

基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统

杨 刚 许国良 涂郭结 夏 岚

南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093

摘要 设计了一种基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统。在传统的法布里-珀罗滤波器法中加入法布里-珀罗标准具动态校准滤波器的波长读取值,很好地消除了由滤波器调谐的温度漂移和蠕动引起的测量误差;同时利用标准具及放大自发辐射(ASE)光源特性进行频谱分区解调,大大降低了滤波器调谐时非线性的影响,使得解调系统具有很高的解调精度和很好的稳定性。实验结果表明,系统的稳定性为0.97 pm,分辨率达到了0.33 pm,温度解调线性度为0.9999。

关键词 光纤光学; 光纤光栅解调系统; 可调谐法布里-珀罗滤波器; 法布里-珀罗标准具; 频谱分区解调

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405001

High Precision Fiber Bragg Grating Wavelength Demodulation System Based on Spectrum Segmentation

Yang Gang Xu Guoliang Tu Guojie Xia Lan

Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract A high precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on spectrum segmentation is proposed and experimentally demonstrated. Fabry-Perot etalon is added into the traditional Fabry-Perot filter method to dynamically calibrate the read-out value of the filter wavelength, which can eliminate measurement errors caused by the temperature drift effect or the peristaltic effect of Fabry-Perot filter. Meanwhile the amplified spontaneous emission (ASE) spectral characteristics and etalon are used to segment the wavelength for demodulation, which can greatly reduce the effects of the nonlinear effect of Fabry-Perot filter to improve the demodulation accuracy of wavelength and enhance the stability of the demodulation system. The result shows that stability of the system is 0.97 pm, the resolution is 0.33 pm, and the linearity of temperature is 0.9999.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating sensor system; tunable Fabry-Perot filter; Fabry-Perot etalon; spectrum segmentation demodulation

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 060.2380; 230.7405; 120.2230

1 引 言

光纤光栅传感器具有稳定和高可靠的传感特性,同时具有抗电磁干扰、小尺寸、耐腐蚀、易嵌入、高灵敏度等优点,已经被广泛应用于电力通信、桥梁建筑、石油化工、航空航天等领域^[1-6]。

光纤光栅传感器通过将温度、应变等外界环境信息转变成布拉格波长的偏移量实现传感,因此如何精确检测出光纤光栅布拉格波长的微小漂移量成为光纤光栅解调技术的关键。解调方法根据原理可分为:直接解调法、滤波解调法、干涉解调法、可调光源解调法和光栅色散解调法^[7-9]。

滤波器法通常利用法布里-珀罗(F-P)滤波器作为波长解调器件,具有解调速度快、精度高的特点,目前

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-11-18

基金项目: 国家973计划(2010CB327803)

作者简介: 杨 刚(1989—),男,硕士研究生,主要从事新型光纤光栅传感与解调系统等方面的研究。

E-mail: ericyang012@gmail.com

导师简介: 许国良(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光通信系统、器件及其关键技术,光网络健康检测和性能监控,通信网络规划和设计等方面的研究。E-mail: xugl@nju.edu.cn(通信联系人)

