

一种便携式分布式光纤 IQ 数据采集系统

熊显名,王伟,荣琪

(桂林电子科技大学 光电信息处理重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:针对传统分布式光纤 IQ 数据采集系统存在信噪比低、价格昂贵和仪器笨重的不足,设计了一种以现场可编程阵列(FPGA)为主控的分布式光纤 IQ 数据采集系统。利用硬件编程实现信号幅值解调和触发采样的方式,并通过改进系统的差分累加算法,经压电陶瓷(PZT)模拟振动实验测得该振动检测系统的信噪比可达 13.3 dB 左右。该系统解决了数据量大的问题,同时降低了系统成本,提高了信噪比。

关键词:分布式光纤;现场可编程阵列;数据采集;振动检测

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)09-0043-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Portable distributed optical fiber IQ data acquisition system

XIONG Xianming, WANG Wei, RONG Qi

(Key Laboratory of Photoelectric Information Processing,

Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: A distributed optical fiber IQ data acquisition system based on field programmable array (FPGA) is designed to overcome the shortcomings of traditional distributed optical fiber IQ data acquisition system, such as low signal-to-noise ratio, high cost and heavy instrument. The signal amplitude demodulation and trigger sampling are realized by hardware programming, and the signal-to-noise ratio of the vibration detection system can reach about 13.3 dB by improving the differential accumulation algorithm of the system and simulating vibration experiment with piezoelectric ceramics (PZT). The system solves the problem of large amount of data, reduces the cost of the system and improves the signal-to-noise ratio.

Key words: distributed optical fiber; FPGA; data collection; vibration detection

0 引言

分布式光纤振动传感技术是一种新型的传感技术^[1],以其系统结构简单、可同时测量多点扰动和对动态事件捕获能力强等特点,在国防军事、建筑工程、能源电力和生物医疗等领域均有较为广泛的应用^[2]。目前,市面上存在的分布式光纤数据采集系统都是用工控机控制,存在价格昂贵、仪器笨重等不足。同时,为了保证系统的信噪比,一般采用连续采样的方式,导

致了数据量庞大从而增加系统成本。

本文针对分布式光纤振动检测^[3]设计一种以现场可编程阵列(FPGA)为主控的分布式光纤 IQ 数据采集系统^[4]。在保证分布式光纤振动检测系统信噪比等性能指标的同时,降低了商业化成本、提高了性价比。

1 分布式光纤振动检测原理

光纤由于振动点的影响产生形变,使内部纤芯的折射率发生变化,进而影响到瑞利后向散射信号。根据测量时间与光纤长度的换算关系,可以计算出振动点到传感光纤入射端的距离,其关系式为:

$$L=ct/2n \quad (1)$$

其中, L 为光纤长度, c 为光速, n 为单模光纤折射率, t 为测量脉冲与接收机接收的后向散射光的时间差。

传统的光时域反射仪(OTDR)系统采用宽谱光脉冲,减弱了瑞利后向散射光的干涉强度,同时用窄线

收稿日期:2019-03-17。

基金项目:南宁市科学研究与开发计划(编号 20183044-2)资助。

作者简介:熊显名(1964—),男,学士、研究员、硕士生导师,研究方向为光电信息处理、光纤传感器。1993 年获国家发明奖四等奖;2014 年和 2018 年分别获广西自然科学二等奖;公开发表技术文献 70 余篇,其中 EI 收录 30 余篇,SCI 收录 10 余篇;并于 2018 年起承担国家科技重大专项(02 专项)子课题“高精度位置测量系统在线标定技术研究”。



宽激光源进行 OTDR 测试时,瑞利后向散射曲线会因相干衰落效应从平滑曲线变为随机波动曲线。而本文研究的分布式光纤振动检测系统主要是通过检测传感光纤线路上不同时刻瑞利后向散射信号叠加干涉的强度来判断振动点位置^[9],分布式光纤振动检测系统的模型如图 1 所示。

