

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106200

# 基于 LabVIEW 的弹光调制型 傅里叶变换光谱实时复原\*

胡 将<sup>1,2,3</sup> 王志斌<sup>1,2,3</sup> 李克武<sup>1,3</sup> 李坤钰<sup>1,2,3</sup>(1. 中北大学 南通智能光机电研究院 南通 226000; 2. 中北大学 仪器与电子学院 太原 030051;  
3. 中北大学 前沿交叉科学研究院 太原 030051)

**摘 要:** 针对弹光调制型傅里叶变换光谱仪难以采集到一个完整周期的激光干涉信号,并且无法对其进行光谱实时复原的问题,设计了基于 LabVIEW 的弹光调制型傅里叶变换光谱实时复原。首先,选用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为光源,经过弹光调制型傅里叶变换光谱仪后,产生随时间变化的干涉信号,然后再通过光电探测器对干涉信号进行转换,获取干涉数据。最后用高速数据采集卡将数据采集下来并传输到 LabVIEW 上位机,对干涉数据进行光谱复原中的数据处理,并进行波长标定和复原分析。实验表明,对采集的单个激光在上位机 LabVIEW 能获得一个完整周期的干涉信号,并经光谱复原算法可以实时复原得到频谱图,复原激光误差小于 1 nm,半峰宽为 0.01  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 数据信号处理;弹光调制型光谱仪;非均匀采样;光谱复原

**中图分类号:** TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Real-time restoration of photo-elastic modulation Fourier transform spectrum based on LabVIEW

Hu Jiang<sup>1,2,3</sup> Wang Zhibin<sup>1,2,3</sup> Li Kewu<sup>1,3</sup> Li Kunyu<sup>1,2,3</sup>(1. Nantong Institute of Intelligent Opto-Mechatronics, North University of China, Nantong 226000, China;  
2. College of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
3. Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that it is difficult for the photo-elastic modulation Fourier transform spectrometer to collect a complete period of laser interference signal and cannot perform the real-time restoration of the spectrum, designs a real-time restoration of the photo-elastic modulation Fourier transform spectrum based on LabVIEW. First, a He-Ne laser with a wavelength of 632.8 nm is selected as the light source. After the incident laser passes through the photo-elastic modulation Fourier transform spectrometer, an interference signal that changes with time is generated, and then the interference signal is converted by a photo-elastic detector to obtain interference data. Finally, use a high-speed data acquisition card to collect the data and transmit it to the LabVIEW host computer, perform data processing in the spectrum restoration of the interference data, and perform wavelength calibration and restoration analysis. Experiments show that LabVIEW can obtain a complete cycle of the interference signal from the collected monochromatic laser on the host computer, and the spectrum restoration algorithm can be used to restore the spectrogram in real time. The error of the restored laser is less than 1 nm, and the half-peak width is 0.01  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** data signal processing; photo-elastic modulation spectrometer; non-uniform sampling; spectral restoration

### 0 引 言

弹光调制型傅里叶变换光谱仪具有探测速度快、可探测光谱范围宽、分辨率高等各种优点,可实现爆炸、燃烧等

高速探测应用环境下的测量,并且应用范围比较大。其可以用于太空探测、环保监控、工业生产等瞬态光谱探测领域<sup>[1-3]</sup>。

弹光调制型傅里叶变换光谱仪对入射激光得到的干涉

收稿日期:2021-03-29

\* 基金项目:山西省青年科学基金(201901D211234)、山西省自然科学基金(201901D111145)项目资助

信号进行实时数据处理研究,可以复原出来精度较高,分辨率较好的光谱,从而实现了快速、现场、非接触式光谱测量,得到物质的光谱复原数据来进行分析,可用于 CO<sub>2</sub>、CO 等气体成分测量,爆炸场高温探测等领域。随着科学技术的发展和探测环境复杂度的提高,对光谱探测技术的实时性和快速准确性方面有了比较大的要求。弹光调制器是弹光调制型傅里叶变换光谱仪中的非常重要的构成部分。其调制频率高,其中光程差呈非线性,产生的干涉数据也是非线性变化的<sup>[4-7]</sup>,因此不能直接利用快速傅里叶变换(FFT)来对干涉数据进行处理,使得弹光调制数据实时处理要求难以满足。