在工程中应用最广泛。但在实际应用中由于压电陶瓷的温度漂移性、蠕动性、非线性^[10]等特性,若直接通过电压和波长之间的对应关系难以实现高精度测量。针对这个问题,可以通过对内部压电陶瓷(PZT)的伸长量误差补偿来解决^[11],但是由于工艺处理难度较大,故这种方法一直未得到广泛应用。目前应用较多的是在系统中加入参考光栅进行补偿^[12],但参考光栅自身受到外界的环境影响较大,需要置于恒温不受力的环境中。此外,受PZT非线性的影响,驱动电压与滤波器透射中心波长的关系实际上并非严格的线性关系,因此参考光栅方法仍存在一定的误差。为了提高光纤光栅解调系统的精度或容量,国内学者提出了不少有益的方案,陈长勇等^[13]采用非测量环境中的参考光栅和数字温度计结合提供参考波长,并利用数字信号处理(DSP)实时校准滤波器波长读取值提出了一种基于实时校准技术的光纤光栅解调系统,该系统获得了5 pm的波长测量分辨率。李锦明等^[14]提出了一种基于可调谐滤波器的高精度宽量程光纤布拉格光栅(FBG)传感解调系统,该系统将F-P可调谐滤波器的输出激光锁定在传感光栅反射谱的-3 dB处,并利用标准具对光栅反射波长进行校准再通过插值拟合算法实现传感光栅中心波长的实时高精度解调,在较宽的测量范围内系统的静态波长漂移量为2 pm。李永倩等^[15]提出了一种采用结合光纤光栅和F-P标准具作为波长参考计算波长的方法,设计了一种高精度波长解调系统,该系统得到了1.13 pm的系统稳定性和1.56 pm的重复性误差。李政颖等^[16]引入光纤梳状滤波器和单峰滤波器组成的参考通路,消除F-P滤波器的非线性效应和扫描波长漂移问题,结合半导体光放大器(SOA)扫描激光器提出了一种高速大容量光纤光栅解调系统,该系统获得了2 pm的稳定性,1 pm的分辨率和5 pm的测量精度。

本文提出了一种基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统。系统利用F-P标准具代替参考光栅作为波长参考解决了F-P滤波器蠕动性、滞后性的影响,结合放大自发辐射(ASE)光源及标准具的特性采用频谱分区的方法来解决待测光纤光栅的中心波长,大大降低滤波器非线性的影响,相比已有的基于标准具的解调系统,结构比较简单,同时其系统稳定性为0.97 pm,分辨率为0.33 pm,温度解调线性度为0.9999。

2 解调系统的结构与原理

2.1 系统结构

基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统如图1所示,ASE宽带光源的光谱范围为整个C波段(1530~1565 nm),总输出功率约为20 dBm。由ASE宽带光源发出的光经过隔离器(ISO)进入F-P滤波器,滤波器由DSP控制模块经过数模转换器(DA)输出的8~18 V的锯齿波电压驱动,由于压电效应,PZT伸缩改变光纤F-P腔长,从而可扫到ASE光源发出的所有光谱范围。通过F-P滤波器后的光经过50/50的耦合器分成两路:一路光进入F-P标准具,满足标准具透射条件的光波长将被光电探测器PD1探测到,作为参考光对F-P滤波器的自由谱区进行分区及漂移补偿;另一路光通过环形器进入待测光纤光栅,满足光纤光栅布拉格反射条件的光会被反射后经过环形器,被PD2探测到。最后由DSP数据采集模块对PD1和PD2进行模数转换器(AD1和AD2)转换后,同步采集数据传输到计算机中进行数据处理及显示。

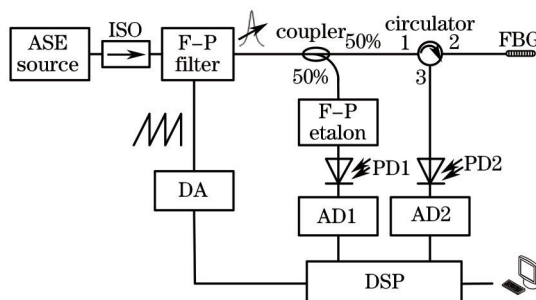


图1 系统结构图

Fig.1 System configuration

2.2 F-P标准具的标定

传统的F-P滤波器解调方法利用标定的F-P滤波器驱动电压与波长的线性关系来进行波长解调。但由于F-P滤波器存在蠕动、温度漂移及非线性等问题,不同时间的F-P滤波器透射的中心波长与其驱动电压的

变化形式是不同的,所以无法拟合成一个统一的数学表达式。

为了消除F-P滤波器引入的影响,采用光纤F-P标准具作为波长参考,在-5℃~70℃范围内,标准具的波长漂移量为0.067~0.093 pm/℃,即标准具有良好的温度稳定性。通过对两个通道进行同步采样可以动态校准温度漂移或蠕动导致的相对位置变化;同时F-P标准具透射谱中相邻两峰之间的平均间隔为0.8 nm,可将F-P滤波器自由谱区分区,每个区内的电压对波长的变化可认为是线性关系,即可通过频谱分区的方法,分段解调出光纤光栅传感器反射峰准确的中心波长。