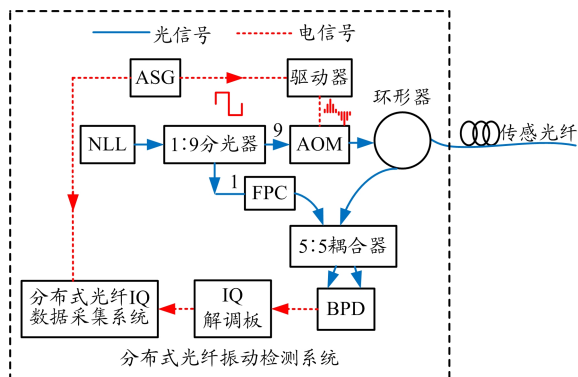


图 1 分布式光纤振动检测系统模型

图 1 中的激光器采用窄线宽激光器(NLL)。激光器发出的连续光经过 1:9 的分光器分成 2 路光信号,10%的光信号作为参考光,90%的光信号经声光调制器(AOM)调制成脉冲光,脉冲光经三口环行器进入传感光纤;而返回的瑞利后向散射光和经过三环偏振控制器(FPC)的参考光经过 5:5 耦合器耦合后被平衡探测器(BPD)转换为电信号^[9],转换后的电信号经过 IQ 解调板产生 I、Q 2 路基带信号,2 路 I、Q 基带信号经过本文设计的分布式光纤 IQ 数据采集系统接收、处理和显示。信号发生器(ASG)为 AOM 的驱动器和分布式光纤 IQ 数据采集系统提供触发同步信号。

2 分布式光纤 IQ 数据采集系统

本文根据分布式光纤振动检测系统模型,确定其数据采集系统^[7]的结构如图 2 所示。

按照系统^[8]的功能分为信号采集模块、数据缓存

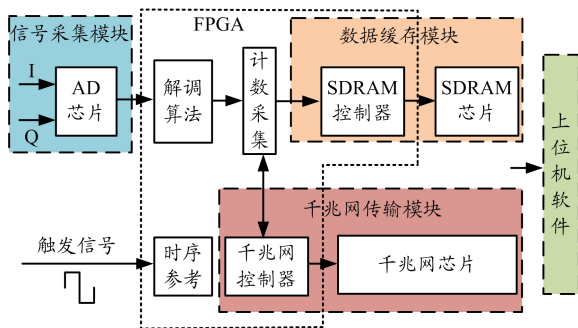


图 2 分布式光纤 IQ 数据采集系统的结构图

模块、千兆网传输模块以及上位机软件 4 个部分进行设计。当触发信号有效时,高速模数(AD)转换芯片对 I 和 Q 2 路模拟信号进行采集,采集到的 I、Q 信号经过 FPGA 内部搭建的幅值解调算法得到光纤线路中瑞利后向散射信号的幅值,通过同步动态随机存取内存(SDRAM)控制器连续存储一段时间的幅值信号到 SDRAM 中,当连续存储的时间符合式(1)的关系(即存储的数据量等于传感光纤的长度)时,存储的数据通过千兆网传输到上位机软件。上位机软件对传输的数据进行入队列操作,当队列中的数据满足一帧波形需要的数据量时,对队列中的幅值信号进行差分累加处理并进行波形显示,从而直观地得到振动点位置。

2.1 信号采集模块设计

信号采集模块主要完成的功能是将 I、Q 信号转换为数字信号,并通过幅值解调得到瑞利后向散射信号的幅值。信号采集模块的系统结构如图 3 所示。

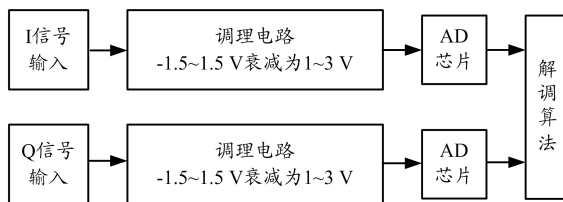


图 3 AD 转换模块的系统结构图

通过解调板得到的 I、Q 信号经快速傅里叶变换(FFT)后发现频率集中在 10 MHz 附近,幅值范围为 -1.3~1.0 V。根据奈奎斯特采样定理: $f_s > 2f_{\max}$ 。本模块采用 2 片 ADI 公司的 AD9226 芯片采集 I 路和 Q 路的信号。该芯片最大支持 65 M 采样速率,位宽 12 位,不但可以满足奈奎斯特采样定理的要求,而且满足系统的空间分辨率。在电路设计方面,AD9226 的输入范围为 1~3 V。为了满足 I、Q 路的输入幅值要求,我们在 AD 采集前端加入调理电路,使其输入范围调整到 -1.5~1.5 V。衰减电路的转换公式: $V_{\text{out}} = V_{\text{in}} / 1.5 + 2$ (即 $V_{\text{in}} = -1.5 \text{ V}$) 时, $V_{\text{out}} = 1 \text{ V}$; 当 $V_{\text{in}} = 1.5 \text{ V}$ 时, $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ 。

