

文章编号: 1006-4710(2014)03-0293-06

# 时分复用光纤光栅传感系统的高速采集技术研究

巩鑫, 华灯鑫, 李仕春, 辛文辉, 胡辽林

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以时分复用的低反射光纤 Bragg 光栅传感系统的高速解调系统为应用对象, 研究了以电压比较器型峰值保持电路为核心的多点应变传感的高速采集系统。设计了脉宽低于 5 ns 信号的电压比较器型峰值保持电路, 以阻抗匹配原理优化电路参数及输出阻抗, 并结合宽带匹配放大电路, 实现传感信号的高速采集系统。为验证高速采集系统有效性, 开展了悬臂梁的光纤 Bragg 光栅应变传感实验, 测试了传感系统应变与负载的非线性关系。实验结果表明, 峰值保持电路响应信号上升迅速且平滑, 稳定时间约为 15 ns, 线性相关度为 0.999 2, 线性度优于 2%, 悬臂梁的光纤 Bragg 光栅应变传感系统的误差为 4%。

**关键词:** 光纤光栅传感; 时分复用技术; 数据采集技术; 高速峰值保持

**中图分类号:** TN215, TP212.1 **文献标志码:** A

## The study of high-speed acquisition technique for fiber gratings sensing system with time-division multiplex

GONG Xin, HUA Dengxin, LI Shichun, XIN Wenhui, HU Liaolin

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A high-speed acquisition system based on voltage-comparator-type peak-holding circuit is studied for ultra multi-point strain measurement, and will be applied in high-speed demodulation of low-reflectivity fiber Bragg grating sensing network with time-division multiplex. A voltage-comparator-type peak-holding circuit for signal of pulse duration less than 5 ns is designed, and then its circuit parameters and output impedance are adjusted and optimized with the impedance matching principle. The high-speed acquisition system for this sensing signal is accomplished together with a broadband matching amplifier circuit. The sensing-strain experiments of fiber Bragg grating with cantilever is carried on to verify the high-speed acquisition system, and the non-linear relationship between loads and signal responses is tested. Experimental results show that the peak-holding circuit possesses a rapid smooth rise edge with setting time approximately 15 ns, with a linear correlation of 0.999 2, and linearity is better than 2%, and that the sensing-strain system of fiber Bragg grating with cantilever is approximately 4% error.

**Key words:** fiber Bragg grating sensing; time division multiplexing technique; data acquisition technique; high speed peak holding

多年来复用技术一直是光纤 Bragg 光栅 (FBG) 传感领域的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。目前光纤光栅复用技术主要有波分复用 (WDM)、时分复用 (TDM) 和空分复用 (SDM), 波分复用是最直接也是

最成熟的复用方式, 但其光纤光栅复用数目通常受限于光源带宽, 通常只能实现数十支 FBG 的复用<sup>[3]</sup>, 而 SDW 多应用于航空和安全监测方面, 一般与其它复用方式组合构成 FBG 传感网络, 实现冗余

收稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61275185, 61308106); 陕西省自然科学基金资助项目(2013JM5001); 陕西省教育厅科研计划资助项目(11JK0868)。

