基于静态固体斜楔干涉的红外探测技术

王耀利[1,2,3],温廷敦[1,2,3],王志斌[1,2,3],张 瑞[1,2,3],黄艳飞[1,2,3],陈友华[1,2,3]

(1. 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;
2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051;
3. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心,山西 太原 030051)

摘 要: 针对现有傅里叶变换红外光谱遥测技术响应速度慢、灵敏度低、抗震性差等缺点,提出一种基于静态固体斜楔干涉具为核心的傅里叶变换红外光谱遥测技术。选用 UL04371-042 型非制冷红外焦平面阵列探测器(UIRFPA)作为干涉信号探测的核心部件。在分析静态固体斜楔干涉具基础理论及探测器性能的基础上设计了驱动电路,FPGA 作为时序控制的主体, 在 Xilinx ISE 12.4 的开发环境中,利用 Verilog 硬件描述语言编程,对探测器的工作时序进行了设计输入和仿真验证。使得干涉信号通过高速 AD 采集,FPGA 外扩的 SRAM 缓存,最后通过 USB 传送到上位机 LABVIEW 进行数据处理及成像。通过仿真和实验验证其可行性,实现了红外波段的静态固体斜楔干涉信号光谱成像,为进一步研究干涉型成像光谱仪成像技术提供前期准备。

关键词: 静态固体斜楔干涉具; 红外光谱遥测; 非制冷红外焦平面阵列; FPGA
中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3188-05

Infrared detection technology based on static solid wedge interferometer

Wang Yaoli[1,2,3], Wen Tingdun[1,2,3], Wang Zhibin[1,2,3], Zhang Rui[1,2,3], Huang Yanfei[1,2,3], Chen Youhua[1,2,3]

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

Abstract: Aiming at the slow response speed, low sensitivity, poor vibration resistance of existing Fourier transform infrared spectrum telemetry, a new method was put forward with static solid wedge interference as the core. UL 371-042-04 uncooled infrared focal plane array detector was selected as the core component of interference signal detection. Driving circuit was designed based on the analysis of the basic theory of static solid wedge interference and detector performance. FPGA as the main part of sequential control, designed input and verified simulation of the work timing of detector with Verilog hardware description language programming in Xilinx ISE 12.4 development environment. It can make the interference signal go through high-speed AD sampling and FPGA outside enlarge SRAM cache, the

收稿日期: 2014-02-05; **修订日期:** 2014-03-15
基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150);国家自然科学基金仪器专项基金(61127015);山西省国际科技合作项目(2010081038)
作者简介: 王耀利(1987-),男,博士生,主要从事光电探测技术方面的研究。Email:wangyao_li@sina.cn
导师简介: 温廷敦(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事信息物理方面的研究。

processed signals are sent to PC LABVIEW for data processing and imaging via USB finally. Kealized the infrared wavelengths of static solid wedge interference signal spectrum imaging by simulating and experimenting to verify its feasibility, provided preparation for further study of interferometric imaging spectrometer imaging technology.

Key words: static solid wedge interference;　infrared spectrum telemetry;　UIRFPA;　FPGA

0 引　言

近年来，随着工业的高速发展，大量的工业废气、机动车辆排放的尾气、化工生产泄露的有害气体等被排入大气,这些污染物严重地破坏大气质量,给人类赖以生存的生态环境造成极大的危害。因此,研究大气污染气体的实时遥测理论及技术对大气污染治理、全球环境变化监测等都具有重要的学术价值。

目前,国内外大气污染遥测技术主要包括差分吸收激光雷达技术(DIAL)、傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)、红外成像技术等[1]。与其他探测技术相比,开路被动傅里叶变换红外光谱技术(OP-FTIR)以其特有的优势备受国内外研究者的关注[2]。然而,目前现有的 FTIR 光谱遥测技术均采用动镜机械扫描结构,虽然光谱分辨率较高,但由于其基于时间调制,系统存在响应速度慢、灵敏度低、机械扫描部分抗震性差、操作维护困难等缺点[3],对于一些特殊的大气污染探测场合,如对化工厂泄漏气体的突发事件、战场条件下化学战剂的探测时，为了争取更快的告警防御,要求遥测系统必须具备高的响应速度,强的环境适应性,实现实时快速探测识别。文中提出采用静态固体斜楔干涉具作为核心部件的红外光谱获取技术，去除机械扫面结构，提高光谱获取速度和稳定性，对基于静态固体斜楔干涉具的污染气体被动遥测系统的基础理论、红外光谱获取技术进行了研究,有助于建立一套大气污染的红外光谱遥测系统。