根据幅值解调算法,瑞利后向散射信号的幅值 E 可得:

$$E = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2)$$

本文利用了 FPGA 内部的 LPM_MULT 乘法 IP core^[9]、LPM_ADD_SUB 加法 IP core、ALTSQRT 开方 IP core 进行搭建,解决了软件实现幅值解调时对系统性能的要求。同时,利用 FPGA 高速处理的特点,提高了系统的动态响应。幅值解调的 RTL 图如图 4 所示。

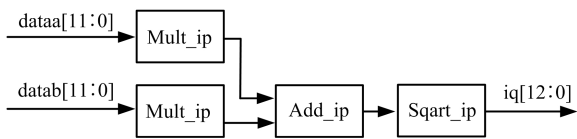


图4 IQ幅值解调的RTL图

为了避免由于硬件原因造成 I、Q 信号不同步,我们尽可能将 2 路 AD 走线的线宽、长度及器件摆放位置实现相同。

2.2 数据缓存模块设计

数据缓存模块是为了提高系统的可扩展性,可以满足不同的光纤长度。同时,采用触发采样的方式代替连续采样,只需存储一次等于传感光纤长度的数据量即可,降低了系统成本。SDRAM 具有容量大、体积小和价格便宜等优点,因此本文采用 Winbond 公司的 W9812G6KH-6 型号的 SDRAM 芯片,其存储容量为 128 MB,满足常用的光纤长度要求。

数据缓存模块的系统结构图如图 5 所示。主要包括上电初始化操作、自刷新操作和突发读/写操作,各个操作之间通过有限状态机实现控制。2 个异步 FIFO 存储器分别为写 FIFO 和读 FIFO,写 FIFO 用于信号采集模块与数据缓存模块的通信;读 FIFO 用于数据缓存模块与千兆网传输模块的通信,实现数据的高速传输。

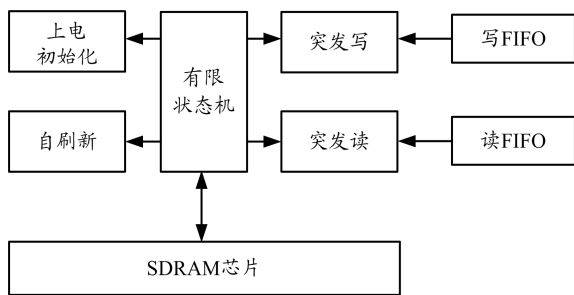


图5 数据缓存模块的系统结构图

2.3 千兆以太网传输模块设计

为使系统具备更广泛的接口兼容性,同时兼顾设计中数据传输的要求(低延时、高带宽和高可靠性),系统采用千兆以太网为传输方式。千兆网传输模块^[10]主要采用 REALTEK 公司的 RTL8211 芯片,将存储的瑞利后向散射信号传输到上位机软件。相对于传输控制协议(TCP)的 3 次握手,用户数据报协议(UDP)^[11]面向无连接的性质使其在硬件上能够快速实现,同时 TCP 设计之初就是根据软件的灵活性设计的,因此在很多设计上,并不适合使用硬件逻辑实现。通过 Ver-

ilog 语言对 MAC 层、网络层和传输层各层协议的具体实现完成数据传输。用户数据以太网帧格式示意图如图 6 所示。千兆网发送数据的过程就是用户数据每经过一层添加相应的以太网首部和循环冗余校验(CRC),组成完整的以太网帧;上位机软件接收数据的过程是以太网帧经过 CRC,对于不正确的以太网帧进行丢弃操作且不重新发送该以太网帧,对于校验正确的以太网帧去除每一层的首部和校验,最后获得用户数据。

