

doi:10.3788/gzxb20184705.0506002

# 基于全相位滤波技术的 FBG 降噪解调算法

刘琨<sup>1</sup>, 李鑫<sup>1</sup>, 江俊峰<sup>1</sup>, 黄翔东<sup>2</sup>, 张皓杰<sup>2</sup>, 王超<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 刘铁根<sup>1</sup>

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 天津大学光纤传感研究所, 天津市光纤传感工程中心,  
天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘 要:**提出一种基于全相位滤波技术的光纤布喇格光栅降噪解调算法,该算法根据信号的数字频率特征快速配置适应于该信号的滤波器系数,由传感信号的数字截止频率控制滤波器边界,有效滤除混杂在光纤布喇格光栅信号中的高频分量.推导了滤波器解析表达式,结合光纤布喇格光栅信号的数字频率特征分析了滤波器幅频特性.实验结果表明,该算法对不同采样间隔下的传感信号能够实现适应性降噪;与高斯拟合法相比,解调波长稳定性相近,但平均解调时间缩短了 10 倍,与质心法相比,解调波长稳定性提高了 30%.

**关键词:**光纤布喇格光栅;解调算法;全相位滤波;采样间隔;降噪

中图分类号:TP212; TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0506002-6

## FBG Sensing Noise Reduction Demodulation Algorithm Based on All-phase Filters

LIU Kun<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, JIANG Jun-feng<sup>1</sup>, HUANG Xiang-dong<sup>2</sup>,  
ZHANG Hao-jie<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, LIU Tie-gen<sup>1</sup>

(1 School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Tianjin University, MEC, Tianjin 300072, China)

(2 School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A demodulation algorithm based on all-phase filters was proposed for fiber Bragg grating noise reduction. The all-phase filter can configure the filter coefficients rapidly and flexibly according to the frequency characteristics of the fiber Bragg grating signal, which can effectively filter out the high-frequency components mixed in the original signal by controlling the filter boundary adaptively. The analytical expression of the filter was deduced, and the amplitude-frequency characteristics of the filter was analyzed with the digital frequency characteristics of fiber Bragg grating signals. The experimental results show that the proposed filtering algorithm has an adaptive performance in processing fiber Bragg grating signals at different sampling intervals. This algorithm has a similar wavelength stability compared with the Gaussian fitting method, but the average demodulation time is shortened by 10 times. The wavelength demodulation stability is improved by 30% compared with the centroid method.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Demodulation algorithm; All-phase filter; Sampling interval; Noise reduction

**OCIS Codes:** 060.3735; 070.2025; 350.2460

## 0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为一种光纤传感器件,通过外界参量对布喇格中心波长

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61227011, 61475114, 61775161)和国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ030915)资助

第一作者:刘琨(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感及光电检测. Email:beiyangkl@tju.edu.cn

通讯作者:李鑫(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email:597092006@qq.com

收稿日期:2017-12-11;录用日期:2018-02-01

<http://www.photon.ac.cn>

的调制来获取传感信息,具有体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、波长选择性好、易复用、可以进行分布式测量等优点<sup>[1]</sup>,能够测量应变、温度、压力、振动、流量等参数<sup>[2-4]</sup>,已被广泛应用于安全防范、液体检测、结构健康监测等领域,是一种使用频率高、应用范围广的光纤传感器<sup>[5]</sup>.

在实际光学测量系统中,来自系统器件与环境的光子噪声、探测器噪声、信号放大电路噪声等影响着光纤光栅的解调精度和检测准确度<sup>[6]</sup>,如何降低噪声对传感信号的影响是提高光栅传感系统检测精度的重要研究内容.