1 红外遥测技术的基本原理

以静态固体斜楔干涉具为核心的遥测系统原理框图如图 1 所示,系统由红外望远模块、静态固体斜楔干涉具模块、非制冷红外焦平面阵列探测器(UIRFPA)和 FPGA 控制的数据采集、存储、传输模块以及 LABVIEW 上位机构成。红外望远系统收集的经待测气体吸收或辐射的光，经过准直后在静态固体斜楔干涉具中形成干涉图,通过高速数据采集、存储、处理模块后经过 USB 传输到上位机对干涉图进行显示。

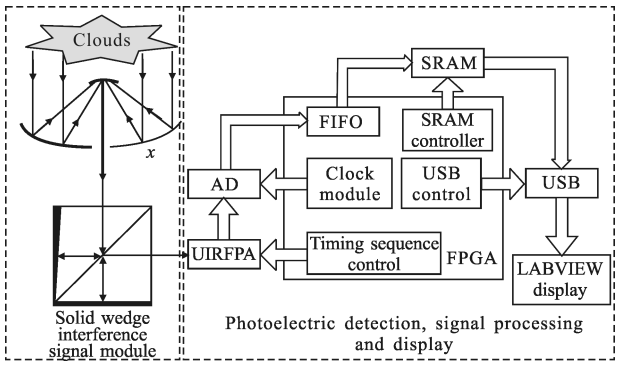


图 1 遥测系统原理框图

Fig.1 Remote-monitoring system principle block diagram

该系统中用静态固体斜楔干涉具代替传统迈克尔逊干涉具,是两块材质为 ZnSe 晶体的三角棱镜的结合体,没有机械扫描部件,提高了系统稳定性,对振动等干扰有较好的抑制作用，也满足了污染物红外特征光谱 8~14 μm 的探测范围。

静态固体斜楔干涉具由两个三角棱镜粘合而成,如图 2 所示,其中一个为等腰直角棱镜,另一个为非直角棱镜,M1 是光入射面,M2 是全反射面;M3 是全反射面,M4 是光出射面。面 M3 与 ox 轴的夹角为 α。

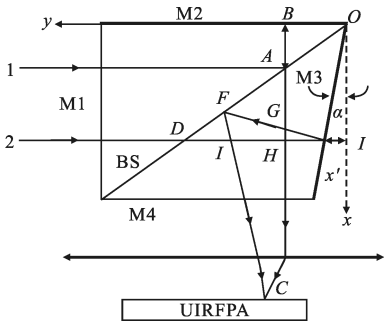


图 2 静态干涉具工作原理图

Fig.2 Static interference principle diagram

入射光 1 经 M1 入射到 BS上 A 点，被反射到 M2 面的 B 点,经 M2 全反射后透过 BS 到达 C 点;入射平

行光 2 经 M1 照射到 BS 上 D 点，经 BS 透射到达 M3 面 E 点，由于角度 的原因，光线不能沿原路返回，而是会沿相对于原路线偏转 2 的角度照射到 BS 的 F 点上，再经 BS 反射到达 C 点，与光线 1 相交，发生干涉[4-6]。