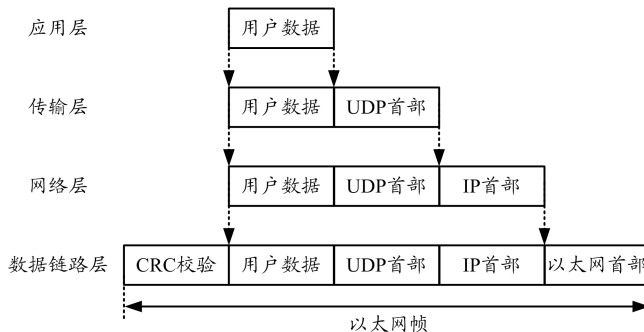


图6 用户数据以太网帧格式示意图

在电路设计方面,本文尽可能地保证 RTL8211 芯片的 TX(发送)、RX(接收)端的等长以及与网口连接的差分对等长,从而避免由于竞争冒险产生的信号传输错误。

2.4 上位机软件设计

上位机软件^[12]主要是通过 Labview 编程实现。上位机软件文件大小为 308 kB,其运行时占用内存不到 2 GB,市面上普通的便携式笔记本电脑都能使其轻松运行。上位机软件工作流程图如图 7 所示。通过 UDP 接收数据子函数接收下位机发送的瑞利后向散射信号,同时上位机软件会对接收到的以太网帧进行验证操作。系统中的一帧数据量是由多行光纤数据组成,一行光纤数据是由多组以太网帧数据组成,当一行光纤数据中的某组以太网帧数据出错被丢弃时,对该行光纤数据进行丢弃并重新采集新一行数据。将接收到的正确数据存入队列中,当存入队列的幅值信号达到设定的一帧数据量时停止存数据,读取队列的数据并进行数

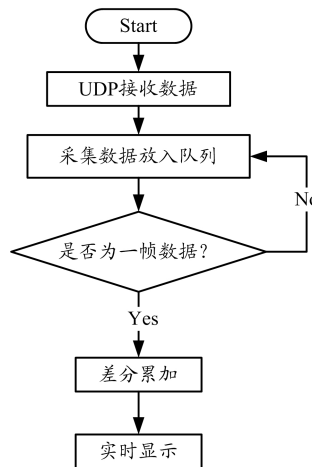


图7 上位机软件工作流程图

据处理后进行显示,得到振动点的位置。

为了提高系统的信噪比,本文对差分累加算法进行了改进。差分累加算法是将队列中存储的数据量按照传感光纤长度进行分行,将每行数据与隔 N 行的数据进行差分并取绝对值累加运算得到一帧图,通过帧之间的变化得到振动源的具体位置。 N 值决定能否探测到振动点的具体位置。传统的选取方式是通过人为测试,选择不同的 N 值观察实验效果,最终确定 N 的值。该方法不仅费时费力,而且缺少说服力,很难保证系统信噪比。

本文改进的 N 值选取原理如图 8 所示。由 FFT 可知,任何一个信号波形都能通过无数个正弦波组合而成,且信号的能量集中在其主频正弦波上。将一个周期的正弦信号视为 360° ,数据进行差分运算实际为正弦信号隔 X° 相减。通过观察隔 $1^\circ \sim 10^\circ$ 相减时 $\sin$ 值的变化如图 9 所示,可以明显地看出隔 5° 、 6° 、 7° 和 8° 时 $\sin$ 值变化的线性度好且变化大。例如:当振动源频率为 15 Hz ,光脉冲的周期为 50 ms ,假设选择隔 5° 相减,计算得出大约需要 20 次光脉冲的时间才能达到 5° 相减;同时,考虑到信号在采集、处理和传输过程中的时间损耗,故 N 值取 30。

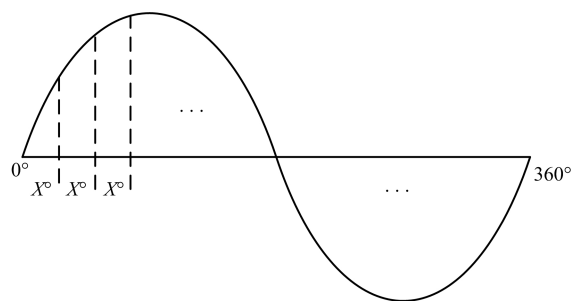


图 8 N 值选取原理图

3 实验结果及分析

本文制作了分布式光纤 IQ 数据采集系统样机,其下位机体积大约为 360 cm^3 ,重量约为 50 g ,物料成本在千元以内;上位机为普通便携式笔记本电脑。利用 PZT 光纤拉伸器进行模拟振动测试了样机的性能。设置探测脉宽为 100 ns ,探测周期为 50 ms ,传感光纤总长度约为 2.8 km ,在 1020 m 处加上 PZT 光纤拉伸器,PZT 的驱动信号设置为 20 Hz ,幅度为 5 V ,偏置为 2.5 V 。一帧取 600 幅图, N 值取 30。同时,将传感光纤和 PZT 放入泡沫箱内隔绝外界振动影响。

