

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108492

小型化四通道光纤法珀传感器解调系统设计*

韩超 左方俊 任乾钰 贾平岗

(中北大学电子测试技术重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对目前多通道光纤法珀压力传感器解调系统体积大、功耗高的不足,提出一种通过 MEMS 光开关快速连续切换实现四通道解调的方法,选用了一款低功耗 CMOS 图像传感器 S11639 并搭建了以 FPGA 为核心的硬件解调电路,通过编写 S11639 及 AD9826 驱动程序完成多通道切换逻辑约束以及干涉光谱的采集,最后经过数据处理和传输部分将各通道所接传感器的腔长在上位机中实时显示。利用标准解调仪器确定标定系数并对 4 个通道所连接的传感器进行腔长的实际测量,腔长测量过程中均无跳点,说明设计的四通道解调系统标稳定性较好,误差较小。根据测量数据计算出每个通道的非线性度,4 个通道中最大的非线性度为 0.93%,同时每个通道的解调速度也能够达到 10 Hz。

关键词: 四通道;小型化;MEMS 光开关;光纤法珀压力传感器;S11639

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design of miniaturized four channel fiber Fabry-Perot sensor demodulation system

Han Chao Zuo Fangjun Ren Qianyu Jia Pinggang

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Considering the shortcomings of large volume and high power consumption of the current multi-channel fiber Fabry-Perot pressure sensor demodulation system, proposes a method to realize four channel demodulation through rapid and continuous switching of MEMS optical switch, selects a low-power CMOS image sensor s11639, and constructs a hardware demodulation circuit with FPGA as the core, The multi-channel switching logic constraints and the acquisition of interference spectrum are completed by writing S11639 and AD9826 drivers. Finally, the cavity length of the sensor connected to each channel is displayed in real time in the host computer through data processing and transmission. The calibration coefficient is determined by the standard demodulation instrument, and the cavity length of the four pressure sensors connected to the access is actually measured. There is no jumping point in the process of cavity length measurement, which shows that the four channel demodulation system designed has good calibration stability and small error. The nonlinearity of each channel is calculated according to the measured data. The maximum nonlinearity of the four channels is 0.93%, and the demodulation speed of each channel can also reach 10 Hz.

Keywords: four channels; miniaturization; MEMS optical switch; optical fiber Fabry-Perot pressure sensor; S11639

0 引言

随着对光纤传感技术的深入研究,光纤法珀传感器因其耐高温、抗辐射、体积小等优点^[1-3],被使用在石油井下、核电压水堆堆内、涡扇发动机燃烧室内等极端环境下^[4],用于监测压力、应变、振动、位移等物理量^[5]。光纤法珀压力传感器不仅能够应用在各种极端环境下,而且还能保持很高的测量精度。由于光纤法珀压力传感器只能实现

单点测量,所以使用在多点压力测量的场景下时,如果每一个传感器搭配一套解调系统,在成本、体积、功率等方面都无法满足测量要求,后端解调仪器小型化、多通道、低功耗的需求越来越迫切^[6]。目前实现多通道测量的方法多种多样,直接采用多套单路解调模块拼凑成多通道的方法能够达到较高的解调速度,但是想要减小体积和功耗却非常困难;每个通道搭配不同中心波长光源的方法能够将多个法珀压力传感器反射回来的光信号耦合到一个通道上进行

收稿日期:2021-12-01

* 基金项目:国家自然科学基金(52075505)、国家科技重大专项(J2019-V-0015-0110)资助

解调^[7],这种方法可以有效地缩小体积,但是需要采用波长范围互相不重叠的多个光源,而且还要求图像传感器有很宽的光谱响应范围。本文采用的方法是利用 MEMS 光开关以微小间隔时间切换来实现通道的连续扫描,从而实现光路和解调电路的复用,由于 MEMS 光开关的体积和功率都较小,所以这种方法的可行性很高。

1 光路原理分析

本系统采用的解调方法为非扫描式相关解调,整体的解调过程为一个光学的相关运算,数学模型如式(1)所示^[8]。

$$I_{out}(x) = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2R_1 \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)\right)}{1 + R_1^2 + 2R_1 \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)} \cdot \frac{(1 - R_2)^2}{1 + R_2^2 + 2R_2 \cos\left(\frac{4\pi x \tan\theta}{\lambda} L\right)} I_0(\lambda) d\lambda}{(1)} \quad (1)$$