入射平行光经过干涉具后，分成的两束光具有连续光程差。其光程差为：

$$x=n\Delta l\approx 2nx'\tan\alpha \tag{1}$$

式中：n 为干涉具材料的折射率；x 为光程差。

当光程差为入射激光波长的整数倍时，即 $x=2nx'\tan\alpha=k\lambda$ 时对应的条纹为亮条纹，其中 k 为非负整数，λ 为入射激光波长。干涉条纹间距为：

$$d=\frac{\lambda}{2n}\cot\alpha \tag{2}$$

具体推导见参考文献[4]。

2 探测器驱动电路设计

设计中采用非制冷红外焦平面阵列探测器，该探测器帧频最大为 60 Hz，探测波段范围为 8~12 μm，输出电压范围为 1.0~4.2 V。可编程逻辑器件 FPGA 具有灵活、设计周期短，模块化和控制简单等特点[7-9]，因此设计中采用 FPGA 作为探测器时序驱动的主控制器。驱动电路中包含电源及偏置电压供给，控制字和工作时序电路配置，数据输出外接采集电路等部分。VDDA、VSSA、VDDL、VSSL 分别为探测器提供模拟电源、模拟地、数字电源、数字地，其中模拟电源由直流 5V 电源提供，数字电源由直流 3.3V 电源提供。探测器偏置电压 VBUS、GFID、VSK、VDET、GSK 分别按照探测器数据手册相应供给。其中，VBUS、VDET、GSK 为定值，GFID、VSK 为可调。从理论上分析偏置电压对焦平面性能的影响，并与实际情况相结合，得出较合适的偏置电压供给。

噪声等效温差(NETD)和探测器电压输出动态范围是体现平面性能的主要指标[10-11]。其中，NETD 性能与偏置电压关系如下：

$$\mathrm{NETD}=\frac{4F_{\mathrm{no}}^{2}\,\mathrm{RMS}}{A\varepsilon\pi(\mathrm{d}L/\mathrm{d}T_t)R_V} \tag{3}$$

式中：F_{no} 为 f 数；A 为像元面积；ε 为发射率；$\mathrm{d}L/\mathrm{d}T_t$ 为目标辐射在温度 T_t 时的导数；RMS 为均方根噪声电压；R_V 为电压响应率。

$$R_V=\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}Q}=V_b\frac{RR_L\alpha}{(R+R_L)2}\frac{1}{g}\left(1+\beta\frac{R-R_L}{R+R_L}\right)^{-1} \tag{4}$$

式中：V_b 为偏置电压；α 为焦平面的电阻温度系数，$\beta=\alpha\Delta\mathrm{T}$；$g$ 为焦平面的热导；R、R_L 为焦平面的阻抗和负载电阻。

由公式(3)和(4)可以看出，在电阻和温度确定的情况下，噪声等效温差(NETD)主要与偏置电压 成正比。而在此探测器中，可调电压主要有 GFID 和 VSK。因此，为了得到较好的 NETD，偏置电压越大越好。但是根据探测器的输出特性，当 GFID 管脚电压值减小时，探测器的输出动态范围会相应增大，所以必须综合考虑两方面的因素。通过实际电路测试，GFID 偏置电压在 4 V 左右时，焦平面综合性能更加优越。

3 FPGA 时序驱动控制

时序逻辑采用 FPGA 设计，与探测器的接口连接如图 3 所示。

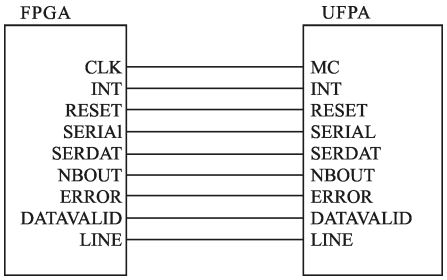


图 3 FPGA 控制 UFPA 的接口连接

Fig.3 Interface connection of FPGA and UFPA

主芯片为 Xilinx 公司的 XC2S200，在 Xilinx 12.4 软件平台下用 Verilog 语言编程。FPGA 提供控制探测器的主时钟 MC 以及 AD 采样时钟，控制 SERIAL 以及 SERDAL 管脚对内部工作寄存器配置以实现对探测器的驱动，数据在 DATAVALID 置高时稳定输出。LINE 置高时探测器一幅图的第一行数据开始输出。NBOUT 置 1 即输出通道只有 OUT1 一个。INT 代表积分时间。探测器输出每一帧 480 行，每一行 640 个有效数据。因此，AD 采集 640×480 个有效数据即可组成一幅完整的图像。时序仿真如图 4 所示。

