

基于波长扫描的分布反馈有源光纤光栅传感器波长解调

刘鹏飞 郝凤欢 何少灵 刘瑞 葛辉良

中国船舶重工集团公司第七一五研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 提出了一种以可调谐滤波器实现波长扫描、以标准具实现波长标定的有源光纤光栅传感器波长解调方法, 并搭建了相应的解调系统。对所提出的解调方法的可行性及解调系统的测量精度与稳定性进行了实验验证。结果表明, 该方法可以准确地测量有源光纤光栅的光波长; 解调系统在 1533~1550 nm 波长范围内的解调精度高于 6 pm, 测量波动范围在 ± 5.7 pm 之间。

关键词 传感器; 光纤传感器; 有源光纤光栅; 波长解调; 波长扫描

中图分类号 TN212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1010002

Wavelength Demodulation for Distributed Feedback Active Fiber Grating Sensor Based on Wavelength Scanning

Liu Pengfei Hao Fenghuan He Shaoling Liu Rui Ge Huiliang

715th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A wavelength demodulation method for the active fiber grating sensor is proposed. A tunable filter is used for wavelength scanning, and an etalon is used for wavelength calibration in this method. The corresponding demodulation system is set up. The feasibility of the demodulation method and the accuracy and stability of the demodulation system are verified experimentally. The results show that the proposed method can measure the wavelength of the active fiber grating accurately. When the wavelength range is from 1533 nm to 1550 nm, the accuracy of the demodulation system is higher than 6 pm, and the fluctuation range is within ± 5.7 pm.

Key words sensors; fiber sensors; active fiber Bragg gratings; wavelength demodulation; wavelength scanning

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 060.3738; 130.6010

1 引言

光纤光栅传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、耐温性好、复用能力强、距离传输远、抗电磁干扰等特性, 已广泛应用于土木工程结构的健康监测^[1]、航空航天^[2]、海洋环境监测^[3]等领域。近年来, 随着对光纤光栅传感器的精度、分辨率、灵敏度等性能指标要求的提高, 现有的无源型光纤光栅传感器已难以满足实际需求。对光纤光栅传感器进行增敏^[4]或者提高解调仪的检测精度及分辨率^[5-6], 可以实现高性能光纤光栅传感器。但是, 对传感器进行增敏的同时可能引入稳定性差等问题, 无源型光纤光栅较宽的线宽特性限制了提高解调仪检测分辨率性能的技术途径。

有源光纤光栅 (AFBG) 传感器的传感单元为分布反馈 (DFB) 光栅, 线宽极窄, 通常仅为 kHz 量级。有源光纤光栅传感器以及相应的解调仪器构成的传感系统具有高测量分辨率与高测量精度, 满足高精度测量的需求。对于有源光纤光栅传感器, 传感光波长的测量可以通过光谱仪法^[7]、干涉解调法^[8]、边缘滤波法^[9]、波长扫描法^[10]等方法实现。光谱仪法通过调节衍射光栅的角度, 分离出不同的波长进行探测, 该方法操作简单; 但是普通光谱仪存在分辨率低、扫描速度慢、体积大等问题。干涉解调法通过检测相位的变化实现波长解调, 适合高分辨率的动态测量; 但在实际应用中易受外界温度、应力的干扰。边缘滤波法基于光强检测, 具

收稿日期: 2016-05-05; 收到修改稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家 863 计划 (2013AA09A412)

作者简介: 刘鹏飞 (1988—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: liupengfei828@126.com

有较好的线性输出,适用于动静态测量;但是该方法易受传输性能的影响,且测量精度较低。波长扫描法主要采用可调法布里-珀罗(F-P)滤波器对探测光谱进行扫描,并利用可调 F-P 滤波器的驱动电压与滤波光谱的对应关系计算光纤光栅的反射波长;但由于可调谐滤波器具有迟滞及蠕变特性,对环境温度比较敏感,因此该方法的稳定性不好,测量精度不高。为了避免上述误差对波长解调准确度的影响,通常在基于可调滤波器的无源光纤光栅解调系统的光路中加入标准具作为参考通道,以提高解调系统的解调精确性,但该方法无法直接应用于有源解调系统。