其中, $I_{out}(x)$ 为干涉信号的强度, $I_0(\lambda)$ 为输入光强, $\lambda_{max}, \lambda_{min}$ 为输入光源的波长范围, R_1 为传感器端面的反射率, R_2 为光楔玻璃片内侧表面反射率, L 为法珀传感器的腔长, θ 为光楔两片玻璃片之间的夹角。则光楔两片玻璃片之间的间隙为 $x \tan\theta$, 当所测传感器的腔长与光楔两片玻璃片之间的间隙相等时,会在对应的位置出现干涉信号光强的最大值^[9],干涉信号的仿真信号如图 1 所示。

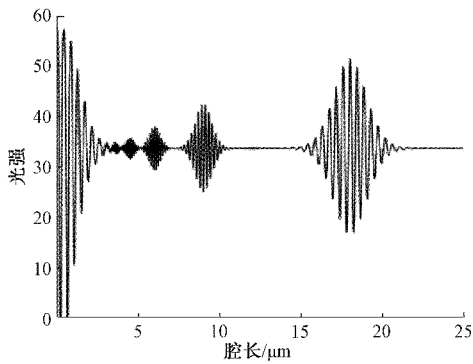


图 1 干涉信号仿真

光路系统图如图 2 所示,光路部分光源采用的是卤钨灯,该光源相比其他 LED、SLD 等光源,在光谱范围内光强整体变化缓慢,产生的干涉信号主峰更为突出,利于解调,适合作为解调系统的宽带光源^[10]。卤钨灯发出的复色光首先通过 1X2 耦合器,再进入 4 通道 MEMS 光开关已经选通的通道并耦合到对应通道连接的光纤法珀压力传感器内部,在传感器内部发生多光束干涉,携带光纤法珀压力传感器腔长信息的光信号经过原来的 MEMS 光开关通道返回到凹面镜,通过凹面镜的整形转换成线性光,透过光楔被线阵 CMOS 图像传感器接收。

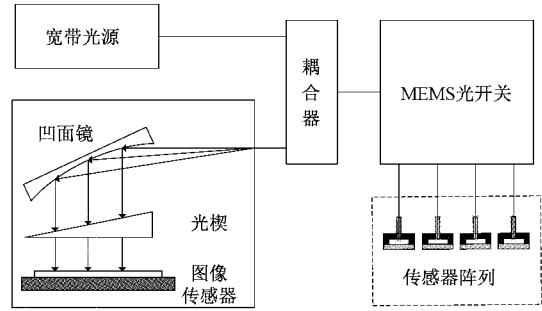


图 2 光路系统

2 解调电路分析

主控芯片采用的是 Xilinx 公司的 Spartan-6 系列的 XC6SLX45 芯片,这款 FPGA 芯片具有低成本高密度的优点,由于采用了 45 nm 低功耗铜技术,所以在功耗方面也有很大的改善^[11],具有很高的性价比。图像传感器选用的是滨松公司的 CMOS 图像传感器 S11639,该款图像传感器有效像元的数量为 2 048 个,光谱响应范围为 200~1 000 nm,光灵敏度达到 1 300 V/(lx·S),转换效率为 25 $\mu\text{V}/\text{e}^-$,并且 CMOS 图像传感器的功耗远低于 CCD 图像传感器,符合低功耗的设计要求。硬件系统主要由 CMOS 图像传感器驱动、信号调理、A/D 转换、USB 数据传输这 4 个部分组成,系统硬件结构如图 3 所示。

