。利用 ISE10.1 自带的 IP 核设计了 1 024 点流水线基 2-FFT 算法模块,通过采用缩减定点算法实现 16 bit 数据输入与输出,通过设置 SCH 值确定每级运算后的右移位数。基 2-FFT 算法在整个运算过程中需采用一个蝶形单元,当第一级数据输入运算模块后,下一级的数据将被放入双端口 RAM 中,采用乒乓缓存操作处理可以提高工作效率,同时,节约了 FPGA 的片上资源,实际只需 3 个硬件乘法器加 3 块双端口 RAM 即可实现高速运算,以 50 MHz 为例,进行 1 024 点的快速傅里

叶变换只需约 $146 \mu\text{s}$ 。

3 实验结果及分析

本文针对整个傅里叶变换红外光谱仪中干涉条纹数字信号处理部分,不考虑探测器模拟信号的处理,故数据源采用实际傅里叶变换光谱仪测得的干涉条纹,通过对比软件的方式复原光谱结果与本文硬件电路处理结果,验证模块的功能。

采用北京瑞利公司的 WQF-520 傅里叶变换红外光谱仪、气室、流量控制器组成实验平台,用光谱仪采集本底光谱图。WQF-520 光谱仪进行的是过零采样,绝对值法采用的是双边干涉图数据,所以以零光程差点即第 553 个点为中心,左右各截取 512 点,得到 1 024 点双边干涉图数据如图 4。导出干涉图数据,截取以零光程差点为对称中心的双边干涉图。

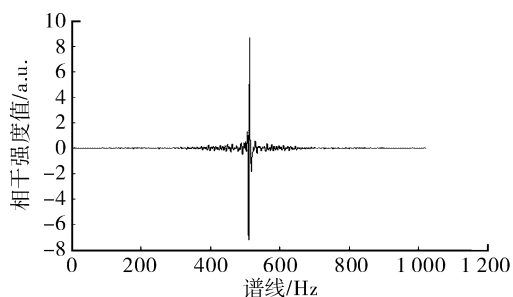


图 4 WQF-520 采集 1 024 点双边干涉图

Fig. 4 1 024-point bilateral interference figure collected by WQF-520

在 Matlab 中对图 4 干涉图数据光谱复原,主要包括切趾、FFT 等运算,反演得到的光谱图如图 5 所示。

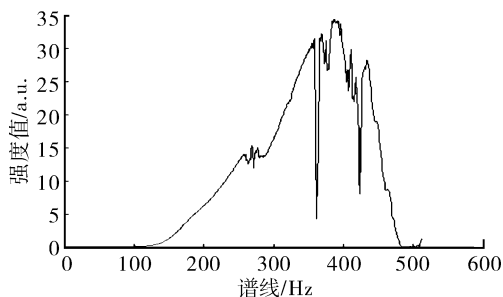


图 5 Matlab 理论计算频谱图

Fig. 5 Spectrum result calculated by Matlab

为验证本设计,将干涉图数据转化为二进制补码的格式,导入 FPGA 的 ROM 中,经过 FPGA 反演处理,结果如图 6 所示。

比较图 5 和图 6 知,FPGA 处理的干涉图结果

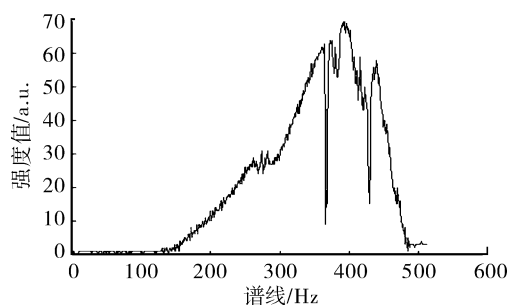


图 6 FPGA 实际计算频谱图

Fig. 6 Spectrum result calculated by FPGA

与通过 Matlab 处理结果一致,光谱图主要信息也能复原出来,表明 FPGA 实现干涉条纹光谱复原的方案可行。但是软件处理后数据的精度有所下降,存在一定的偏差,原因是:图 5 数据处理是在电脑中实现的,为浮点运算,数据位宽没有限制,而在 FPGA 中属于定点运算,处理时干涉图数据转换成了 16 位 2 进制数的形式,精度相应降低;同时 FPGA 中 FFT 模块采用了缩减模式,16 位输入,16 位输出,在减小数据输出位宽的同时降低了数据的精度。但本实验表明 FPGA 实现干涉图光谱复原在理论上是可行的,同时要想获得更高光谱分辨率的光谱数据,可以增加数据个数。