最早对弹光调制傅里叶变换光谱仪进行研制的是美国 Los Alamos 国家实验室<sup>[8]</sup>,并将其运用到生物识别领域。在国内,天津大学胡森等对弹光调制技术有一定的研究,并将其用于红外光谱吸收方面<sup>[9]</sup>,另外主要还有中北大学光电信息与仪器工程技术研究中心在进行有关弹光调制的干涉信号采集和光谱复原处理研究。中北大学张敏娟等对光程差较大的弹光调制光谱复原算法有些研究<sup>[10]</sup>。然而,在弹光调制干涉信号频率高、数据量大时,且对光谱复原实时性有一定的要求时,须采用可以高速实时采集的系统。目前弹光调制干涉数据处理系统主要有两种,中北大学王明艳、王丽等主要通过数字信号处理器(DSP)和 SOPC(system on a programmable chip)嵌入式软核等来实现<sup>[11-12]</sup>,其复杂的数据处理过程,在硬件中实现起来较为复杂,信息处理过程简洁性不高,SOPC 技术运行不稳定,在 FPGA 嵌入软核性能还比较低下,且二者系统主频都只是几百 MHz,实现速度不够快,实时性不好。在干涉信号频

率较高,数据量较大时,耗费的资源比较多。

为了实时获取干涉数据并对其实时处理,本文提出了一种由高速采集卡与上位机组成的软硬件相互协调的实时处理系统。由高速数据采集卡采集激光信号,再传输到上位机 LabVIEW 中进行数据处理来完成光谱复原工作,该系统采集干涉数据量大、实时性高、测量速度快具有相当重要的科研价值和实际应用价值。

## 1 原 理

### 1.1 弹光调制型傅里叶变换光谱仪的工作原理

弹光调制型傅里叶变换光谱仪与传统傅里叶变换光谱仪相比,其是用压电石英晶体为主要成分的弹光调制晶体来代替机械式可变动扫描结构<sup>[13-14]</sup>,两侧的驱动电压可以作用于晶体,使之发生形变,从而振动起来,这是新型的弹光调制型傅里叶变换光谱仪(PEM-FTS)与传统的主要区别。

弹光调制型光谱仪的关键部件是弹光调制模块,它主要是由弹光双折射石英晶体和压电晶体组成的,其工作原理是在由外部规律性高压信号来作用到压电晶体,在产生的规律性变化驱动下,弹光晶体发生形变,两个相互垂直方向的折射率有了改变,当光在其中传输时,光程差随之变化。弹光调制器的性能与驱动信号、压电晶体和弹光晶体的性质以及它们的结合效率有关<sup>[15-16]</sup>。

随着科学技术的发展以及对光谱复原的实时性要求的提高,对高分辨率弹光调制型傅里叶变换光谱仪的数据处理技术进行研究很有必要。如图 1 所示,即为弹光调制型傅里叶变换光谱仪的结构原理。