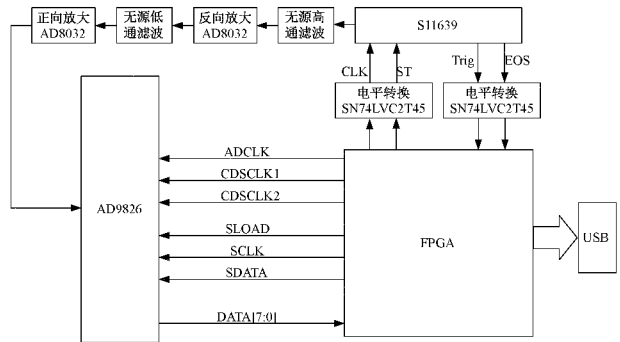


图 3 系统硬件结构

2.1 图像传感器驱动

S11639 图像传感器的供电比较简单,只需要一个 +5 V 电压。输入的时钟信号 CLK、启动信号 ST 以及输出的触发信号 Trig、扫描结束信号 EOS 的高电平等于 S11639 的供电电压,低电平为 0 V,而 FPGA 输入以及输出信号标准电平为 3.3 V,二者之间无法直接连接,所以需要在 S11639 和 FPGA 之间加入电平转换的部分,所采用的芯片是 SN74LVC2T45,该芯片是具有可配置电压转换和三态输出的 2 位双电源总线收发器,信号的转换频率能够达到 62.5 MHz,满足转换的速度要求。

2.2 信号调理

由于 AD9826 的输入电压范围为 0~4 V,图像传感器输出的原始信号无法满足 AD9826 采集的条件,所以需要

进行信号调理,原始信号首先通过一阶无源高通滤波电路,将信号中的直流分量和低频噪声滤除,同时将原始信号的基准电压调整到 2.5 V,再通过运算放大器 AD8032 构成的反向放大电路将原始信号反向,并使用电位计调整到合适的放大倍数。为了滤除原始信号中的低频噪声,需要将信号通过一阶无源低通滤波电路,考虑到低通滤波同样会使信号产生一定削弱,所以需要再在后面加入一个由 AD8032 构成的可调放大倍数正向放大电路。原始信号以及经过信号调理部分之后的信号如图 4 所示。

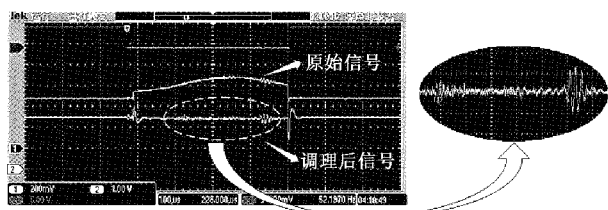


图 4 信号调理前后示波器图像

2.3 A/D 转换

数模转换部分采用的 ADI 公司的 CCD 成像前端芯片 AD9826,AD9826 芯片集成了 16 位 ADC,单通道速度可以达到 12.5 MSPS^[12]。根据设计要求,需要先通过三线串行接口(SLOAD,SCLK,SDATA)配置 AD9826 内部的配置寄存器 D[8:0]为 011001000、MUX 配置寄存器 D[8:0]为 011000000,以此来设置参考电压为 4 V、工作模式为 SHA、VINR 单通道工作。在 SHA 的工作模式下,对 CMOS 像元输出的信号电平进行采样^[13],转换后的 16 bit 数据会在 ADCLK 的上升沿输出高 8 位数据,下降沿输出低 8 位数据,FPGA 内部将高低 8 位数据拼接成 16 位数据进行后续的处理。

2.4 USB 数据传输

在完成 FPGA 内部数据处理以后,将峰值位置数据前 2 位作为通道数来实现数据分流,上位机在接收峰值位置数据以后通过判断数据的前 2 位实现不同通道的单独显示,数据传输结构如图 5 所示。

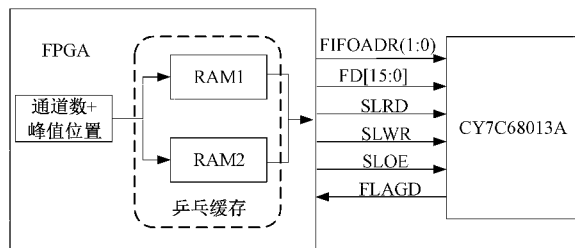


图 5 数据传输结构

USB 传输采用的是 Cypress 公司的 FX2 系列 CY7C68013A 微处理器,支持 480 Mb/s(即 USB2.0)高速传输^[14]。由于峰值位置数据存入较快,所以使用 2 个 RAM 进行乒乓缓存的方式进行读写,CY7C68013A 工作在 SLAVE FIFO 模式下,通过 FLAGD 标志信号来判断