为了提高有源光纤光栅传感器波长解调系统的解调准确度及稳定性,本文提出了一种基于波长扫描的有源光纤光栅波长解调系统,该系统采用可调 F-P 滤波器实现波长扫描,以 F-P 标准具作为波长参考,实现了有源光纤光栅的波长解调,避免了可调 F-P 滤波器本身的温度、迟滞及蠕变特性对解调精度的影响。

2 原 理

提出的基于波长扫描的有源光纤光栅波长解调系统如图 1 所示。系统光路中,980 nm 抽运光源用于激励作为传感光栅的有源光纤光栅,并利用波分复用器(DWDM)产生 1550 nm 波段的传感光。参考部分包括放大自发辐射(ASE)光源、光衰减器以及 F-P 标准具。ASE 光源和 F-P 标准具用于产生标准的梳状光;光衰减器用于调节进入 F-P 标准具的光强,使 F-P 标准具出射的梳状光光强低于传感光光强。传感光与标准的梳状光经过合束器会合,进入可调 F-P 滤波器;在控制与处理单元产生的三角波电压驱动下,可调 F-P 滤波器对会合光进行扫描;光探测器及控制与信号处理单元完成对扫描光信号的探测与处理。有源光纤光栅采用 $\lambda/4$ 型相移掺铒光纤光栅(λ 为光纤光栅的中心波长),中心波长为 1550 nm,输出光功率大于 $100 \mu\text{W}$,抽运后输出的光线宽约为 3 kHz。

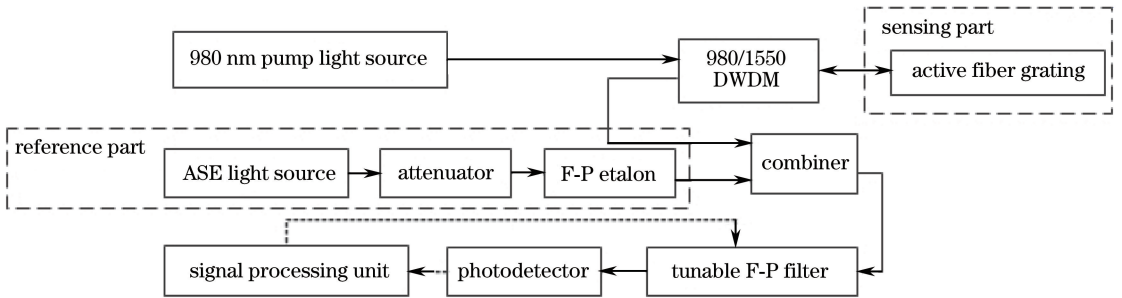


图 1 有源光纤光栅的波长解调系统原理示意图

Fig. 1 Schematic of the active fiber grating wavelength demodulation system

图 2 为探测获得的传感光谱与标准具梳状光谱叠加的结果示意图,其中强度最高的波峰为有源传感光栅形成的反射峰,其他波峰为 F-P 标准具的透射梳状波峰。有源光纤光栅波长解调的算法主要分为 3 个部分:光谱滤波、传感波峰与参考波峰的寻峰与识别、波长计算。光谱滤波处理主要是去除信号噪声;寻峰与识别处理是有源光纤光栅波长解调的重要环节,此过程主要完成对参考波峰与传感波峰位置的确定以及对参考波峰与传感波峰的区别与识别;光波长计算可得到所需要的传感光栅波长。这里采用高斯寻峰方法完成

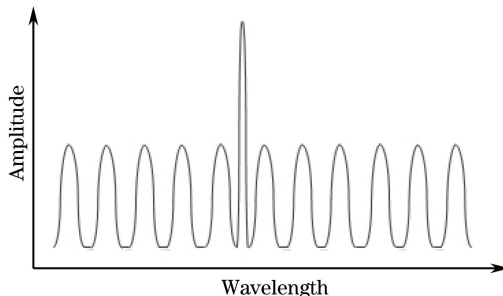


图 2 传感光谱与标准具光谱叠加示意图

Fig. 2 Diagram of the spectrum superposition of sensing spectrum and etalon spectrum