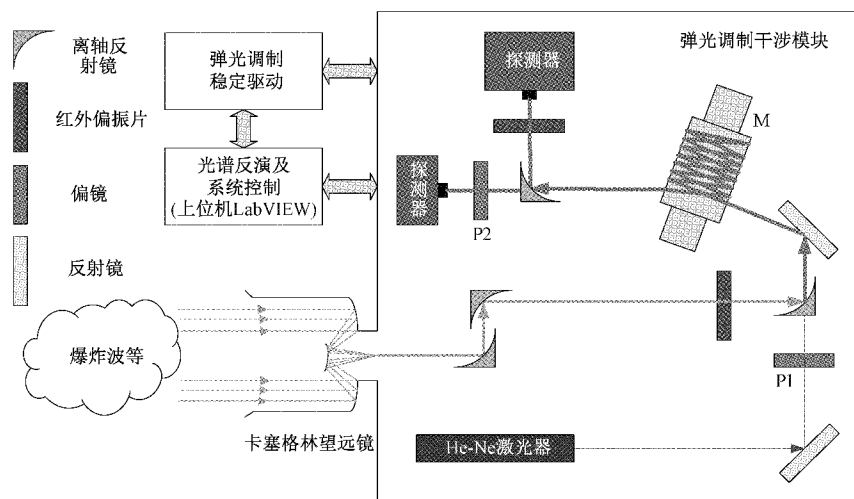


图 1 弹光调制型傅里叶变换光谱仪结构原理

如图 1 所示,当氦氖激光器(He-Ne)激光器发出的光经过起偏器 P1 和反射镜,到达弹光调制器 M 后,由于弹光晶体的双折射效应,从而形成两束相互垂直的干涉光,其中 1 束光再经过检偏器 P2,由探测器得到干涉信号,通过高速采集卡采集 632.8 nm 的激光干涉数据,并对干涉数据缓存

和传输到上位机进行实时处理,复原出波长为 632.8 nm 的激光光谱。干涉数据是时域内的采样得到的非等间隔的信号,经过如下变换公式得到频域上复原的光谱图:

$$I_i(\omega) = \int_0^{T_0} I_o(t) \cos[2\pi B l \omega \sin(\omega_0 t)] dt \quad (1)$$

其中,

$$I_o(t) = \int_0^\infty I_i(\omega) \cos\left[2\pi \frac{l(n_o - n_e)}{\lambda}\right] d\omega = \int_0^{\omega_0} I_i(\omega) \cos\left[2\pi \frac{l\Delta n}{\lambda}\right] d\omega = \int_0^{\omega_0} I_i(\omega) \cos[2\pi Bl\sigma \sin(\omega_0 t)] d\omega \quad (2)$$

式中:  $\Delta m = B \sin(\omega_0 t)$  为折射率差值;  $B$  为双折射率差的最大值;  $\omega_0$  是调制信号角频率;  $l$  为弹光晶体的厚度<sup>[16-17]</sup>;  $I_i(\omega)$  是入射激光数据;  $T_0$  为调制信号周期;  $\omega$  为波数;  $L = Bl$  为干涉信号的瞬态最大光程差。

### 1.2 干涉数据算法处理原理

由于入射光是在弹光晶体内进行多次反射,产生的光程差不是线性变化的,干涉数据不满足快速傅里叶变换(FFT)

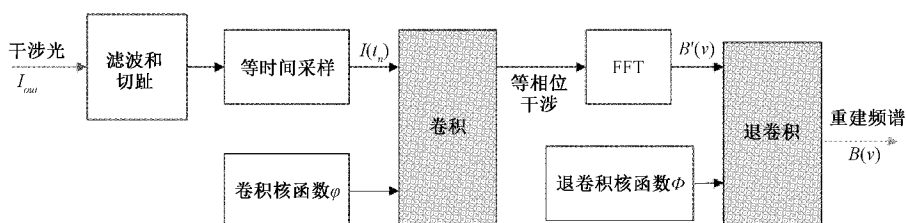


图 2 NUFFT 算法流程

在式(3)中,等时间采样得到的非均匀原始  $M$  个点用如下公式表示:

$$f(x) = \sum_{j=0}^{M-1} f_j \delta(x - x_j) \quad (4)$$

$\delta(x)$  是狄拉克函数。 $f(x)$  不满足笛卡尔网格条件,需做如下处理:

$$f(x) = f(x) * g(x) = \int_0^\infty f(y) g_\tau(x - y) dy \quad (5)$$

式中:  $g(x)$  为高斯函数。

根据卷积后的  $f(x)$  平滑性质,来定义  $x$  轴上的离散均匀采样函数:

$$f_\tau(m\Delta x) = \sum_{j=0}^{N-1} f_j \cdot g_\tau(m\Delta x - x_j) \quad (6)$$

这样就可直接对  $f_\tau(m\Delta x)$  进行 FFT 算法,再进行退卷积得到非等间隔的数据的频域函数:

