

文章编号:1001-5078(2011)04-0466-04

· 光电技术与系统 ·

基于 FPGA 马赫 - 泽德干涉仪的光谱数据采集系统

李肖廷, 李仰军, 王 高

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:针对马赫 - 泽德(M-Z)干涉仪中干涉条纹采集和处理的要求, 为了使其具有高速实时光谱数据处理能力, 设计了一种通过 FPGA 硬件编程实现干涉条纹采集处理的方法。系统由 CMOS 探测器采集马赫 - 泽德干涉仪获取的干涉图像, 再将干涉图像中的灰度信息输入到 FPGA 芯片中, 通过去噪、切趾、快速傅里叶变换、标定等求解入射激光的光谱特征。系统通过切趾加窗等处理, 采用基 2 的快速傅里叶变换及标准波长对比的方法进行标定。在 FPGA 软件环境中仿真后, 时序正确。硬件调试采用中心波长为 580 nm, 690 nm, 870 nm 三种激光器, 由马赫 - 泽德干涉仪及 FPGA 组成的系统进行分析, 实验结果与 GSI8013NIR 型近红外光纤光谱仪进行对比, 误差小于 1 nm, 满足设计要求。

关键词:马赫 - 泽德; 光谱数据; FPGA; 实时采集

中图分类号:TN247

文献标识码:A

FPGA real-time spectrum data acquisition system of Mach-Zehnder interferometer

LI Xiao-ting, LI Yang-jun, WANG Gao

(School of Information and Communication Engineering, The North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to make high-speed real-time spectrum data acquisition and processing in Mach-Zehnder interferometer, design and implement of a hardware programming in FPGA is presented. The system collected interferometer fringes of Mach-Zehnder with the CMOS detector, and then put the gray information of interference fringes into the FPGA chip. Through the noise removal, apodization, fast Fourier transform, the incident laser is calibrated. Through apodization windowing and other treatment, the system uses base-2 fast Fourier transform and the method of standard wavelength comparison to get spectrum data. In FPGA simulation software environment, the timing proves to be correct. Hardware debugging is carried out with three lasers with respectively central wavelength of 580 nm, 690 nm, 870 nm. The system composes of the Mach-Zehnder Interferometer and the FPGA. Results of our system are compared with the results of the GSI8013NIR fiber optic spectrometer. The error is less than ± 1 nm, which meets the design requirements.

Key words: Mach-Zehnder; spectral data; FPGA; real-time acquisition

1 引言

针对马赫 - 泽德干涉仪而言, 通过空间位置变化产生的干涉条纹, 同时由 CMOS 探测器采集光电信号, 将干涉仪产生的干涉信息(灰度数据信号)送入 FPGA 处理系统中。由于马赫 - 泽德干涉仪中不存在机械扫描部分, 故相比传统迈克尔逊干涉仪可

大幅提高稳定性及抗干扰能力。已静态空间相干的还有静态迈克尔逊干涉仪、静态傅里叶变换干涉仪、

基金项目: 山西省研究生创新项目(No. 20081017)资助。

作者简介: 李肖廷(1984 -), 男, 在读硕士, 主要研究方向为光机电集成技术等。E-mail: 183808045@qq.com

收稿日期: 2011-01-18; 修订日期: 2011-02-18

Sagnac 型干涉仪等,这些干涉系统也是构成静态光谱仪的核心部件^[1-3]。

因为没有扫描结构,所以干涉条纹的产生只与干涉具的空间位置有关,即无需时间扫描,可以满足高速探测的要求,当匹配高速的信息处理芯片(比方说 FPGA、DSP 等)就可以实现实时处理的要求。本文就是通过硬件芯片实现干涉条纹的实时处理,其中主要包括快速傅里叶变换、光谱标定两部分。是可编程门阵列器件,其处理速度快、编程灵活、集成度好,目前,已经广泛地应用在信号处理的许多领域当中。

对于干涉条纹的采集处理主要分为三种方法^[4-6]:一是干涉条纹信息通过采集卡上传至电脑机,通过 Labview 软件和 Matlab 软件等实现傅氏变换等数据分析;二是采用特殊的快速傅氏变换的芯片;三是采用 FPGA 或 DSP 等直接获取由图像传感器得到的干涉条纹信息。其中,方法一由于需要配置电脑所以系统大,不方便;方法二对数据的分析处理灵活性较差,并且只适合少量数据的付氏分析;方法三是目前用处最多的,DSP 数据处理更偏重于软件数据分析,而 FPGA 更偏向于硬件编程实现的数据处理,其具有高速、高灵活度,高集成度的许多优点,本系统采用 FPGA 硬件编程实现马赫-泽德干涉仪干涉条纹的高速傅里叶变换、光谱标定等。