作为波长参考的F-P标准具的标定在系统中至关重要。采用多波长计(Agilent86122A,波长精度为±0.3 pm)直接标定F-P标准具透射峰波长的方法,利用ASE光源和多波长计测得标准具透射谱的每个透射峰的波长。如图2所示,按照次序组成一个 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_c, \dots, \lambda_m]$ 的数组作为F-P标准具的参考波长,同时设定图中左半边最高的峰作为特征峰 λ_c ,波长为1532.7046 nm。

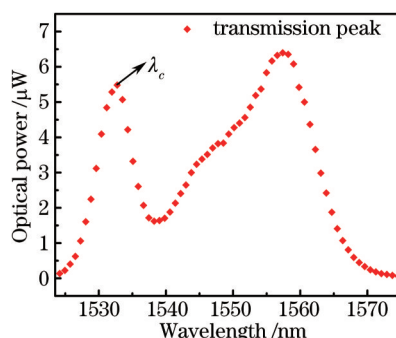


图2 利用多波长计标定标准具
Fig.2 Calibration results of F-P etalon by multi-wavelength meter

2.3 频谱分区解调法

标定好F-P标准具后,采用频谱分区解调的方法解调波长,分为3步:1) 标准具及待测光栅动态寻峰;2) 动态匹配校准;3) 分段解调波长。

图3(a)给出了实验中测得的F-P标准具的透射谱和待测光栅的反射谱,图中蓝色实线为F-P标准具的透射谱,红色虚线为待测光栅的反射谱,右边峰值最高的峰 λ_c 为系统特征峰。

对F-P标准具的透射峰的光谱进行波峰检测,如图3(b)所示,设定一个阈值 T ,低于该阈值的所有数据均设置为0,将高于该阈值的数据保留原来的值。选择不为零的数据段,对其进行高斯拟合,寻出峰值位置,接着将所有峰值依次存在一个数组中,最终得到一个F-P标准具实时透射波峰的横轴位置的数组 $[\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_n]$,其中 χ_n 表示第 n 个透射峰所在的横轴位置,同时找出右半边最高的峰即为特征峰 λ_c (横坐标为 χ_i)。接着对光栅反射峰的检测,可以得到待测光栅实时反射峰中心波长 λ_0 的横轴位置 χ_0 。

根据 λ_c 对应的横坐标 χ_i 及标定的参考波长数组 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_c, \dots, \lambda_m]$ ($m \geq n$),匹配后得到动态校准的实时F-P标准具透射峰波长与横轴的位置关系为 $[\chi_1, \lambda_{c-i+1}; \chi_2, \lambda_{c-i+2}; \dots, \chi_i, \lambda_c; \dots; \chi_n, \lambda_{c-i+n}]$ 。

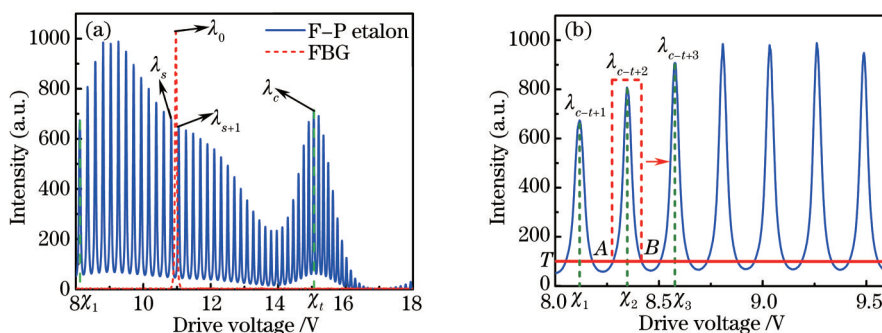


图3 (a) 实验测得的光栅反射谱及标准具透射谱;(b) 动态寻峰示意图

Fig.3 (a) Measured reflection spectrum of FBG and transmission spectrum of F-P etalon; (b) schematic diagram of peak detection