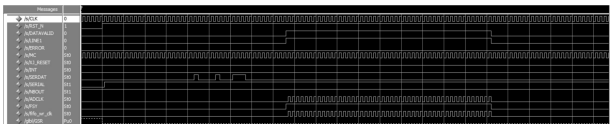


图 4 探测器时序仿真

Fig.4 Detector timing-driven simulation

非制冷红外焦平面探测器随着阵列分辨率的增

加,丢帧现象比较严重。为了保证采集到得干涉图像数据不丢失，在将数据送到上位机显示之前进行了缓存处理,FPGA 在控制数据采集的同时重复检测帧起始信号，如果存在即开始将接着采集到的一整幅数据缓存到 SRAM 中,然后通过 USB 口发送到上位机显示。FPGA 控制 USB 发送整幅图像数据的前后分别发送帧首尾字符串[12],确保上位机显示的是一幅完整的干涉图像。

4 上位机成像显示

在 FPGA 时序控制下，采集到的数据经过 SRAM 缓存后由 USB 传送到上位机 LABVIEW 进行显示。显示系统基于虚拟仪器软件开发平台 LABVIEW 进行程序开发设计,将复杂的语言编程转换为可视化的数据流编程,以图标表示功能模块,以图标间连线表示数值传输。LABVIEW 系统实时检测与分离 FPGA 通过 USB 发送的帧首尾字符串,然后接受中间的 640×480 个有效数据组成一整幅图像经由显示控件图像还原显示。程序框图如图 5 所示。

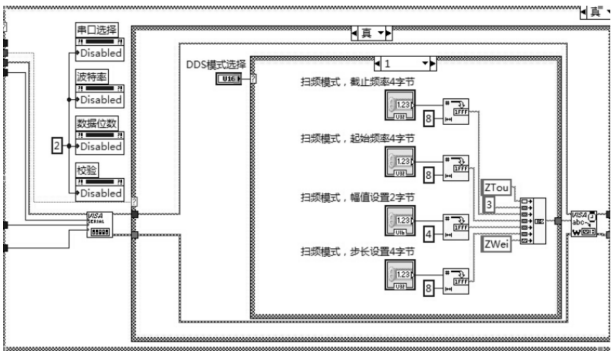
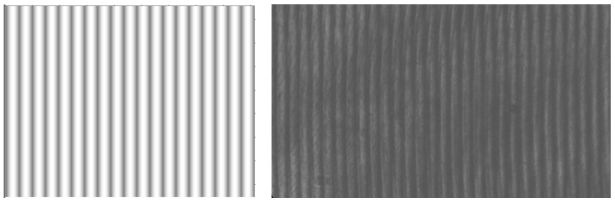


图 5　LABVIEW 显示系统程序框图

Fig.5 Program block diagram of LABVIEW display system

图 6 中,实验采用波长为 10.6 μm 的 CO_2 红外激光器作为入射光源,通过静态固体斜楔干涉具后,得到干涉条纹。从图中可以看出,实验所得干涉信号图像与仿真图像完全相似，自然光入射得到的干涉信号通过光谱反演可以得到相应的光谱信息。



(a) Matlab 干涉条纹仿真　　(b) 实验所得干涉条纹

(a) Interference fringe simulation with Matlab　　(b) Interference fringes of experiment

图 6 干涉信号采集图像显示

Fig.6 Interference signal collection and image display

5 结　论

文中在分析静态固体斜楔干涉具干涉原理的基础上，提出用非制冷红外焦平面阵列探测器对基于静态固体斜楔干涉具产生的干涉信号进行光电转换,设计了相应的硬件电路和驱动程序,并用红外激光作为光源对系统进行了成像实验,实验结果表明:可以准确的得到干涉信号的干涉条纹。根据干涉条纹的个数可以验证干涉具光程差的大小的影响,采用面探测器对静态固体斜楔干涉具的干涉条纹成像对设计干涉型成像光谱仪提供了重要参考，且算法简单,易于实现。

参考文献:

[1] Ren Manyan, Zhang Tianshu, Wang Wei, et al. The method of monitoring dimethylhydrazine basing on open path Fourier transform infrared spectrometry technology [J]. ***Infrared Technology***, 2012, 34(5): 306-309. (in Chinese)
任蔓延, 张天舒, 王薇, 等. 基于开放光路傅里叶变换红外光谱技术的偏二甲肼监测方法[J]. 红外技术, 2012, 34(5): 306-309.