2 基本原理

图1为马赫-泽德干涉仪的工作原理示意图,其由两个梯形棱镜的底边组成成为一体,光线1、2通过马赫-泽德干涉仪分束成两束光,其反射的光束经成像透镜成像到光电面阵传感器;透射的光束经过输入透镜在M-Z干涉具进行相干叠加,聚焦透镜将从干涉具射出的平行光束聚焦在集成多功能光电传感器上,该传感器线阵具有光电转换及傅里叶变换的功能。通过滤波、切趾、快速傅里叶变换、光谱标定等最终获取光谱信息^[7-8]。

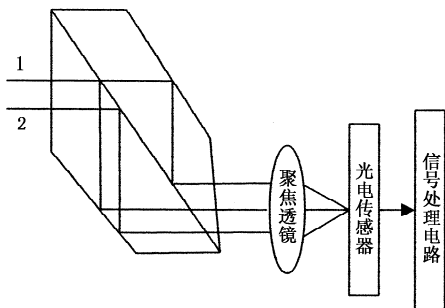


图1 马赫-泽德干涉仪原理示意图

Fig.1 schematic of Mach-Zehnder interferometer

3 系统设计

3.1 方案

M-Z干涉具产生的干涉条纹经CMOS探测器采集到FPGA中,如果要得到待测光的光谱数据,则需在FPGA芯片中进行滤波、切趾、快速傅里叶变换以及光谱标定处理,将处理后的光谱数据实时的显示在显示设备上就能完成实时光谱分析的要求。过程如图2所示。

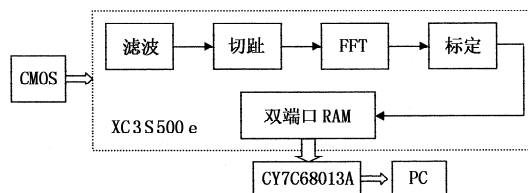


图2 数据处理示意图

Fig.2 block diagram of data acquisition system

系统采用日本 ARTRAY 公司的 ARTCAM - 500MI 型线阵 CMOS 相机,采用 LVDS 电平数据,可以与进行通信。选用 Xilinx 公司的 FPGA 芯片,处理器为 XC 3S500e(包括超过 50 万个逻辑门)。USB 数据由 Cypress 公司的 CY7C78015A 芯片(16 位异步 FIFO)构成。CMOS 传感器获得的干涉条纹输入到 FPGA 的 RAM 中,首先进行滤波及切趾处理,再将切趾的数据通过快速傅里叶变换算法运算。在傅变部分按时间基 2 的方式抽取完成蝶形运算。傅变后的数据得到实部与虚部,再通过乘法、加法器得到光源的最后结果。将光谱数据先保存到指定的 RAM 中,然后再从 RAM 中读,使在每帧数据处理完后就可以直接处理下帧的数据。采用该方法可以提高系统的工作效率,系统时钟通过 DCM 控制,系统工作频率采用 100 MHz。

3.2 滤波及切趾

在傅里叶变换光学公式中积分的上限为无穷大,但实际上光学系统中的干涉具是有具体尺寸的,所以实际的干涉条纹是理想条纹和矩形函数的积,即频域中理想条纹和矩形傅变函数 SINC 的卷积,故傅变后需要进行光谱校准^[9]。

在此之前,还需对输入的光进行简单的滤波处理,用一个阈值频率将直流噪声去掉,然后进行相应的切趾处理。对于切趾函数的选取直接决定了最后光谱数据的效果。在切趾函数的确定过程中我们采用了仿真分析的方法。采用最常用的几种窗函数进行分析,对比不加窗与加三角型窗、汉宁窗、汉明窗的切趾效果。仿真过程中采用的是由 CMOS 传感器采集的中心波长 870 nm 激光的光