的条件,会导致光谱复原出错,因此采用适合于非等间隔数据的非均匀快速傅里叶变换算法(NUFFT)来复原光谱。

要对采样得到的原始干涉数据进行光谱复原,首先要找到离等间隔点最近的非等间隔点,再进行插值处理得到等间隔的干涉数据。算法中还包括滤波切趾处理,再用求模法进行相位校正,最后复原出光谱图。从算法的本质上来讲,首先就是与高斯函数卷积,来平滑处理数据,得到等间隔的数据,最后进行退卷积,重建非均匀信号的频谱<sup>[17-20]</sup>。NUFFT 算法流程步骤如图 2 所示。

对 NUFFT 算法分析如下,即有:

$$F(d) = \sum_{j=0}^{M-1} f(x_j) e^{-idx_j} \quad (3)$$

$$d = -M_r/2, \dots, M_r/2 - 1$$

其中,  $M_r$  为插值后均匀分布的等光程差点数。

$$F(d) = \frac{1}{2\sqrt{\tau\pi}} e^{d^2\tau} F_\tau(d) \quad (7)$$

## 2 基于 LabVIEW 的采集系统设计

数据采集系统选用采样频率最大可达 1 GHz 的高速数据采集卡,采样位数为 16 bit,来采集激光的干涉信号。系统启动程序后,干涉信号先经过滤波放大等预处理过程,LabVIEW 再通过高速数据采集卡完成对干涉信号的采集,其中高速采集卡的外部触发由调制驱动信号提供,将采集到的干涉数据在采集卡中缓存后,通过 PCIE 接口传到上位机 LabVIEW 进行算法处理,根据外部触发帧头检测出一个周期的数据,并在上位机中过零比较得到干涉峰的个数,从而计算出干涉信号的瞬态最大光程差;结合第 1 路瞬态最大光程差数据,采用 NUFFT 算法进行数据处理,并进行波长标定,复原出频谱图。如图 3 所示为 LabVIEW 上位机控制图。

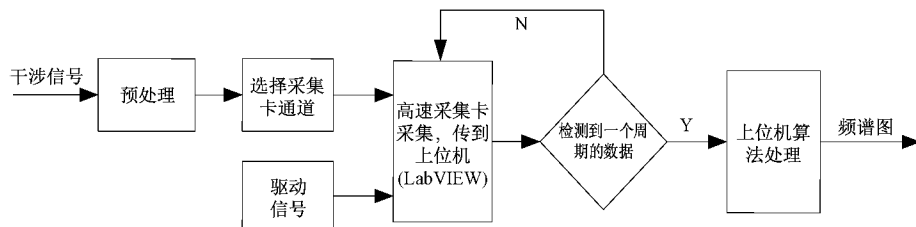


图 3 LabVIEW 上位机控制图

### 2.1 数据采集模块设计

本实验中,上位机 LabVIEW 通过应用程序接口(application programming interface, API)路径选择采集卡

相对应的动态链接库(DLL),采样率设置成与下位机一致,为 1 GHz,采样时钟为内部时钟,匹配到一致的板卡类型,为了实时性系统的要求,设置 ADC 的工作模式为 fifo

multi,即多段缓存。方波信号由外触发通道进入高速采集卡,当检测到上升沿到来,外部信号为高电平时,开始采集干涉信号,下降沿到来后,外部信号为低电平,停止采集。通过控制外部方波信号的周期和占空比来设置每次采集

的干涉数据的长度,板载 DDR3 存储器缓存数据,之后把每次采集的数据传输到上位机内存。上位机 LabVIEW 可以把每次触发采集的干涉数据导出到电脑硬盘中,储存下来,供后续分析数据来使用,如图 4 所示。