对传感波峰与参考波峰的寻峰处理,采用线性插值方法实现对传感波峰的波长计算。

在设计的有源光纤光栅波长解调系统中,为了消除可调 F-P 滤波器本身的温度效应、迟滞特性及蠕变特性对解调精度的影响,系统采用波长标记的热稳定 F-P 标准具产生的标准梳状光谱作为波长参考,并对可调 F-P 滤波器与 F-P 标准具进行恒温控制。将半导体制冷器(TEC)置于恒温盒内,TEC 底部紧贴于恒温盒底部表面,保证 TEC 为恒温盒与外界进行热交换的唯一通道;然后将可调 F-P 滤波器与 F-P 标准具固定于 TEC 上表面;利用热敏电阻和 TEC 对恒温盒内的温度进行反馈调节以实现恒温控制,温度控制精度在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。在温度为 $-2\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内对 F-P 标准具进行高低温环境测试。未进行温度控制时,F-P 标准具的波长漂移量约为 $6.5\text{ }\mu\text{m}$;温度控制后,F-P 标准具的波长漂移量约为 $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 。F-P 标准具对温度的控制避免了温度变化引起的标准具波长漂移,从而保证系统的稳定可靠。在恒温环境下,利用光多波长计测量 F-P 标准具产生的标准梳状参考光谱,得到参考光谱各个波峰的波长,并以此作为有源光纤光栅波长计算的参考标准。传感光和参考部分输出的标准梳状参考光经过合束器后在可调 F-P 滤波器处同时进行扫描,从而保证了系统的准确度。采用高强度传感光谱与低强度标准梳状光谱叠加的方式,实现了标准具梳状光谱对传感光谱的标定与实时校准,实现了系统对有源光纤光栅绝对波长的准确测量。

3 实验结果与讨论

按照图 1 所示的有源光纤光栅波长解调原理图搭建系统。实验采用高功率 980 nm 抽运光源作为激励光源,参考部分的 ASE 宽带光源的带宽为 38.2 nm ,可调 F-P 滤波器的自由光谱范围为 98.8 nm ,F-P 标准具的自由光谱范围为 99.77 GHz ,精细度为 14。实验中通过数据采集卡(美国国家仪器公司)为可调滤波器提供三角波驱动电压(扫描频率为 2.5 Hz),并采集光电探测器的输出信号。图 3 为光电探测器接收的信号光谱图,其中负峰为起标记作用的标准具透射峰。

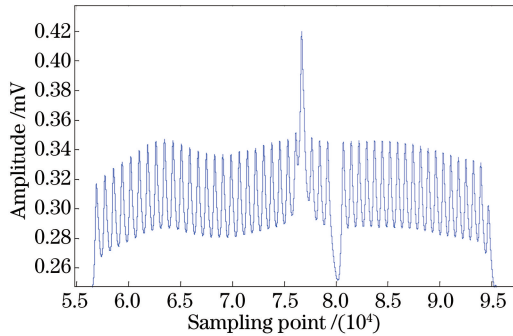


图 3 光电探测器接收的信号光谱图

Fig. 3 Signal spectrum received by photodetector

为了验证解调方法的有效性以及测试解调系统的性能,以有源光纤光栅温度传感器为研究对象开展了对解调系统的性能测试。有源光纤光栅温度传感器采用金属管单端封装方式,毛细黄铜管作为封装外壳,有源光纤光栅单端固定于外径为 0.8 mm 、内径为 0.3 mm 、长度为 7 mm 的封装外壳内,光栅的栅区呈自由状态。封装后的有源光纤光栅温度传感器具有对环境温度的快速响应特性和长期稳定性。