优化数字滤波及峰值提取算法是高精度测量中削减噪声影响的重要方法<sup>[7]</sup>.常用的寻峰算法的检测准确度受到设置阈值、采样间隔等影响,需要针对传感信号类型选取合适的算法设置合适的阈值<sup>[8]</sup>.数字滤波器价格低廉,不需要添加或修改硬件设备,易于实现.有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR)是用来减少光纤传感器中噪声的常用数字滤波器,在 FBG 传感系统的波长检测过程中可以提高系统信噪比和波长检测精度<sup>[9]</sup>,但该滤波器存在边界效应,当滤波对象频率特征改变时,需要改变滤波器的一系列参数来达到滤波效果,较为复杂.小波变换和经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是信号分析的常用工具,近几年也应用于 FBG 传感信号的去噪,用这两种方法处理光纤光栅反射光谱,能有效提高 FBG 传感器峰值波长检测的准确性<sup>[10-11]</sup>,但计算过程复杂、计算量大、运行时间较长,难以用在实时检测系统中.

全相位滤波最早源于图像处理中的重叠数字滤波,在处理信号时包含了频域滤波各种分段输入,能够把有关参数的所有可能都考虑到,可明显改善滤波器的性能,消除边界效应<sup>[12]</sup>.本文提出一种基于全相位滤波技术的 FBG 降噪解调算法,能够根据信号的数字频率特征快速配置全相位低通滤波器系数,有效滤去高频分量,实现适应性降噪.

## 1 全相位滤波降噪解调算法

FBG 传感系统如图 1,由放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源发出的光,经过锯齿波驱动的光纤可调谐法布里-珀罗滤波器(Fiber Fabry-Perot Tunable Filter, FFP-TF)到达 FBG 传感器,传感器反射光进入光电探测器转换成电信号,传入采集卡和计算机进行数据采集与处理.采集到的信号包含了混杂在光栅反射谱上的噪声信号,数字低通滤波器能够滤去高频数据,留下平稳、低频的有用信号,可以削弱或滤除 FBG 解调系统中存在非周期的不规则随机噪声,提高信噪比,减弱噪声对寻峰的影响<sup>[13]</sup>.

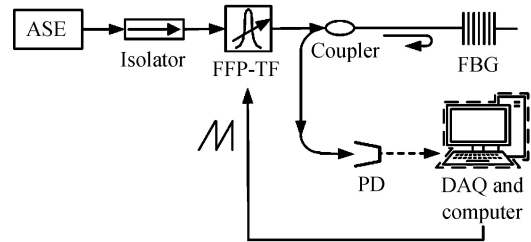


图 1 FBG 传感系统结构  
Fig.1 FBG sensing system structure

基于全相位滤波技术的降噪解调算法的核心是构造全相位低通滤波器,该滤波器由频移低通滤波器和补偿滤波器叠加组成.根据采样信号的数字截止频率确定滤波器的目标截止频率,从而“移动”低通滤波器,并对频移后的滤波器的低频区域补偿,保持任意频移后的低通特性.

### 1.1 全相位低通滤波器

首先构造频移低通滤波器.考虑到频移后滤波器的对称性,对低通滤波器的两个子边带分别操作,两个子滤波器的频率向量  $\mathbf{H}_1$ 、 $\mathbf{H}_2$ ,即

$$\begin{cases} \mathbf{H}_1 = [\underbrace{11 \cdots 11}_{m \text{ 个}} \underbrace{0 \cdots 0}_{N-m \text{ 个}}]^T \\ \mathbf{H}_2 = [\underbrace{0 \cdots 0}_{N-m \text{ 个}} \underbrace{11 \cdots 11}_{m \text{ 个}}]^T \end{cases} \quad (1)$$

对  $\mathbf{H}_1$ 、 $\mathbf{H}_2$  分别进行离散傅里叶反变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT),并将定义域延拓至  $[-N+1, N-1]$ ,加卷积窗  $w(n)$ .其中  $w(n)$  由长度为  $N$  的矩形窗和长度为  $N$  的 Hamming 反转窗卷积得到,窗函数  $w(n)$  长度为  $2N-1$ ,归一化因子  $C=w(0)$ .为获得实滤波器系数,需要对滤波器系数乘以一个频移向量  $v(n) = e^{j\pi n/N}$ .令  $\Delta\omega = 2\pi/N$ ,根据文献<sup>[14-15]</sup>的表述与证明,加卷积窗  $w(n)$  后滤波器为单窗全相位滤波器,其传递曲线严格通过频率设置点  $k\Delta\omega, k=0, 1, \dots, N-1$ ,当引入频移向量  $v(n) = e^{j\pi n/N} = e^{j0.5\Delta\omega n}$