作者简介: 巩鑫, 女, 博士生, 研究方向为光纤光栅传感技术。E-mail: gongxinhh@163.com。

华灯鑫, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为激光雷达大气遥感技术及光电测试技术。

E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn。

设计以增加探测可靠性。TDM用于光纤光栅传感网络可以降低FBG解调系统的成本和复杂度<sup>[4]</sup>。

随着高性能光纤激光器的出现,众多研究者关注到TDM在FBG传感领域的复用优势,2002年Valente将OTDR用于解调时分和波分复用的低反射FBG传感网络,极大拓展了FBG复用数量<sup>[5]</sup>,2003年Zhang设计了一种可降低光源起伏和光纤弯曲损耗的结构,提高了低反射FBG信号的探测可靠性<sup>[6]</sup>。2005年Enami利用OTDR进行了低反射FBG的应变测试,探测精度达 $10\ \mu\epsilon$ 量级<sup>[7]</sup>,同时Joong则对温度进行测试<sup>[8]</sup>,2007年Lo利用双波段组合光源提高了空间分辨率<sup>[9]</sup>,2008年Liu从相干性方面对低反射FBG网络进行分析,提出了新的解调思路,并进行了温度传感测试<sup>[10]</sup>。2009年Crunelle利用可调谐激光器研制出温度传感系统,精度可达 $0.1\ ^\circ\text{C}$ <sup>[11]</sup>,2010年刘川利用扫描激光方式对低反射FBG进行解调,并通过掺铒光纤和Raman混合放大技术提高传感距离<sup>[12]</sup>,2011年Liu对FBG反射率与复用能力进行了详细分析<sup>[1]</sup>。因此,目前低反射FBG-TDM传感网络得到较多研究者关注,但是其解调大多采用OTDR技术,尚未开展专门相关技术研究。

2010年以来笔者课题组开展了低反射FBG复用技术的相关研究,提出了双激光波长拓展FBG应变传感范围的实现技术<sup>[12]</sup>,目前已成功研制了纳秒

级激光器驱动电路和高精度温度控制的稳频技术<sup>[14-16]</sup>,该系统具有探测应变范围大,复用数量多,成本低等优点,可实现多点应变传感测试,但其解调技术比单激光波长系统复杂。本文将针对时分复用光纤Bragg光栅应变传感系统的高速探测技术进行研究,设计以高速峰值保持电路为核心的高性能数据采集系统,并实现对FBG多点应变传感网络的测试数据处理。

## 1 时分复用FBG传感系统

时分复用FBG多点应变传感系统如图1所示。将含有FBG的光纤埋入被测材料中,实现被测结构的准分布式应变传感测试。在窄脉冲驱动电路和温控电路的作用下,DFB-LD激光器产生重复频率为10 kHz的激光脉冲,其光谱带宽为10 MHz,平均功率为10 mW。输出激光脉冲由1:9的光耦合器分光后,10%信号能量进入光电探测器1(PIN\_FET1),作为脉冲能量的基准信号,剩余90%能量经环形器进入低反射率(约5%)FBG阵列,满足FBG反射条件的激光脉冲部分能量反射,大部分能量透射,从而串联FBG网络将产生多个反射信号脉冲,这些脉冲信号依次经过光环行器进入光电探测器2(PIN\_FET2)。两个光电探测器的电信号,经信号调理后进行数据采集、处理和显示,实现应变信息的传感测量。