将标准具透射谱中相邻的两个峰分为一个分区,则可将透射谱分成 $n-1$ 个分区,再根据待测光栅的反射峰 λ_0 的横坐标 χ_0 与 $[\chi_1, \dots, \chi_n]$ 的关系可判断出 λ_0 所在的分区。如图 3(a)所示,这里假设 λ_0 落在波长为 λ_s 到 λ_{s+1} 的分区中(设其横轴坐标分别为 χ_s 和 χ_{s+1}),同时每一分区内电压与波长可认为是线性的,则根据公式:

$$\lambda_0 = \lambda_s - \frac{\chi_s - \chi_0}{\chi_s - \chi_{s+1}} \times (\lambda_s - \lambda_{s+1}), \quad (1)$$

可以计算出待测光纤光栅的实际波长 λ_0 。

3 实验结果及分析

3.1 解调方法对比测试

将标定过的光纤光栅温度传感器放于恒温箱中,其波长与温度的线性度为 0.9999,温度系数为 0.011 nm/℃,设定恒温箱(分辨率为 0.06 ℃)温度为 50 ℃。该温度下所用光纤光栅的反射中心波长为 1550.1050 nm。然后分别采用基于参考光栅的传统 F-P 滤波器法和频谱分区解调法进行实时波长解调,每分钟解调 3 次。图 4 给出了 1 h 的解调对比实验结果,图中红线表示传统滤波器法的解调结果,蓝线表示频谱分区方法解调的结果。可以得到传统方法波长测量值波长波动范围在 ± 4.86 pm 内,且测量值的均方差为 1.51 pm;而频谱分区法解调的波长波动范围在 ± 0.70 pm 内,且均方差为 0.23 pm。两种方法对比可知,采用频谱分区法比传统 F-P 滤波器法的系统稳定性提高了一个数量级。

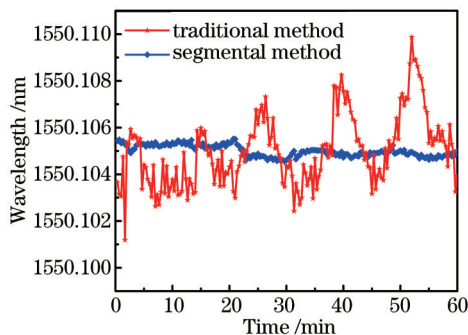


图 4 传统方法和频谱分区法测试结果对比

Fig.4 Comparison of results of system when adopting methods of traditional F-P filter and spectrum segmentation

3.2 稳定性测试

对系统进行长时间稳定性测试,在连续 72 h 内,每分钟解调 3 次,共得到 12960 组波长解调结果。如图 5 所示,解调的波长集中在 (1550.1050 ± 0.00097) nm 内,且均方差为 0.33 pm,所以该方法的系统的稳定性为 0.97 pm,分辨率为 0.33 pm。因此,采用频谱分区法可以有效地降低 F-P 滤波器对系统的影响,大大提高了解调系统的稳定性和分辨率。同时,由于系统的稳定性受到恒温箱的分辨率的影响,如果能提高恒温箱的分辨率,则可得到更好的系统稳定性结果。

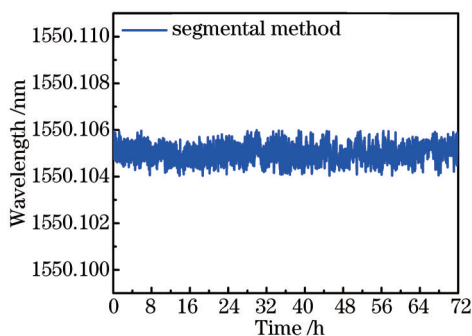


图 5 长时间系统稳定性测试结果

Fig.5 Test results of long-time stability experiment

3.3 温度测试

将待测光纤光栅温度传感器放在恒温箱中,将温度从40℃升至80℃,每隔5℃测量一次。当恒温箱达到设定温度后,保温10~20 min后分别采用传统F-P滤波器法和频谱分区解调法进行实时温度解调。传统F-P滤波器法测得的结果如图6(a)所示,对测试点做线性拟合,其线性度 $R^2=0.9989$;而采用频谱分区解调法测得的光栅传感器随温度变化结果如图6(b)所示,对测试点做线性拟合,其 $R^2=0.9999$ 。可以得出,相比较基于参考光栅的传统F-P滤波器法,使用频谱分区法的解调系统具有更好的温度解调线性度。