3.1 系统解调精度测试

在系统的解调精度测试中,选择中心波长为 $1533\sim 1550\text{ nm}$ 范围内的 7 个有源光纤光栅温度传感器作为测试对象。光纤光栅温度传感器处于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴槽中,连续记录了解调系统对这 7 个有源光纤光栅温度传感器的波长输出结果,并与多波长计(Bristol 428A)的测量结果作比较。图 4 为有源光栅解调系统解调波长与多波长计记录的波长结果。对有源光栅解调系统的解调波长结果与多波长计输出结果作线性拟合,得到线性拟合的线性度为 99.99% ,因此该解调系统在 $1533\sim 1549\text{ nm}$ 的波长解调范围内具有很好的线性度。分析测试结果,得到该系统的解调精度约为 $6\text{ }\mu\text{m}$,验证了提出的有源光纤光栅波长解调方法的有效性。

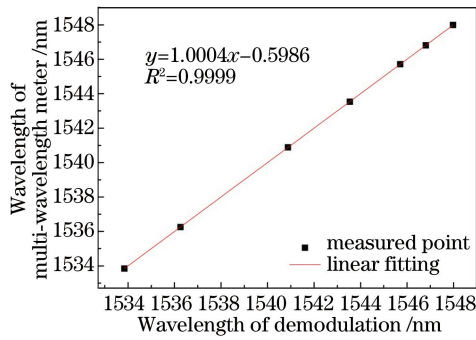


图 4 有源光纤光栅解调系统的解调波长与多波长计测量的波长结果

Fig. 4 Demodulated wavelength of active fiber grating demodulation system and measured wavelength of multi-wavelength meter

3.2 解调系统稳定性测试

在解调系统的稳定性测试中,首先测量了有源光纤光栅温度传感器在不同温度时解调系统的输出结果。实验中将中心波长约为 1546 nm 的有源光纤光栅温度传感器置于恒温水浴槽中,连续记录水浴温度分别为 4, 20, 35 °C 时解调系统的波长测量值,并与相同测量环境下波长计的测量结果作对比。图 5 为解调系统在上述 3 个温度测量点下连续测量 100 次的波长输出结果。由图 5(a)可得,当水浴温度为 4 °C 时,解调的波长峰峰值为 9 pm,标准偏差为 1.87 pm,多波长计测量的峰峰值为 0.5 pm;由图 5(b)可得,当水浴温度为 20 °C 时,解调的波长峰峰值为 11.7 pm,标准偏差为 2.62 pm,多波长计测量的峰峰值为 0.38 pm;由图 5(c)可得,当水浴温度为 35 °C 时,解调的波长峰峰值为 9.8 pm,标准偏差为 2.03 pm,多波长计测量的峰峰值为 0.8 pm。

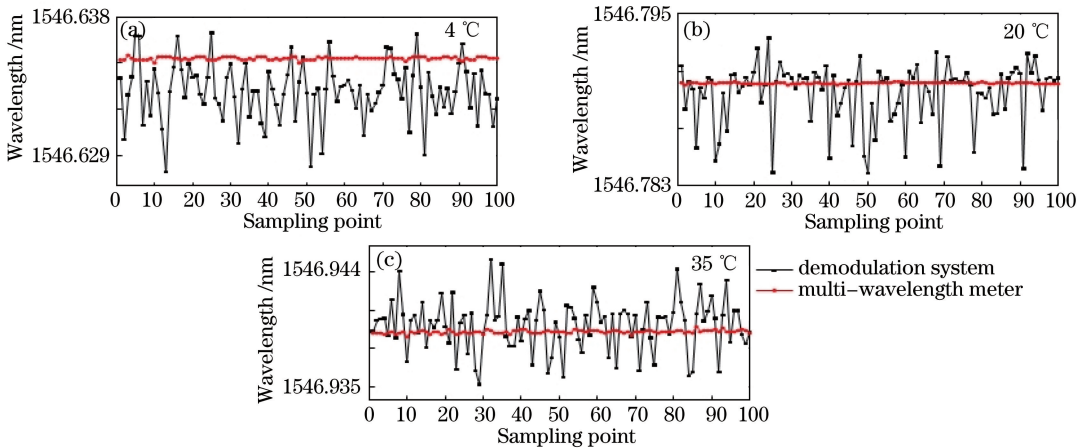


图 5 不同温度下连续记录的解调系统的解调波长与多波长计测量的波长结果

Fig. 5 Demodulated wavelengths of demodulating system and measured wavelengths of multi-wavelength meter recorded continuously at different temperatures