实验得到的波形如图 10 所示。可以看出,在大约 1050 m 和 2900 m 处出现峰值信号, 1050 m 与 PZT 振动的位置大致相同,其空间分辨率约为 30 m ; 2900 m 是由于光纤断裂造成的菲涅尔反射峰。根据信噪比计算公式: $\text{SNR}=20 \times \log(A_s/A_n)$ (其中, A_s 为信号的最大幅度, A_n 为噪声平均幅度),得出振动信号的信噪比约为 13.3 dB ,能够达到振动点检测的要求,波形刷新率约为 1 Hz ,动态响应良好。

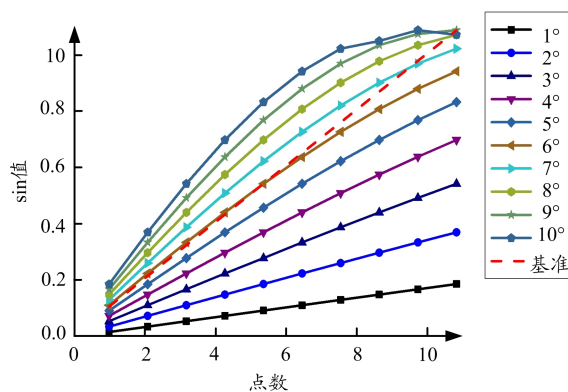


图 9 不同角度 $\sin$ 值变化曲线

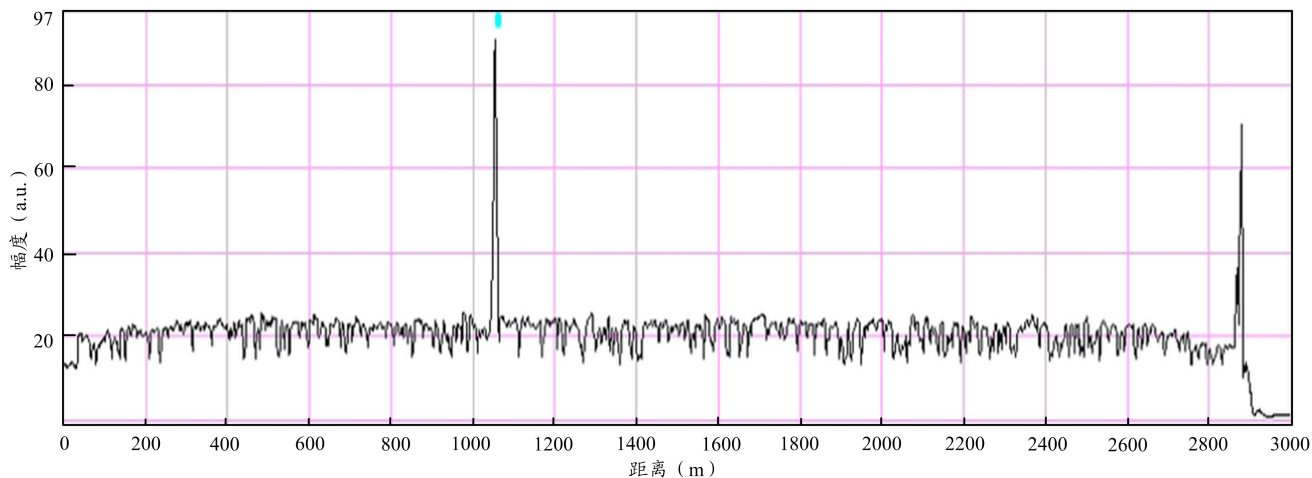


图 10 PZT 测试波形

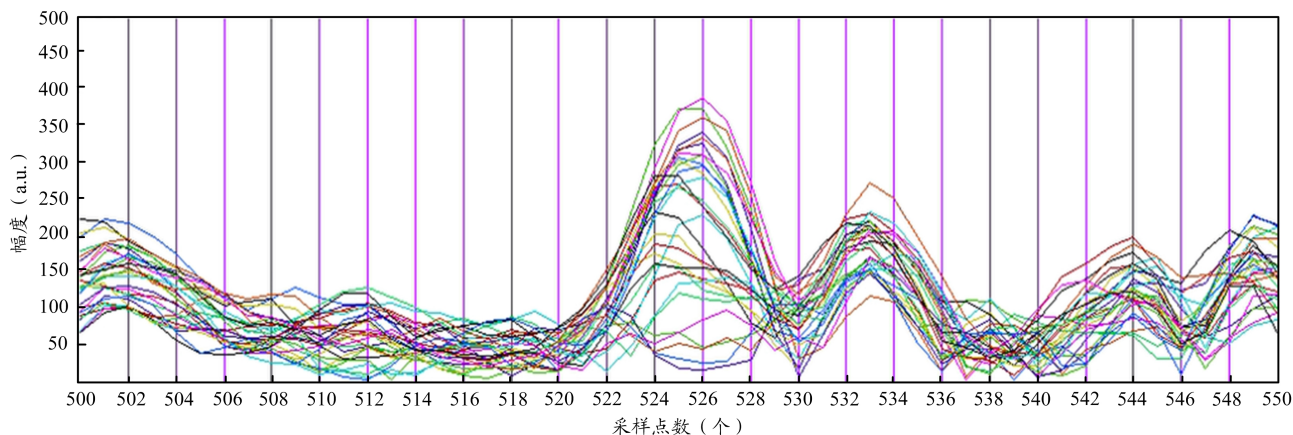


图 11 采集波形叠加图

本文将采集的 30 行数据进行叠加放大,得到的波形如图 11 所示。可以看出,波形在 524~528 之间出现了大范围的离散,其它位置的波形趋势基本一致。正是由于 PZT 的振动导致瑞利后向散射信号发生变化,影响了确定干涉强度下固有的起伏模式,所以波形在振动处表现出杂乱无章的效果。

4 结束语

分布式光纤振动检测技术可实现对目标区域的全局实时监控,该技术在安防监控、车辆检测等领域中有较强的应用前景。但由于传统的分布式光纤数据采集系统价格昂贵、体积笨重,大大增加了该技术商业化的成本。本文通过触发采样、芯片选型、硬件解调以及差分累加算法优化解决了数据量大带来的成本问题,并对差分累加算法进行优化,使系统信噪高达 13.3 dB。制作的样机具有重量轻、体积小和便于携带等优势,其下位机部分体积大约为 360 cm³,重量约为 50 g,物料成本在千元以内;上位机软件文件大小 308 kB,其运行时占用内存不到 2 GB,适用于大部分笔记本电脑。该研究克服了传统分布式光纤 IQ 数据采集系统价格昂贵、仪器笨重的缺点,提高了信噪比,对分布式光纤振动检测技术的推广^[13]有重要意义。

参考文献:

[1] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展 [J]. 物理学报,

2017,66(7):158-176.