时,根据傅氏变换频移性质,滤波器频率响应函数将严格通过频率设置点  $\omega = (k + 0.5)\Delta\omega, k = 0, 1, \dots, N - 1$ . 得到共轭对称的两个子滤波器系数向量,即

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1(n) = \frac{\mathbf{w}(n)}{NC} \sum_{k=0}^{m-1} e^{j(k+0.5)\Delta\omega n} \\ \mathbf{h}_2(n) = \frac{\mathbf{w}(n)}{NC} \sum_{k=N-m}^{N-1} e^{j(k+0.5)\Delta\omega n} \end{cases} \quad n \in [-N+1, N-1] \quad (2)$$

引入平移量  $\lambda (0 < \lambda \leq 0.5)$  实现边界频率的灵活控制,将  $\mathbf{h}_1$  向右移动  $\lambda\Delta\omega$ , 同时将  $\mathbf{h}_2$  向左移动  $\lambda\Delta\omega$ , 可得到频移后的滤波器系数向量为

$$\begin{cases} \mathbf{h}'_1(n) = \mathbf{h}_1(n) e^{j\lambda\Delta\omega n} \\ \mathbf{h}'_2(n) = \mathbf{h}_2(n) e^{-j\lambda\Delta\omega n} \end{cases} \quad (3)$$

将两个子滤波器叠加,得到频移低通滤波器  $\mathbf{g}_0(n)$  为

$$\mathbf{g}_0(n) = \mathbf{h}'_1(n) + \mathbf{h}'_2(n) = \begin{cases} \frac{2\mathbf{w}(n) \sin\left(\frac{\pi}{N}mn\right) \cos\left[\frac{\pi}{N}(m+2\lambda)n\right]}{CN \sin\left(\frac{\pi}{N}n\right)} & n \in [-N+1, -1] \cup [1, N-1] \\ \frac{2m\mathbf{w}(n)}{CN} & n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

随着频率的偏移,滤波器的频率响应在低频区会产生缺口,失去低通滤波的性质,为了填补频移滤波器缺口,需要构造补偿滤波器.频移低通滤波器幅频曲线在  $\omega = 0$  和  $\omega = 2\pi/N$  处的频率采样值  $a = |G_0(e^{j0})|$ ,  $b = |G_0(e^{j2\pi/N})|$ , 则设置补偿滤波器频率向量为

$$\mathbf{H}_c = [1-a \quad 1-b \quad \underbrace{0 \quad 0 \quad \dots \quad 0}_{N-3 \text{ 个}} \quad 0 \quad 1-b] \quad (5)$$

考虑到参数  $a, b$  会随着频移滤波器的变化而不同,利用参数可调的 Kaiser 窗作为窗函数对滤波器系数进行处理.将长度为  $N$  矩形窗与 Kaiser 窗卷积,得到优化后的 Kaiser 窗  $\mathbf{w}_\beta(n)$ , 选取中心元素  $C' = \mathbf{w}_\beta(0)$  作为归一化因子,加窗后的补偿滤波器系数表达式为

$$\mathbf{g}_c(n) = \frac{\mathbf{w}_\beta(n) [1-a + 2(1-b) \cos(2\pi n/N)]}{C'N} \quad n \in [-N+1, N-1] \quad (6)$$