谱信息,不加窗及加其他三种常见窗的效果示意图如图3所示。

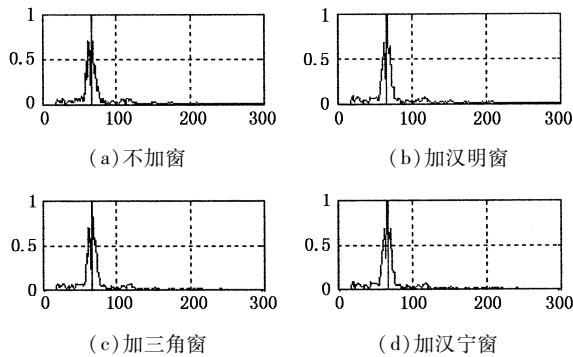


图3 不加窗及三种常见窗的切趾对比图

Fig. 3 comparison of non-window and three common apodization window

仿真结果显示,光谱主瓣变窄和旁瓣衰减加快是对立的,也就是需要根据具体情况合理选择,而在本系统中,选择两者皆顾的,即不需要过好的主瓣,也不需要太快衰减的旁瓣,所以相比之下采用汉宁

窗比较合适。先由软件算出汉宁窗需要的参数,再变成二进制数传入FPGA的ROM存储器上,最终通过程序将输入的数据进行切趾处理。

3.3 快速傅里叶变换

快速傅里叶变换采用ISE9.1中的IP核,实现实数与虚数的傅里叶变换及傅里叶逆变换等运算。该核提供了流水线结构、蝶形运算算法等。系统通过基2时间的定点算法,通过SCH值控制蝶形运算中每级运算过的位数。在基2的算法过程中,所有的运算都在一个蝶形单元中进行,同时,每级蝶形运算都是依次完成的,一级开始的起始信号是上一级的完成终止信号,中间过程的运算结果放在两个RAM中,该结构不但可以节约FPGA的资源,使其仅用两个硬件乘法器和与四个RAM块就能完成运算,同时也大幅提高了处理速度,在100M时钟工作时,进行1024点的傅氏变换仅用64 μ s。快速傅里叶变换数据仿真图如图4所示。

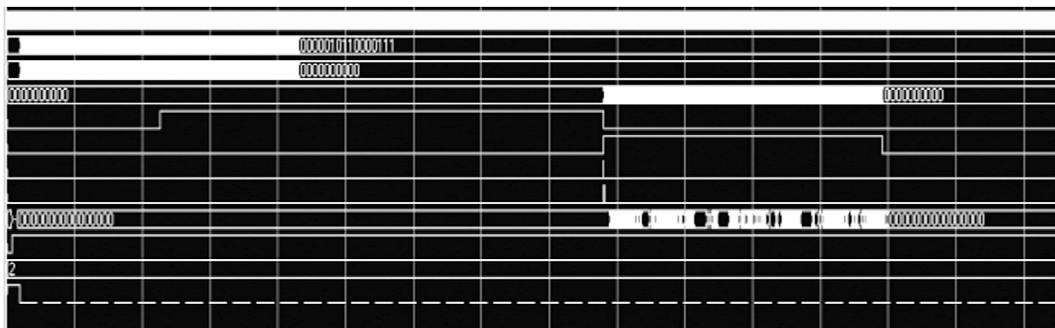


图4 快速傅里叶变换数据仿真图

Fig. 4 simulation diagram of data fast fourier transform

3.4 数据通信

系统采用芯片7C68015作为USB数据传输核心部件,7C68015包括了串行接口、2.0的收发器、单片机C8059处理器及一些相关的外围电路,最大速率可达128M/s。

7C68015有两种工作方式,采用USB工作模式时,7C68015作为接口将FPGA和电脑相连。选用该模式时,FPGA是主控制器。系统包括接口芯片、处理芯片和显示部分,分别采用FPGA的硬件编程实现功能。其中,接口芯片的编程实现对USB通信部分的配置,在数据传输过程中可以不需要该程序的参与;数据传输到FPGA后,滤波、切趾、傅里叶变换算法程序等对采集的干涉条纹进行分析运算;最后由FPGA控制显示光谱数据结果。

系统采用异步FIFO的通信方式,传输数据宽度32bit。为FIFO提供端口地址AD[1,0],输出端

口选用8,将16位数据[15,0]传输到FPGA内核处理器上,WR为写信号,在上升沿时写入数据,FULL为满状态标志信号。显示软件在Visual Studio平台下编写,由对应的绘图控件动态显示。