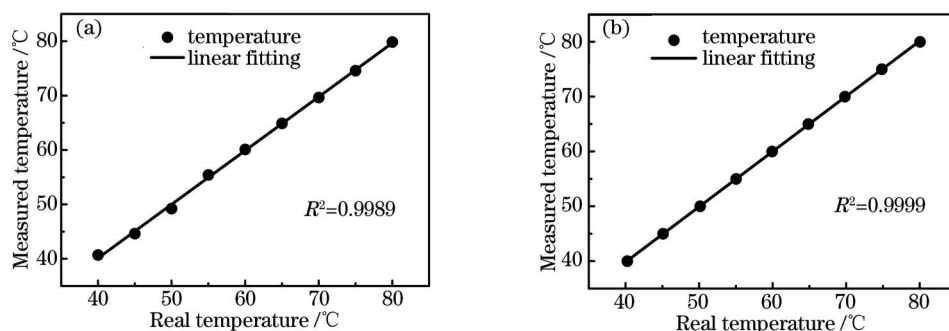


图6 分别采用(a)传统F-P滤波器法和(b)频谱分区法温度测试结果对比

Fig.6 Comparison of the test results of temperature experiment when adopting methods of (a)traditional F-P filter and (b) spectrum segmentation

3.4 讨 论

该光纤光栅波长解调系统的解调精度主要受到两个方面影响,一个是系统的自身温度漂移,另一个是采用频谱分区法时峰值提取精度。

在系统中,标准具和FBG都置于F-P滤波器后端,故标准具补偿了F-P滤波器导致的温度漂移,标准具的温度漂移即为系统的自身温度漂移,而实验室内环境温度变化不超过3℃,所以系统自身温度漂移低于0.279 μm。但若在外界或者实际工程应用这类外界环境影响较大的场景中使用,为了达到系统设定的解调精度,则需要对标准具进行温控。

频谱分区法中标准具、光栅反射峰的峰值提取算法均使用高斯拟合。根据(1)式可得波长解调误差为

$$\Delta\lambda_0 = \sqrt{\left\{ \frac{\partial \left[\lambda_s - \frac{\chi_s - \chi_0}{\chi_s - \chi_{s+1}} \times (\lambda_s - \lambda_{s+1}) \right]}{\partial \chi_s} \Delta\chi_s \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial \left[\lambda_s - \frac{\chi_s - \chi_0}{\chi_s - \chi_{s+1}} \times (\lambda_s - \lambda_{s+1}) \right]}{\partial \chi_{s+1}} \Delta\chi_{s+1} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial \left[\lambda_s - \frac{\chi_s - \chi_0}{\chi_s - \chi_{s+1}} \times (\lambda_s - \lambda_{s+1}) \right]}{\partial \chi_0} \Delta\chi_0 \right\}^2} \quad (2)$$

式中 χ_s 、 χ_{s+1} 、 χ_0 为高斯拟合得到的峰值位置, $\Delta\chi_s$ 、 $\Delta\chi_{s+1}$ 、 $\Delta\chi_0$ 为拟合误差, λ_s 、 λ_{s+1} 为标定得到的标准具的波长值,故(2)式可化简为

$$\Delta\lambda_0 = \sqrt{\left[\frac{(\chi_0 - \chi_{s+1})(\lambda_s - \lambda_{s+1})}{(\chi_s - \chi_{s+1})^2} \Delta\chi_s \right]^2 + \left[\frac{(\chi_s - \chi_0)(\lambda_s - \lambda_{s+1})}{(\chi_s - \chi_{s+1})^2} \Delta\chi_{s+1} \right]^2 + \left[\frac{\lambda_s - \lambda_{s+1}}{(\chi_s - \chi_{s+1})^2} \Delta\chi_0 \right]^2} \quad (3)$$