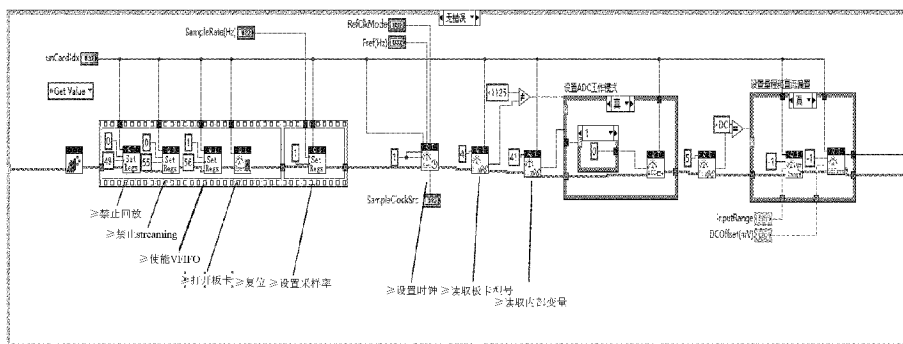


图 4 采集模块程序框图

因为上位机的数据是硬件采集卡传输上来的,且由连续的方波信号触发,上位机的缓存区里一直有数据存在,为了准确提取一周期的数据,设置触发长度为 50 000 个点,晶体谐振频率为 50 kHz 左右,因此触发源使用 50 kHz 频率的驱动电压作为外部触发源,触发条件为高电平采集。

### 2.2 帧检测模块

由 50 kHz 频率的驱动电压提供触发信号,并设置外部触发,每一次触发采集数据前添加帧头,由驱动电压提供触发来保证采集一个整周期的数据。由采样率可得采一个点为 1 ns,驱动电压高电平持续时间为 10  $\mu$ s,可计算得到单周期干涉信号数据量为 10 000 个。

高速采集卡存在一个上位机设置的时间戳接口,因此可自行产生一个时间戳信息,逻辑会在每次触发的时候按

指定间隔将该时刻的时间戳信息嵌到 AD 数据里,时间戳信息中必须插入一组 AD 数据中不可能出现的数据组合,作为帧头,然后在上位机软件中通过帧头来提取一个完整周期的数据来做算法复原。

若配置数据帧头为连续的两个 FF,则帧检测模块用搜索一维数组的 VI 函数判断采回来的数据流中是否存在连续的 FF 数据,找到两个帧头元素的索引后,则两个帧头之间的数据为一个周期的干涉数据。上位机 LabVIEW 采用 while 循环和移位寄存器来对数据流中的数据进行连续搜索,避免错过数据。提取出来一周期的数据后,跳出 while 循环,开始在数据处理模块进行算法复原,否则继续对到来的数据进行搜索帧头。判断数据处理完后,再继续进行搜索,提取下一个周期的数据,如图 5 所示。

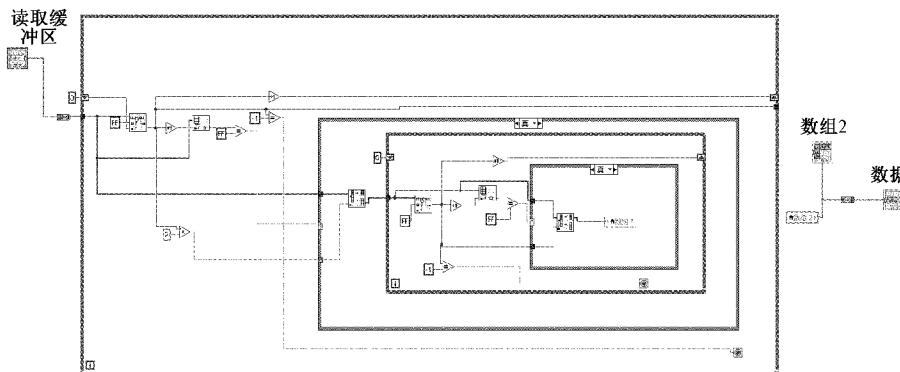


图 5 帧检测程序框图

### 2.3 数据处理模块设计

数据处理模块是将采集得到的非等间隔采样干涉信号数据流传输到 matlab 脚本,为了保证光谱分辨率,光谱复原时不发生错误,在其中加入 NUFFT 算法来对数据进行处理,由于是顺序式平铺结构,数据处理完得到频谱图,才能继续往上位机里传输数据,来达到光谱复原实时

处理。

通过帧检测的方式找到一帧完整的数据,之后传递到 matlab 脚本进行处理,算法中包含有数字滤波程序,将杂波滤除掉,来更精确地进行瞬态最大光程差的计算,来进行波长标定,如图 6 所示为上位机数据处理部分程序框图。