FIFO 是否写满,未写满时通过 SLWR 写使能将数据写入 FIFO 中,最后打包传输到 PC 的上位机中显示。

3 驱动逻辑设计

由于 MEMS 光开关本身的限制,光开关切换通道需要一定时间,所以准确的采集到干涉的光信号,光开关切换通道的过程中无法进行 CMOS 图像传感器的积分过程,只有等到光开关稳定下来以后,才可以开始积分过程并通过 AD9826 转换成可处理的数字信号,S11639 的驱动时序、光开关通道控制时序以及 AD9826 的采集时序需要严格遵守驱动逻辑约束。编写 Verilog 程序并经过 Modelsim 软件仿真得到的时序波形仿真图如图 6 所示。

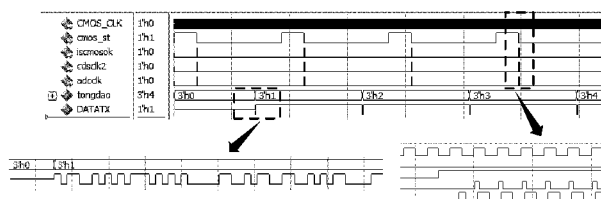


图 6 时序仿真图

当 FPGA 对光开关发出切换通道命令并且光开关通道完成切换以后,图像传感器可以开始积分过程,S11639 的积分时间通过 ST 高电平持续时间来控制,当启动信号 ST 拉低时,最先开始输出的 87 个像元为哑像元,不能作为 AD9826 采集的信号,需要等到经过 87 个时钟周期 iscmosok 信号拉高时,标志着此时 S11639 开始按 2 048 个像元依次输出信号,这时需要 AD9826 按照 SHA 模式采集每个像元的输出信号,设置采样时钟 cdclk2 为 CMOS_CLK 信号高电平的位置,CMOS_CLK 信号高电平位置对应着每个像元的输出位置,依次完成对每个像元信号的采样,ADCLK 的上升沿为 cdclk2 的高电平中间位置,目的是在 AD9826 采样完每个像元后在 ADCLK 的上升沿输出采样结果的高 8 位,下降沿输出采样结果的低 8 位,然后在 FPGA 内部拼接成 16 位数据并进行下一步的操作。等到一帧数据采集完毕,FPGA 控制光开关切换下一个通道,开始下一个通道的信号采集,从而实现连续扫描的目的。

系统的解调速度受传感器强度、光源功率、MEMS 光开关通道切换时间以及图像传感器的积分时间影响,在前 3 种影响因素确定的情况下,为了获得理想的干涉信号,需要适当调节图像传感器的积分时间。本系统通过调节积分时间,每个通道解调速度最高可以达到 10 Hz。

4 测量及腔长标定

解调系统实物图如图 7 所示,左侧的电路部分采用电路板叠加的方法进行布局,最上面一层摆放 MEMS 光开关以及光源,中间一层包含电源、信号调理、A/D 转换以及 USB 传输部分,底层为 FPGA 及其外围电路。右侧的光学模块与解调电路使用插件连接,整体解调系统体积较小,集成度较高。

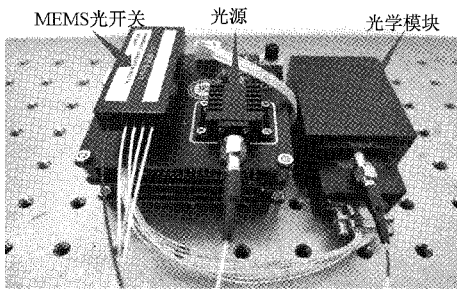


图 7 解调系统实物图

系统测量得到的数据为干涉峰峰值位置像元,要想得到准确的腔长信息,需要进行像元和腔长之间的标定。使用标准解调仪测得传感器的腔长和本系统任意一个通道测量得到的干涉峰峰值位置像元与压力的对应关系如表 1 所示。

表 1 峰值位置像元和标准解调仪测得腔长对应关系

表压/MPa	峰值位置/像元	标准腔长/nm
0	1 797.8	17 280
1	1 744.4	16 795
2	1 689.9	16 313
3	1 636.8	15 849
4	1 584.8	15 406
5	1 532.3	14 954
6	1 479.3	14 503