4 结论

本文运用干涉条纹与光谱图存在傅里叶变换的关系,利用高速 FPGA 芯片设计实时光谱复原处理系统。系统采用滤波、去噪、切趾等处理干涉条纹信息,然后以硬件 FPGA 为核心器件计算 1 024 点基 2-FFT,结果显示其频谱分布信息与 Matlab 理论计算结果相同,可满足实时光谱探测的要求,通过快速傅里叶变换完成时频变换,实现光谱信息的实时复原,具有集成度高、灵活性强、速度快等优点,实验结果表明该系统有助于战场激光、大气污染物气体、毒气等待测物光谱信息的光谱复原。

参考文献:

- [1] 田二明,张记龙,李晓. 激光告警系统中小型静态傅里叶变换光谱仪的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 853-857.
TIAN Er-ming, ZHANG Ji-long, LI Xiao. Study on miniature static Fourier transform spectrometer used in laser warning receiver[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 853-857. (in Chinese)

- with an English abstract)
- [2] 殷世民,相里斌,周锦松,等. 基于 FPGA 的干涉式成像光谱仪实时数据处理系统研究[J]. 红外与毫米波学报,2007,26(4):274-278.
- YIN Shi-min, XIANG Li-bin, ZHOU Jin-song et al. Real-time data processing of interferential imaging spectrometer based on FPGA [J]. J Infrared Millim Waves, 2007,26(4):274-278. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 李苏宁,朱日宏,李建欣,等. 傅里叶干涉成像光谱技术中的重构方法[J]. 应用光学,2009,30(2):267-272.
- LI Su-ning, ZHU Ri-hong, LI Jian-xin, et al. Method of reconstruction on Fourier-transform spectroscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2009,30(2):267-272. (in Chinese with an English abstract)
- [4] ZOLTÁN B, VIKTÓRIA K, TAMÁS O, et al. Comparison of open path and extractive long-path FTIR techniques in detection of air pollutants[J]. Applied Spectroscopy Reviews,2006,41(1):77-97.
- [5] BRIAND D, MANZARDO O. Gas detection using a micro-machined FTIR spectrometer [C]. US: IEEE, 2007.
- [6] 刘辉志,张记龙,张辉,等. 实时光谱探测中快速傅里叶变换的 FPGA 实现[J]. 红外,2009,30(11):1-6.
- LIU Hui-zhi, ZHANG Ji-long, ZHANG Hui, et al. Implement of fast Fourier transform in real-time spectral detection based on FPGA [J]. Infrared, 2009,30(11):1-6. (in Chinese with an English abstract)
- [7] BEKKER D L, BLAVIER J F L. An FPGA-based data acquisition and processing system for the MAT-MOS FTIR instrument[C]. US: IEEE, 2009.
- [8] 简小华,张淳民,赵葆常. 研究干涉图处理与光谱复原的一种新方法[J]. 物理学报,2007,56(2):824-828.
- JIAN Xiao-hua, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang. A new method for spectrum reproduction and interferogram processing [J]. Acta Physic Sinica, 2007,56(2):824-828. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 付林,刘辉志. 基于 FPGA 的静态傅里叶变换光谱探测系统研究[J]. 半导体光电,2011,32(2):287-291.
- FU Lin, LIU Hui-zhi. Study on static Fourier transform spectrometry system based on FPGA[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011,32(2):287-291. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 王彩玲,李玉山,刘学成,等. 基于相位相关性的傅里叶变换光谱数据的相位误差修正方法[J]. 应用光学,2011,32(5):878-882.
- WANG Cai-ling, LI Yu-shan, LIU Xue-cheng, et al. Phase error correction in Fourier transform spectrometer based on phase correlatin[J]. Journal of Applied Optics, 2011,32(5):878-882. (in Chinese with an English abstract)