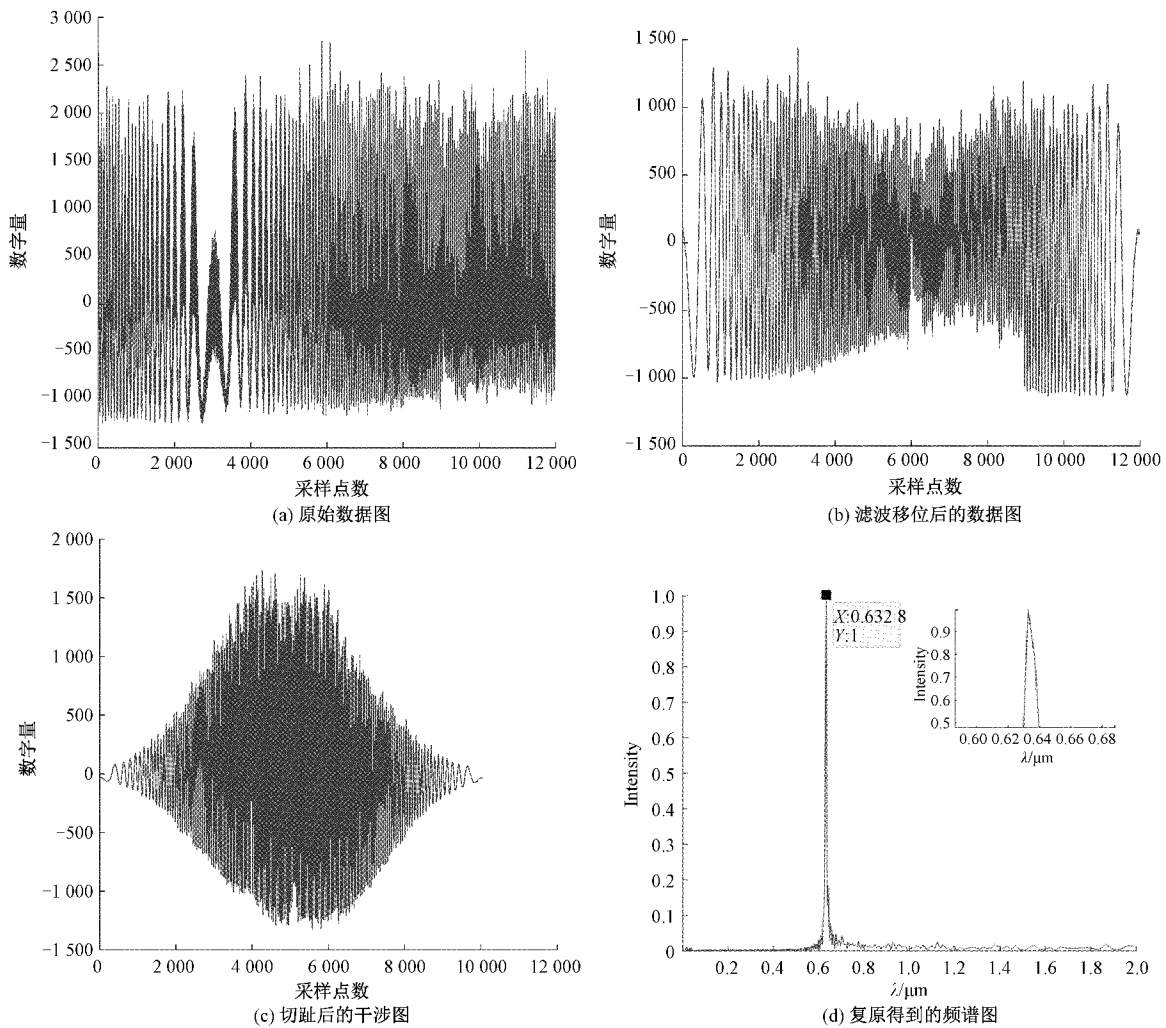


图 8 632.8 nm 激光的测试结果

## 4 结 论

本文设计了基于 LabVIEW 的弹光调制型傅里叶变换光谱实时复原系统,能够完整地提取出一个周期的数据,并对 632.8 nm 的激光的干涉数据采用 NUFFT 算法实时地进行了光谱复原,并分析了复原出来的频谱图波长与激光的实际波长的误差,结果表明,基于 LabVIEW 的光谱实时复原系统稳定可靠。在这套光谱实时复原系统中光谱复原虽然还有相关问题,如不能脱机,便携性差,反演的光谱分辨率还有待提高,但是操作简单,实时性好,为弹光调制型傅里叶变换光谱仪的数据处理领域提供了参考。