通过 MATALB 的 Curve Fitting Tool(曲线拟合工具),将本文系统测量峰值位置像元作为 X 参数,标准仪器测得腔长作为 Y 参数,进行二次拟合,拟合结果如图 8 所示,得到拟合曲线的二次项系数 $p_1=0.001\ 007$,一次项系数 $p_2=5.4$,常数项 $p_3=4\ 312$ 。

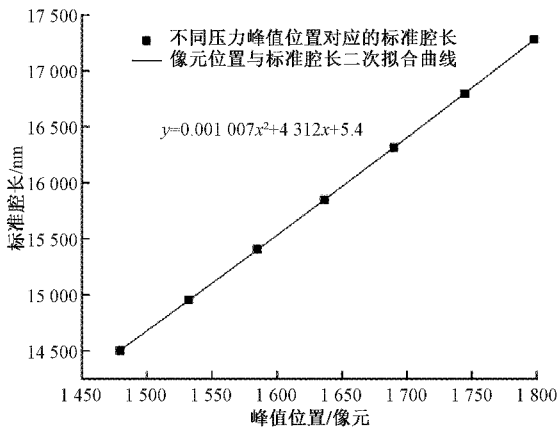


图 8 峰值位置像元和标准解调仪测得腔长拟合曲线

四通道传感器腔长采集上位机界面如图 9 所示,每个通道连续采集 50 个点,采集到的腔长均无跳点、断点,说明系统达到了测量腔长的预期并且稳定性较好。

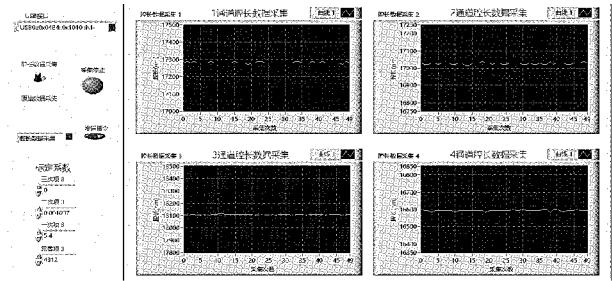


图 9 上位机腔长采集界面图

4 个通道依次接同一个传感器并通过气压泵给传感器施加 0~6 MPa 的压力,用本文设计的解调系统测得每个通道所接传感器的腔长与压力对应关系如表 2 所示,本文设计的系统与标准解调仪器测得的腔长最大差值为 9 nm,误差较小。

表 2 标定后测得腔长与压力对应关系

表压/MPa	通道 1/ nm	通道 2/ nm	通道 3/ nm	通道 4/ nm	最大差值/ nm
0	17 277	17 281	17 282	17 275	5
1	16 791	16 796	16 798	16 795	4
2	16 312	16 310	16 309	16 312	4
3	15 846	15 845	15 846	15 845	4
4	15 397	15 398	15 398	15 397	9
5	14 949	14 949	14 950	14 947	7
6	14 505	14 504	14 502	14 500	3

系统测得腔长数据的非线性度可以衡量仪器的输出量与输入量实际校准曲线与理论直线的吻合程度^[15]。对每个通道测得的腔长数据按最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如图 10 所示,每个通道测量的腔长和压力有着明显的线性关系。

计算出每个通道测试点与线性拟合后的对应点最大偏差值 ΔY_{\max} 、满量程输出 Y,由式(2)可计算得到非线性度 δ 。

$$\delta = \Delta Y_{\max} / Y \times 100\% \quad (2)$$

经过计算比较,4 个通道测得数据线性拟合以后最大的非线性度为 0.93%。

5 结 论

本文针对光纤法珀压力传感器腔长测量,通过 MEMS 光开关的连续扫描,实现了光路和解调电路同时复用的微型化四通道解调系统设计,完成了光学系统搭建、硬件电路设计、驱动程序编写、数据处理与传输,最后通过标准解调仪器进行标定并将每个通道所测得的传感器腔长在上位机中实时显示。由于采用光开关实现光路和电路的复用,本系统具有成本更低、功耗更小、体积更小的优点,这使得其