计算可得 $\Delta\lambda_0=0.2169 \mu\text{m}$,即本系统采用高斯拟合提取峰值对解调波长的影响为0.2169 μm。

4 结 论

针对传统基于滤波器法的光纤光栅解调系统中F-P滤波器的蠕动、温度漂移、非线性问题,利用ASE光源的光谱特性,提出了一种利用F-P标准具进行频谱分区解调得到待测光栅实际波长的方法。实验结果表明,本系统有效提高了F-P滤波器法的波长解调稳定性及温度解调线性度,降低了解调误差,同时该系统结构简单,可在系统中加入更多光纤光栅进行复用,使应用范围更广。

- 1 Ling H, Lau K, Cheng L, *et al.*. Viability of using an embedded FBG sensor in a composite structure for dynamic strain measurement [J]. *Measurement*, 2006, 39(4): 328-334.
- 2 Lin Junxiu, Wang Wenhua, Wang Xiaoxu. Study of application and evolution of fiber grating sensors technique[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2004, 44(6): 931-936.
林钧岫, 王文华, 王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展[J]. *大连理工大学学报*, 2004, 44(6): 931-936.
- 3 Yang Mu, Liu Xiuhong, Liu Wei, *et al.*. Applied research of optical fiber sensor in oil and gas pipe corrosion monitoring[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020604.
杨 牧, 刘秀红, 刘 伟, 等. 光纤光栅传感网络在油气出地管内腐蚀监测的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020604.
- 4 Liu Hongyue, Liang Dakai, Han Xiaolin. Long-period fiber grating transverse load effect-based sensors for rebar corrosion in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406003.
刘宏月, 梁大开, 韩晓林. 基于长周期光纤光栅横向负载特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0406003.
- 5 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0114001.
- 6 Takeda S, Aoki Y, Ishikawa T, *et al.*. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test[J]. *Composite Structures*, 2007, 79(1): 133-139.
- 7 Wang Min, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.*. Research on demodulating techniques for fiber Bragg grating sensor system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(12): 54-58.
王 敏, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤布拉格光栅传感系统信号解调技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(12): 54-58.
- 8 Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(3): 236-238.
- 9 Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(16): 1370-1372.
- 10 Hunger D, Steinmetz T, Colombe Y, *et al.*. A fiber Fabry-Perot cavity with high finesse[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(6): 065038.
- 11 Fan Liuqing, Ma Li, Han Daofu, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor based on dynamic Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1005003.
范刘静, 马 力, 韩道福, 等. 基于动态法布里-珀罗腔的光纤光栅温度传感[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1005003.
- 12 Li Ying, Zhang Shulian. A novel fiber Bragg grating sensor interrogation system utilizing a tunable Fabry-Perot filter[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 237-240.
李 莹, 张书练. 基于可调谐F-P滤波器的光纤光栅解调系统[J]. *激光技术*, 2005, 29(3): 237-240.
- 13 Chen Changyong, Qiao Xueguang, Wang Xiaofeng, *et al.*. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(6): 825-828.
陈长勇, 乔学光, 王小凤, 等. 基于实时校准技术的光纤光栅传感解调系统[J]. *中国激光*, 2005, 32(6): 825-828.
- 14 Li Jinming, Ma Youchun, Yan Shubin, *et al.*. High precision and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system based on tunable filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0905002.
李锦明, 马游春, 闫树斌, 等. 基于可调谐滤波器的高精度宽量程光栅传感解调系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905002.
- 15 Li Yongqian, Yao Guozhen, Yang Zhi. A high precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1405-1411.
李永倩, 姚国珍, 杨 志. 一种高准确度光纤光栅波长解调系统[J]. *光子学报*, 2012, 41(12): 1405-1411.
- 16 Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306007.

栏目编辑: 王晓琰