### 参考文献

- [1] 王明艳,王志斌,张记龙,等.基于 DSP 的弹光调制干涉具干涉数据的实时处理系统[J].光电子技术,2013,33(1):41-44.
- [2] 李珊,陈媛媛,王志斌,等.弹光调制傅里叶变换光谱相位校正及 DSP 实现[J].光谱学与光谱分析,2017,37(2):374-378.
- [3] 张敏娟.弹光调制傅里叶变换光谱复原高速数据处理技术研究[D].太原:中北大学,2013.
- [4] MU T K, ZHANG C M, REN W Y, et al. Static polarization-difference interference imaging spectrometer[J]. Optics Letters,2013,37(17):3507-3509.
- [5] 岳保旺,丁伟杰.基于改进型弹光调制结构的 VOC 气体浓度检测系统[J].光谱学与光谱分析,2017,37(1):232-235.
- [6] 王明艳.基于 DSP 的弹光调制非均匀干涉信号获取及反演算法研究[D].太原:中北大学,2013.
- [7] 陈旭,夏果,马艳,等.基于 FPGA 的光谱数据采集系统设计[J].电子测量技术,2019,42(14):157-162.
- [8] 刘顺,李晓,王志斌,等.基于弹光调制旋光测量的信号解调系统[J].传感技术学报,2016,29(7):1021-1025.
- [9] BUICAN T N. High retardation-amplitude photoelastic modulator;EP2271962(A1)[P].2010-07-27.
- [10] DIEGO L, GARCIA G, JACQUELINE S, et al. Principles, performance, and application of spectral

- reconstitution(SR) in quantitative analysis of oils by fourier transform infrared spectroscopy(FT-IR)[J]. Applied Spectroscopy, 2013,64(4):448-456.
- [11] 陈明星,朱灵,张龙,等. 基于 LabVIEW 的光纤傅里叶变换光谱仪数据处理技术[J]. 仪器仪表学报,2010,31(3):488-492.
- [12] 朱超,鲁昌华,刘文清,等. FTIR 干涉图相位校正技术的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(7):663-668.
- [13] 刘文敬,张敏娟,李晋华,等. 一种基于占空比自动调节的弹光调制器稳定控制方法[J]. 国外电子测量技术,2020,39(8):17-21.
- [14] 杜鹏飞. 弹光调制干涉信号的高速数据处理系统设计与实现[D]. 太原:中北大学,2015.
- [15] 王志斌,张瑞,赵冬娥,等. 光弹调制差频偏振测量及误差分析[J]. 光学精密工程,2013,21(4):876-883.
- [16] 景宁,王志斌,张记龙,等. 弹光调制非线性光程差干涉信号的快速反演[J]. 激光技术,2012,36(2):271-274.
- [17] 张敏娟,刘文敬,王志斌,等. 弹光调制器的频率漂移特性及其傅里叶变换光谱的稳定性研究[J]. 红外与激光工程,2020,49(10):219-226.
- [18] 王楠. 微小双折射参量检测的关键技术研究[D]. 太原:中北大学,2020.
- [19] 吕润发. 基于 FPGA 数字锁相实现的弹光调制测旋光技术研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [20] 亢帅,王志斌,张敏娟,等. 弹光调制干涉信号放大滤波电路设计[J]. 电子技术应用,2015,41(11):45-47,50.

#### 作者简介

胡将,硕士研究生,主要研究方向为高速数据采集、光谱复原处理。

E-mail:2825149673@qq.com

王志斌,教授,硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail:wangzhibin@nuc.edu.cn