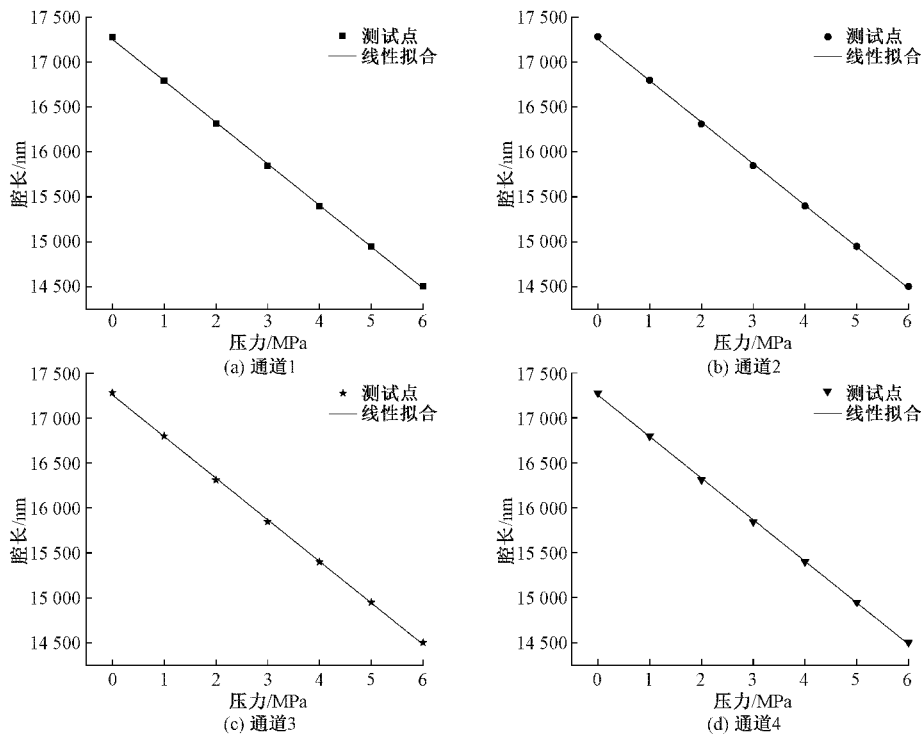


图 10 4 个通道线性拟合直线

在各种极端环境下对光纤法珀压力传感器的测量有着一定的应用前景。

参考文献

[1] 段雅楠,王双,江俊峰,等. 光纤法珀传感解调方法研究进展[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 793-808.

[2] 李丽慧,朱永,王宁,等. 光纤法-珀非扫描式相关解调系统分析[J]. 激光杂志, 2014, 35(4): 26-28.

[3] 朱佳利,王鸣,蔡东艳,等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 274-277.

[4] 姜丽娟,江俊峰,刘铁根,等. 具有复合式法珀腔的光纤压力传感器的解调[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 283-287.

[5] 寇琬莹,王伟,陈海滨,等. 非扫描相关解调光纤法布里-珀罗微腔应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 342-347.

[6] 张雄星,吕文涛,张天阳,等. 光纤法珀传感器光楔式解调系统设计[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1259-1272.

[7] YIN J, LIU T, JIANG J, et al. Wavelength-division-multiplexing method of polarized low-coherence interferometry for fiber Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3751-3753.

[8] 赵艳,王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 87-93.

[9] 周杰. 基于面阵 CCD 的多通道光纤法珀传感器同步解调系统研究[D]. 天津:天津大学, 2019.

[10] 王陶. 压水堆堆内脉动压力监测传感系统研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.

[11] 杨文,沈大伟,靳鸿,等. 基于 FPGA 的多通道动态测试系统的设计与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 81-86.

[12] 胡刚,龚学余,陈文光,等. 基于 STM32 的线阵 CCD 积分时间可调驱动改进方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(4): 121-125.

[13] 郑雪,杨庆华,屠晓伟,等. 基于 Y 型 CCD 的室内运动目标定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 115-123.

[14] 曾庆喜,王庆,杨英杰,等. USB 接口 GPS 中频信号采样器研究与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(10): 883-888.

[15] 廖金权. 基于激光干涉的传感器非线性误差标定研究[J]. 激光杂志, 2019, 40(4): 176-179.

作者简介

韩超,硕士研究生,主要研究方向为光纤法珀传感器解调技术。

E-mail:hc_nuc@163.com

贾平岗(通信作者),博士,教授,主要研究方向为光纤传感技术、高温压力传感技术、MEMS 传感器技术。

E-mail:pgjia@nuc.edu.cn