接下来测量了同一温度下 3 个不同的有源光纤温度传感器解调系统的输出结果。实验中选择中心波长为 1533, 1541, 1546 nm 附近的 3 个有源光纤光栅温度传感器,水浴温度设定为 25 °C。图 6 为在 25 °C 恒温环境下波长解调 100 次的的数据结果。结果显示,当传感器中心波长为 1533 nm 时,解调的波长峰峰值为 9.6 pm,标准偏差为 2.13 pm,多波长计测量的峰峰值为 0.34 pm;当传感器中心波长为 1541 nm 时,解调的波长峰峰值为 10.7 pm,标准偏差为 2.44 pm,多波长计测量的峰峰值为 1.4 pm;当传感器中心波长为 1546 nm 时,解调的波长峰峰值为 11.4 pm,标准偏差为 2.65 pm,多波长计测量的峰峰值为 0.5 pm。可以看出,搭建的解调系统与多波长计的输出波长均有一定的波动,原因可能是激光器(DFB-FL)的线宽特性受到自发辐射、光栅特性、激射窗口及外界环境扰动等多个因素的综合影响^[11]。此外,系统解调算法以及可调滤波器的精细度对解调精度也有一定的影响。

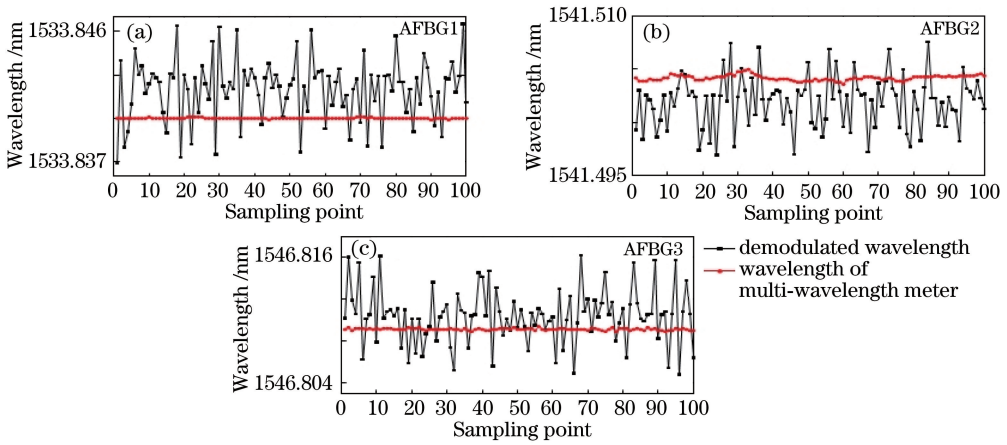


图 6 25 °C 时不同中心波长条件下系统解调波长与多波长计测量的波长结果

Fig. 6 Demodulated wavelengths of demodulation system and measured wavelengths of multi-wavelength meter with different central wavelengths at 25 °C

3.3 有源光纤光栅温度传感器温度灵敏度及精度测试

解调系统测试有源光纤光栅温度传感器的灵敏度及精度时,将温度传感器置于恒温水浴槽内,调整水槽温度从 3 °C 上升至 42 °C,上升间隔为 5 °C。当每个温度点的温度稳定后,记录传感器的解调系统的输出波长。水槽的实际温度由高精度温度计读取。对测试得到的输出波长与温度进行线性拟合,得到有源光纤光栅温度传感器的温度灵敏度曲线,如图 7 所示。选取 5 个温度点作为传感器精度测量点,测量精度如表 1 所示。