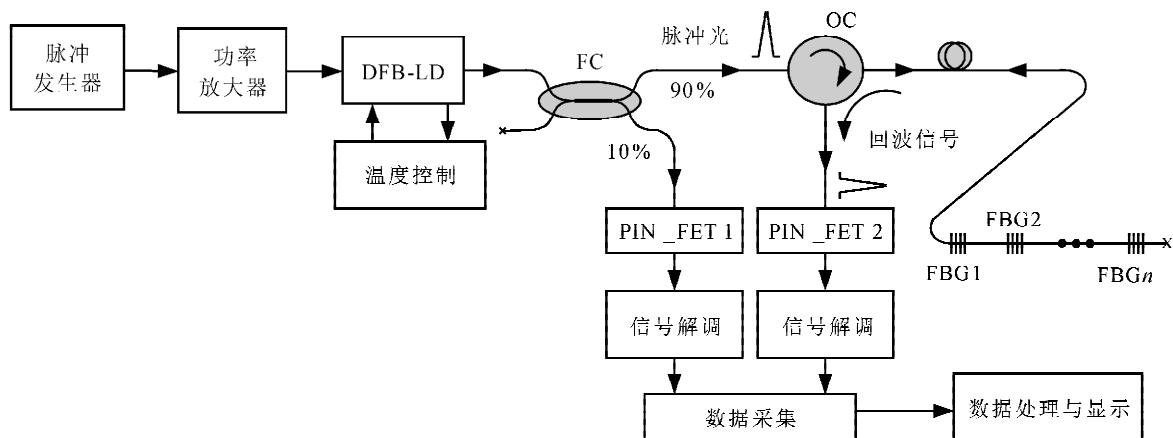


图1 时分复用应变传感系统结构

Fig. 1 Layout of strain sensing system with time-division multiplex

为提高FBG应变传感的空间分辨率,应使激光脉冲尽可能窄,文中DFB-LD激光器的驱动脉冲脉宽小于 $5\ \text{ns}$ <sup>[14]</sup>,而FBG反射谱的展宽可被忽略,因此反射脉冲信号将是一系列脉宽约为 $5\ \text{ns}$ 的时域脉冲信号。FBG应变信息体现在反射脉冲信号的峰值电压上<sup>[12]</sup>。纳秒级脉冲信号的检测与处理目前仍有待于进一步研究<sup>[16]</sup>,故纳秒级信号调理器将是

FBG解调系统的核心部分,它能够获得系列窄脉冲信号的峰值电压。

## 2 高速数据采集系统设计

高速AD转换是最基本的获取信号峰值电压的方法,即将FBG传感网络的反射信号直接接入高速AD转换电路,获取脉冲信号全部信息,然后得到

FBG 对应脉冲信号的最大值,但是该方法存在两个缺陷,一是采样值未必恰好是最大值,导致数据处理得到的最大值与原始脉冲信号的最大值之间存在误差;二是在 FBG 反射脉冲信号极短的上升时间(约 2.2 ns)内采集脉冲峰值,大大增加解调系统成本,且数据处理量很大,不适用于工程应用。

获取脉冲信号峰值的第二种方法是采用具有峰值保持功能的信号调理器,准确获取峰值时刻并对峰值信号进行预处理,然后通过低速率 AD 转换实现峰值提取,采用该技术的另外一个优点是峰值保持电路中电容的积分作用与实际系统中的能量检测相一致,可减少噪声对信号的影响。因此,本文中设计了一套以峰值保持电路为核心的高速数据采集系统。图 2 所示为该采集系统的框图。

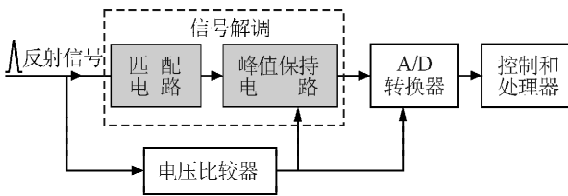


图 2 高速数据采集系统框图  
Fig. 2 The diagram of the high speed data acquisition system

图 2 中 FBG 的反射信号通过光电探测器转换后,首先经过匹配电路(Matching circuit)后进入峰值保持电路(Peak holding circuit)输出脉冲信号峰值电压,经 A/D 转换器(A/D converter)的采样信号输入控制和处理器(Controller and processor)进行数据处理。同时,反射脉冲信号经电压比较器(Voltage comparator)后输出的数字信号,直接用于峰值保持电路的复位和 A/D 转换起始的控制。因

此,该电路可极大降低 A/D 采样速率的要求,而且降低了采集系统成本,减小了处理器的数据吞吐量,最重要的是可以准确测量峰值电压。

从上述信号处理过程可看出,该高速数据采集系统的核心组成部分是纳秒级信号调理器(Signal conditioner),它由匹配放大电路和峰值保持电路组成,其性能将直接影响数据采集的精度和速度。其中匹配放大电路技术较为成熟,因此峰值保持电路的性能尤为重要。

2.1 高速峰值保持电路

峰值保持电路主要由前置驱动电路、二极管、保持电容、输出电压缓冲器和放电电路组成,其基本原理是,当输入电压大于反馈输出电压时,经二极管提供充电电流,当输入电压小于反馈输出电压时,二极管截止,停止对电容充电,电容保持峰值电压。前置驱动电路可以是普通电压放大器、跨导放大器和电压比较器,主要功能是依据输入电压与反馈电压的差异决定是否为峰值保持电容提供充电电流,充电电流越大,峰值保持电路的上升时间越短。输出电压缓冲器通常为电压跟随器,以提供较大的输出能力。