4 实验

实验采用马赫-泽德干涉仪、日本ARTRAY公司的ARTCAM-500MI型线阵CMOS相机(光谱范围为350~1250nm),灰度深度分为10bit,12bit,16bit;对比标准光谱仪为GS18013NIR型近红外光纤光谱仪。

实验中CMOS图像传感器设为1024个,灰度深度为16bit,采集580nm,690nm,870nm三种激光器的干涉条纹,干涉条纹数据由FPGA数据处理得到光谱信息,再通过Visual Studio平台下的绘图控件将其显示。光谱检测值与标准光谱仪检测值的误差关系如表1所示。

表1 光谱检测值与标准光谱仪检测值的误差关系

Tab.1 the error comparison of the system and the standard spectral spectrometer

波长/nm	GSI8013NIR/nm	本系统/nm	平均误差/%
580.0	580.2	581.4	0.164
	580.6	580.9	
	579.3	578.9	
690.0	691.0	689.5	0.157
	690.2	692.4	
	690.7	690.2	
870.0	869.5	870.7	0.140
	869.8	871.9	
	870.0	869.5	

由实验结果可知,系统的光谱分析能力与标准的光谱仪检测的结果相近,平均误差在0.17%以下。虽然光谱范围受马赫-泽德干涉具材料等的影响,没有标准光谱仪的光谱范围宽,但是在需要测量的三个激光波长上已经满足了探测要求,即可以实现实时的光谱分析。同时,实验过程中,激光器光源本身的稳定性对结果也有一定的影响,所以,本系统测量偏差还可以通过改善光源从而进一步提高光谱探测的精确度。

5 结论

设计了采用FPGA作为主控芯片,硬件傅里叶变换实现干涉条纹的光谱分析方法。系统由马赫-泽德干涉仪、FPGA、Visual Studio平台联合构成,对干涉条纹进行实时处理,完成了滤波、切趾、快速傅里叶变换、光谱标定等多种运算,最终实时显示。实验选用三种激光器,和GSI8013NIR型近红外光纤光谱仪的测试结果进行对比,分析该系统平均误差,可知误差均小于0.18%,可以满足系统设计的基本要求。

参考文献:

[1] Tang Yi, Ni Guoqiang, Liao Ningfang, et al. Michelson interferometer based on spatial modulation interference imaging spectrometer [J]. Optical Technology, 2007, 32

(3): 427-428. (in Chinese)

唐义,倪国强,廖宁放,等.基于迈克耳逊干涉仪的空间调制型干涉成像光谱仪[J].光学技术,2007,32(3):427-428.

- [2] Gong Changlai. Based on wavelet transform and mean filter for image denoising [J]. Optical Engineering, 2007, 34(1): 72-75. (in Chinese)
龚昌来.基于小波变换和均值滤波的图像去噪方法[J].光电工程,2007,34(1):72-75.
- [3] Ruan Ping, Yang Jianfeng, Zhao Baochang. Interference imaging spectrometer analysis [J]. Photonic Technology, 2007, 36(2): 282-285. (in Chinese)
阮萍,杨建峰,赵葆常.干涉成像光谱仪的通量特性分析[J].光子学报,2007,36(2):282-285.
- [4] Yin Shimin, Xiang Libin, Zhou Jinsong, et al. FPGA-based interferometric imaging spectrometer real-time data processing system [J]. Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(4): 274-278. (in Chinese)
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.
- [5] Shen Min, Deng Yebing, Zheng Jianhong. DSP theory and its application in mobile communication applications [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2001: 159-166. (in Chinese)
申敏,邓矣兵,郑建宏. DSP原理及其在移动通信中的应用[M].北京:人民邮电出版社,2001:159-166.
- [6] Zhang Jingbo. DSP-based control system for fourier spectrometer measurements [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
张敬波.基于DSP的傅里叶光谱仪测量控制系统[D].长春:吉林大学,2004.
- [7] Lü Gaoxu. Visual C# example of concise analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 312-425. (in Chinese)
吕高旭. Visual C#范例精要解析[M].北京:清华大学出版社,2008:312-425.
- [8] Meng Jiang, Zu Guang Guan, Sailing He. Multiplexing scheme for self-interfering long-period fiber gratings using a low-coherence reflectometry [J]. IEEE, 2007, 28(31): 1283-1286.