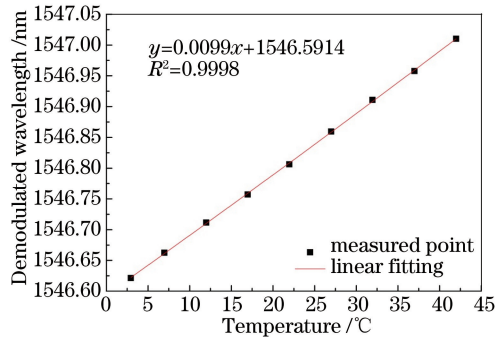


图 7 有源光纤光栅温度传感器温度灵敏度曲线图

Fig. 7 Temperature sensitivity curve of active fiber grating temperature sensor

表 1 有源光纤光栅传感系统温度测量精度

Table 1 Temperature measurement accuracy of active fiber grating demodulation system

Temperature of demodulation system	Standard temperature	Measurement accuracy
4.976	4.959	-0.017
9.990	9.798	0.192
19.983	20.045	-0.062
29.975	29.869	0.106
39.971	40.213	-0.242

由图 7 和表 1 可知,温度传感器的温度系数为 9.9 pm/°C,一次拟合线性度为 99.98%,在 5~40 °C 温度范围内解调系统的温度测量精度为 0.25 °C。有源光栅解调系统较好地解调出传感器每个温度对应的波长,保证了有源光栅温度传感器的测量准确度。

4 结 论

提出了一种以可调谐滤波器实现波长扫描、以标准具实现波长标定的有源光纤光栅解调方法,搭建了有源光纤光栅波长解调实验系统,验证了该解调方法的可行性及相应的解调系统的测量精度与稳定性。实验

结果表明,提出的有源光栅波长解调方法可以准确测量有源光纤光栅的光波长,解调系统在1533~1550 nm 波长范围内的解调精度小于6 pm,测量波动在±5.7 pm之间。提出的有源光纤光栅波长解调系统通过F-P标准具对可调谐滤波器的测量光谱进行实时校准,因此系统具有较高的测量精度和较好的稳定性。

参 考 文 献

- 1 Li Dongsheng, Li Hongnan. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(4): 435-441.
李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 435-441.
- 2 Lu Guan, Liang Dakai. Vibration inspection of aerofoil fuel tank with composite material surface based on optic fiber grating sensors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(4): 34-37, 66.
陆 观, 梁大开. 基于光纤光栅传感器的飞机油箱表面复合材料板振动研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4): 34-37, 66.
- 3 Zhang dengpan, Wang Jin, Wang Yongjie. Fast response properties of ocean temperature sensors based on fiber Bragg grating[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(3): 7-12.
张登攀, 王 璠, 王永杰. 光纤光栅海洋温度传感器的快速响应特性[J]. 光电工程, 2015, 42(3): 7-12.
- 4 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.* High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605003.
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003.
- 5 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.
- 6 Chen Zhijun, Bai Jian, Wu Zutang, *et al.* Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber Bragg grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1112001.
陈志军, 白 剑, 吴祖堂, 等. 光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 1112001.
- 7 Zhou B, Chen Z, Zhang Y B, *et al.* Active fiber gas sensor for methane detecting based on a laser heated fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1069-1072.
- 8 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, *et al.* Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305005.
李东明, 陈 军, 葛辉良, 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305005.
- 9 Ma Weichao, Chen Shaohua, Zhao Kun, *et al.* Phase-shifted fiber Bragg grating strain sensor demodulated by edge filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905004.
马伟超, 陈少华, 赵 昆, 等. 边缘滤波法解调的相移光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905004.
- 10 Cong S, Sun Y X, Zhao Y X, *et al.* Demodulation of a fiber Bragg grating strain sensor by a multiwavelength fiber laser [C]. SPIE, 2012, 8409: 84091M.
- 11 Ni Jiasheng, Zhao Yanjie, Wang Chang, *et al.* Research on linewidth characteristics and broadening mechanism of distributed feedback fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 082405.
倪家升, 赵燕杰, 王 昌, 等. 分布反馈式光纤激光器线宽特性及其展宽机理研究[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 082405.