目前,高速峰值保持电路通常采用跨导型峰值保持电路,其核心是运算放大器,通常注重线性区工作时放大的准确性,内部设计有相位补偿电路,以增加闭环工作稳定性,但该类型峰值保持电路的脉冲上升速度一般大于 5 ns<sup>[16]</sup>,因此不适用于本系统。本设计采用输出电流更大的电压比较器型峰值保持电路,以减少峰值保持电路的上升时间。设计的高速峰值保持电路如图 3 右半部分所示。图中电压比较器 MAX961 的正向输入端接输入信号,反向输入端与 MAX4104 的输出反馈端相连。

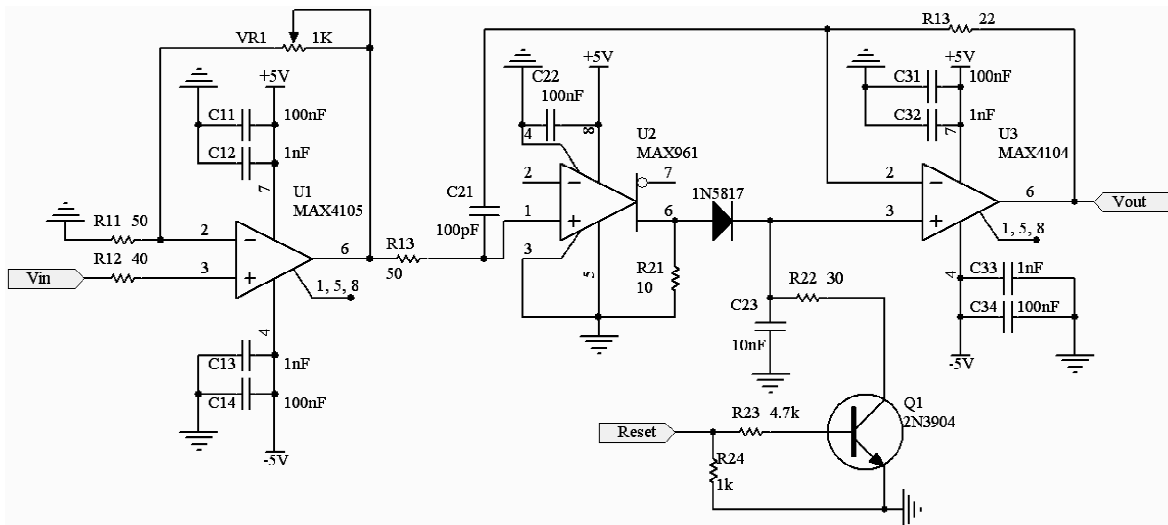


图 3 信号调理电路原理图  
Fig. 3 Schematic of signal conditioner circuit

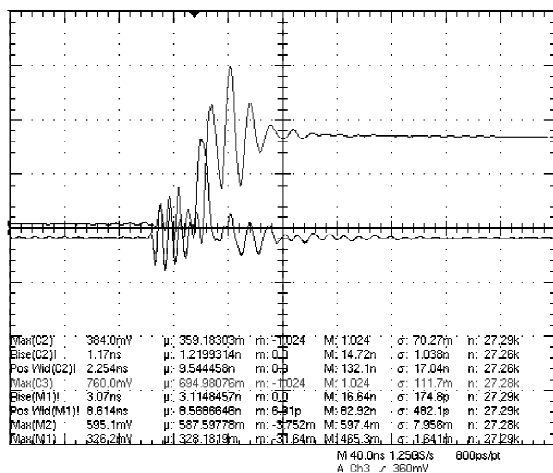
而作为比较器型峰值保持电路核心的电压比较器则更注重输出电平的精度,一般工作在开环状态且内部无相位补偿电路,但要求比较门限更精确,比较后的输出边沿上升或下降时间短,线性区的准确度低。因此,采用延时短的电压比较器可有效减少峰值保持电路的脉冲上升时间。以Maxim公司超高速电压比较器MAX961搭建高速峰值保持电路的前置驱动电路,其传输延时仅为4.5 ns,容性输出电流典型值为60 mA,上升沿为2.3 ns,内部具有3.5 mV滞回,可有效减少输入信号毛刺引起的振荡。