[2] 张智娟,郭文翰,徐志钊,等. 基于 Φ -OTDR 的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电,2019,40(1):12-19.

[3] OKUSAGA O, CAHILL J P, DOCHERTY A, et al. Spontaneous inelastic Rayleigh scattering in optical fibers[J]. Optics letters, 2013, 38(4): 549-551.

[4] 贺梦婷,庞拂飞,梅烜玮,等. 基于 IQ 解调的相位敏感 OTDR 的研究 [J]. 光通信技术,2016,40(9):23-26.

[5] 蒋鹏. 基于瑞利散射的分布式光纤振动传感技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.

[6] PAN Z Q, LIANG K Z, YE Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]//Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, Nov. 13-16, 2011, Shanghai, China. Danvers: IEEE, 2012.

[7] 余学俊. 分布式光纤传感系统中高速采集卡的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2013.

[8] 曾少航. 基于 FPGA 分布式光纤传感系统的设计及实现[D]. 南昌:南昌航空大学,2017.

[9] 罗斌. IP 核测试验证技术研究与应用 [J]. 集成电路应用,2018,35(12):19-23.

[10] 林克文,苏绍璟,黄芝平,等. 100Gb/s DP-QPSK 光信号采集技术研究(本期优秀论文)[J]. 光通信技术,2013,37(10):48-51.

[11] 李磊,刘宇,于帅. 基于 FPGA 的千兆以太网实现[J]. 电子设计工程,2017,25(12):186-188.

[12] 薛传宗. 分布式光纤传感器软件系统设计[D]. 北京:北京邮电大学,2018.

[13] 孟艳霞. 关于光纤传感的技术在高速公路监测中的应用[J]. 科技创新与生产力,2016(10):98-100.

欢迎投稿,欢迎订阅,欢迎刊登广告!