[2] Liu Wenqing, Cui Zhicheng, Liu Jianguo, et al. Measurement of atmospheric trace gases by spectroscopic and chemical techniques [J]. ***Chinese Journal of Quantum Electronics***, 2004, 21(2): 202-210. (in Chinese)
刘文清, 崔志成, 刘建国, 等. 大气痕量气体测量的光谱学和化学技术[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 202-210.

[3] Zhang Jilong, Nie Hongbin, Wang Zhibin, et al. The state and developing trend of infrared spectra remote detection technology for chemical agents [J]. ***Journal of North University of China (Natural Science Edition)***, 2008, 29(3): 265-271. (in Chinese)
张记龙, 聂宏斌, 王志斌, 等. 化学战剂红外光谱遥测技术现状及发展趋势[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2008, 29(3): 265-271.

[4] Tian Erming, Zhang Jilong, Li Xiao, 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)
田二明, 张记龙, 李晓, 等. 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.

[5] Yu Benguo, Wang Jianzhong. Research on laser spectrum detecting technology based on the bilateral-wedges Fourier interferometer[J]. ***Spectroscopy and Spectral Analysis***, 2010, 30(6): 1717-1721. (in Chinese)
余本国, 王建中. 基于双边倾斜傅里叶干涉具的激光光谱探测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1717-1721.

[6] Chen Aiwu, Zhang Jilong, Liu Zhichao, et al. Double-equivalent wedge static Fourier transform interferometer[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(8): 1547-1551. (in Chinese)
陈爱武, 张记龙, 刘智超, 等. 双等效斜楔型静态傅里叶变换干涉具[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1547-1551.

[7] Guo Pan, Xu Tingfa, Ni Guoqiang. A low power wireless infrared video transmission system [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2007, 15(6): 930-934. (in Chinese)
郭磐, 许廷发, 倪国强. 一种低功耗的红外无线视频传输系统[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(6): 930-934.

[8] Guo Yongcai, Su Yuwei, Gao Chao. Design and implementation of real time infrared image collection system based on FPGA[J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2011, 32(3): 514-519. (in Chinese)
郭永彩, 苏渝维, 高潮. 基于 FPGA 的红外图像实时采集系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 514-519.

[9] Wang Yaoli, Wang Zhibin, Zhao Dong′e, et al. High-speed large-capacity storage system for photoelastic modulation[J]. ***Computer Engineering and Design***, 2013, 34 (8): 2732-2736. (in Chinese)
王耀利, 王志斌, 赵冬娥, 等. 弹光调制高速大容量存储系统[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(8): 2732-2736.

[10] Zhu Hongbin, Li Wei, Liu Ziji, et al. Design on a low-noise acquisition circuit of infrared focal plane device [J]. ***Infrared Technology***, 2010, 32(3): 165-168. (in Chinese)
祝红彬, 李伟, 刘子骥, 等. 一种低噪声红外焦平面器件采集电路的设计[J]. 红外技术, 2010, 32(3): 165-168.

[11] Zhang Pei, Zhu Hongbin, Lv Jian, et al. Design of the low noise uncooled infrared focal plane array driver circuit[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(5): 806-810. (in Chinese)
张沛, 祝红彬, 吕坚, 等. 低噪声非制冷红外焦平面阵列驱动电路的设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 806-810.

[12] Huang Shanwen, Wang Xuejun. Design of data acquisition system based on USB and FPGA [J]. ***Ship Electronic Engineering***, 2010, 30(9): 126-129. (in Chinese)
黄善文, 王学军. 基于 USB 和 FPGA 的数据采集系统设计[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(9): 126-129.