另外,由于输出电路存在偏置电流、二极管反向漏电流和保持电容的绝缘电阻等,电容保持的峰值电压会随时间缓慢降低,而在后续脉冲输入前,还需给保持电容放电至电压为零。因此保持电容是峰值保持电路的重要元件,其性能直接影响电路的峰值保持精度和时间。因此,选择绝缘电阻大,导电吸收

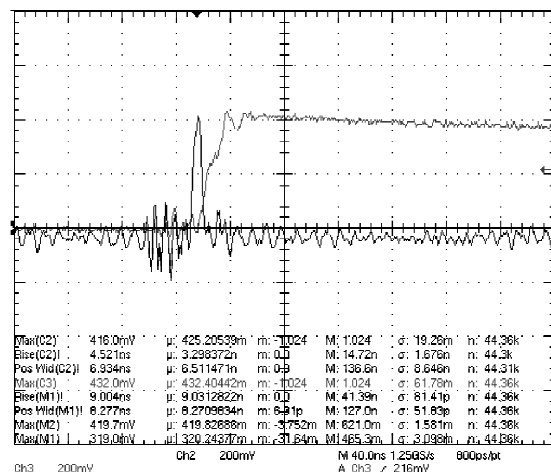
弱的聚苯乙烯电容作为保持电容。为提高系统响应速度,二极管采用肖特基(Schottky)二极管1N5817,其反向恢复时间极短(通常小于10 ns),开启电压0.3 V,反向耐压20 V,最大正向电流1 A。

MAX961输出的高电平约为5 V,可保证二极管导通,但是低电平约为330 mV,实验发现330 mV低电平也有可能使二极管导通,因为肖特基二极管1N5817的开启电压约为300 mV,所以在比较器输出端增加10  $\Omega$  输出电阻R21,将输出电平拉低至40 mV,以确保二极管截止。

采用带宽1 GHz示波器测试该峰值保持电路功能,实验测试结果如图4(a)所示,2通道是FBG反射信号,3通道为探测峰值保持输出信号。可看出峰值保持信号存在较大振荡,通过阻抗匹配技术消除振荡,实现最优信号输出(见图4(b)),峰值保持信号上升较为迅速且平滑。



(a) 未阻抗匹配



(b) 阻抗匹配

图4 阻抗匹配对峰值保持的影响

Fig. 4 Effect of impedance matching to peak-holding circuits

## 2.2 宽带匹配放大电路

FBG反射信号属于高频微弱信号,信号上升时间约为2.2 ns,带宽为175 MHz,幅值范围为230 mV $\pm$ 100 mV。如果直接对原始信号进行峰值保持,噪声对峰值保持结果影响较大,而且,峰值保持电路后的AD转换电路输入信号范围是 $\pm$ 1 V,因此需要在峰值保持电路前加入匹配放大电路进行信号预处理。

考虑AD转换电路输入幅值匹配且兼顾放大电路带宽,选取MAX4105运算放大器进行信号匹配放大。它的放大倍数为5时,输出小信号时3 dB带宽为410 MHz,输出大信号时3 dB带宽为370 MHz,压摆率1 400 V/ $\mu$ s,综合考虑带宽与压摆率,MAX4105可满足放大FBG反射信号的要求。

## 3 实验及数据分析

### 3.1 峰值保持性能测试

为测试峰值保持电路性能,对不同幅值脉冲信号的输出峰值电压进行测试,比较输入脉冲峰值与峰值保持电路输出电压,进而分析峰值保持性能,实验测试结果如图5所示。图中横坐标为输入脉冲信号峰值,纵坐标为峰值保持电路输出信号,实测值用散点表示,直线为拟合直线,其斜率为0.991,截距为2.91,线性相关度为0.999 2,线性度优于2%,表明电压比较器型峰值保持电路具有较高的保持精度和可靠性,可用于高速采集系统以获取FBG反射脉冲的峰值电压。

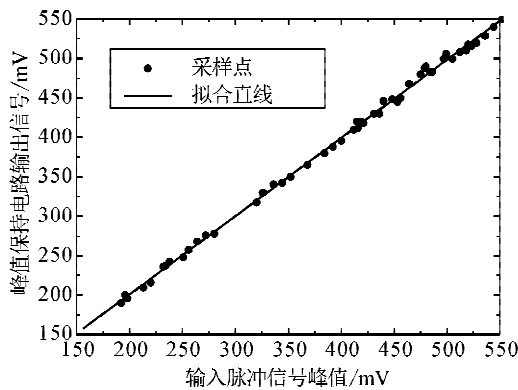


图5 峰值保持电路性能测试

Fig. 5 Performance testing of peak-holding circuit

### 3.2 FBG 传感信号采集实验

为了验证高速采集系统的有效性,基于多根低反射率(约5%)FBG 串联实验平台<sup>[14]</sup>,测试了中间某根FBG 应变传感特性。实验中将该FBG 贴于悬臂梁上,通过给悬臂梁增加砝码改变悬臂梁的应变,进而改变FBG 中心波长。随着砝码重量增加,悬臂梁FBG 的应力逐渐增大,导致中心波长向长波长方向漂移,增加反射光功率。实验测试结果如图6所示。

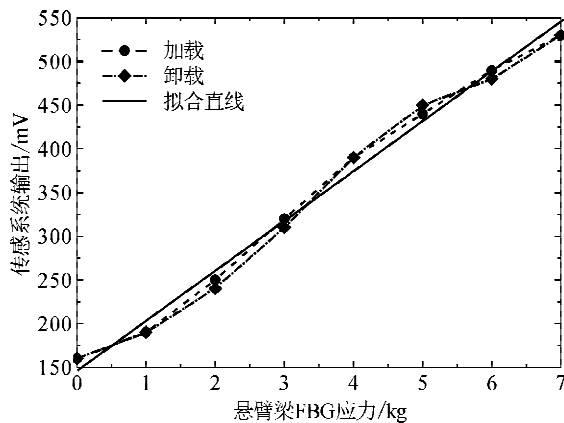


图6 应变测试实验

Fig. 6 Strain testing experiment

图6中圆点表示测得正程(砝码逐渐增加)实验数据,然后减少砝码重量,棱形表示返程实验数据,可看出未出现明显迟滞,输入输出单调性明显。另外,随着负载增加,信号峰值先是缓慢增加,负载在3 kg至4 kg变化时,脉冲峰值变化较快,而负载继续增加,峰值变化又比较缓慢,基本体现了FBG 频谱的非线性变化趋势,采用如下非线性拟合方程:

$$y = \frac{a}{1 + \exp[-k(x - x_c)]} \quad (1)$$

拟合结果如图6中实线所示,其方程为:

$$y = \frac{642.22654}{1 + \exp[-0.39716 \times (x - 3.05188)]} \quad (2)$$

其相对误差除第1个点由于信号中噪声较大为

8%外,其余拟合精度优于4%,且随着信号幅值增加,拟合精度越高。在信号幅值较低时系统整体误差较大,说明噪声对传感系统影响较大。

如果将光纤光栅应用于建筑安全检测领域,只需运用力学知识推导出建筑主体受力与FBG 的受力关系,就可以通过FBG 反射信号的峰值电压推算出FBG 的受力,进而得出建筑主体的受力情况。

## 4 结 论

针对低反射率 TDM-FBG 传感网络的高速解调系统,研制了一种FBG 多点应变传感测量的高速采集系统。该系统以电压比较器型峰值保持电路为核心,结合宽带匹配放大电路,实现传感信号的高速采集技术,可对脉宽5 ns,上升时间2.2 ns的FBG 反射脉冲进行峰值保持;性能测试表明,稳定时间约为15 ns,线性相关度为0.999 2,线性度优于2%。悬臂梁的FBG 应力传感实验表明系统传感误差约为4%,验证了以电压比较器型峰值保持电路为核心的高速采集系统的有效性。

### 参考文献:

- [1] Jackson D A, Ribeiro A B L, Reekie L, et al. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network[J]. Opt. Lett, 1993, 18(14): 1192-1194.
- [2] Liu J, Zhang J, Li X, et al. Study on multiplexing ability of identical Fiber Bragg Gratings in a single fiber[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 607-612.
- [3] 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2711-2712.  
Wu Jun, Chen Weimin, Zhang Peng, et al. Strain sensing method based on directly metallized bonding FBG to substrate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2711-2712.
- [4] Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1994, 6(12): 1469-1472.
- [5] Valente L C G, Braga A M B, Ribeiro A S, et al. Time and wavelength multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a commercial OTDR[C]//Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Ofs 2002, 15th, 10-10 May 2002.
- [6] Zhang P, Cerecedo-Nuñez H H, Qi B, et al. Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg-grating-based sensor system[J]. Optical Engineering, 2003, 42(6): 1597-1603.
- [7] Enami Y, Iwashima H, Kobayashi T. Fiber strain sen-

- sor using low reflective fiber Bragg gratings[C]//Lasers and Electro-Optics. Baltimore, Maryland, May 22, 2005.
- [8] Joong E T, Kim M J, LEE B H, et al. Temperature monitoring system based on Fiber Bragg Grating arrays with a wavelength tunable OTDR[J]. IEICE Trans Electron (Inst Electron Inf Commun Eng), 2005, E88-C(5): 933-937.
- [9] Lo Y L, Xu S H. New sensing mechanisms using an optical time domain reflectometry with fiber Bragg gratings [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(1): 238-243.
- [10] Liu Weisheng, Guan Zuguang, Liu Guorong, et al. Optical low-coherence reflectometry for a distributed sensor array of fiber Bragg gratings[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 144(1): 64-68.
- [11] Crunelle C, Wuilpart M, Caucheteur C, et al. Original interrogation system for quasi-distributed FBG-based temperature sensor with fast demodulation technique [J]. Sensors and Actuators A: Physical. 2009, 150(2): 192-198.
- [12] 刘川, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于时分复用和窄波长扫描激光的长距离光纤布喇格光栅传感系统[J], 光子学报, 2010, 39(11): 2004-2007.
- Liu Chuan, Rao Yunjiang, Ran Zengling, et al. Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on time division multiplexing and narrow wavelength swept laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 2004-2007.
- [13] Gong Xin, Hua Dengxin, Zhang Pengbo, et al. Alternate dual pulses technique for fiber Bragg grating Ultra-multi-point strain measurement[C]//Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, January 31, 2013, 8759: 271-276.
- [14] 章鹏博, 胡辽林, 华灯鑫, 等. 光时域反射-光纤光栅传感系统中双激光器的驱动设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 91-96.
- Zhang Pengbo, Hu Liaolin, Hua Dengxin, et al. Design of dual lasers driving circuits in OTDR-FBG system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 91-96.
- [15] 胡辽林, 章鹏博, 华灯鑫, 等. 时分复用光纤光栅传感阵列中DFB激光器的高精度温控设计[J]. 传感技术学报, 2012, 25(7): 921-925.
- Hu Liaolin, Zhang Pengbo, Hua Dengxin, et al. Design of DFB laser's high performance temperature controller in TDM FBG sensing array[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(7): 921-925.
- [16] 胡贤龙, 翁东山, 冯旗, 等. 窄脉冲信号峰值保持器[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(1): 42-45.
- Hu Xianlong, Weng Dongshan, Feng Qi, et al. A peak hold circuit for narrow pulse[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2009, 29(1): 42-45.

(责任编辑 王卫勋)