将频移低通滤波器与补偿滤波器叠加,得到最终的全相位低通滤波器系数为

$$\mathbf{g}_d(n) = \mathbf{g}_0(n) + \mathbf{g}_c(n) = \begin{cases} \frac{2\mathbf{w}(n) \sin\left(\frac{\pi m}{N}n\right) \cos\left[\frac{\pi(m+2\lambda)}{N}n\right]}{CN \sin(\pi n/N)} + \frac{\mathbf{w}_\beta(n) \left[1-a + 2(1-b) \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right)\right]}{C'N} & n \in [-N+1, -1] \cup [1, N-1] \\ \frac{2m\mathbf{w}(n)}{CN} + \frac{\mathbf{w}_\beta(n) \left[1-a + 2(1-b) \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right)\right]}{C'N} & n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,只需要调整滤波器通带宽度  $m$  和平移量  $\lambda$  便可灵活配置滤波器边界频带位置.将滤波器的通带截止频率  $\omega_p$  设置为  $(m - 0.5 + \lambda)\Delta\omega$ , 阻带截止频率  $\omega_s$  设置在  $(m + 0.5 + \lambda)\Delta\omega$  处,并将信号的  $\omega_c$  设置于低通滤波器的 3 dB 截止频率位置,考虑到滤波器在通带截止频率和阻带截止频率之间的曲线近似线性,满足关系  $\omega_p = \omega_c - (1 - \sqrt{2}/2)\Delta\omega$ , 由  $0 < \lambda < 0.5$ , 可得到控制滤波器边带位置的参数  $m = \lceil \omega_p / \Delta\omega \rceil, \lambda = \omega_p / \Delta\omega - m + 0.5$ .

对于光纤布喇格传感系统,获得传感器信号的数字截止频率  $\omega_c$  即可灵活控制滤波器的边界频带位置,快速配置适用于该采样间隔下的低通滤波器.考虑到滤波器长度越长会导致计算成本的增加,由大量实验数据验证,选择  $N = 64$  即可满足不同采样间隔下的滤波处理.以采样间隔为 18 pm 的 FBG 信号为例,所期望的数字截止角频率为  $\omega_c = 0.33 \text{ rad} = 3.36\Delta\omega$ , 滤波器传输曲线如图 2.该滤波器相频响应覆盖了  $[0, 2\pi]$  的范围,实现了全相位的滤波,具有无需相位校正、计算复杂度低、根据采样信号数字截止频率快速配置的特点,

能够有效抑制高频分量,达到降噪效果.

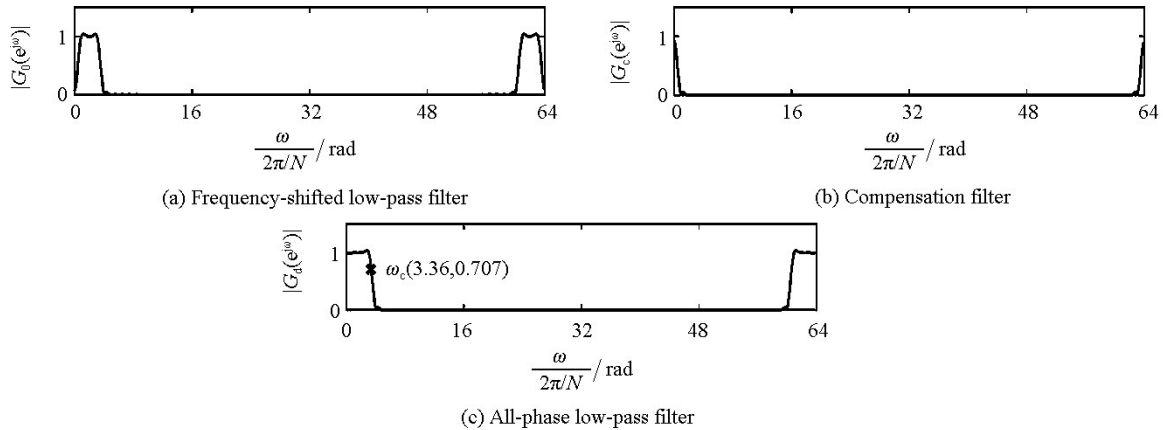


图2 全相位滤波器的幅频响应  
Fig.2 Amplitude-frequency curve of all-phase filter

### 1.2 基于全相位滤波的FBG降噪解调算法

基于全相位滤波技术的FBG解调算法流程如图3,光电探测器光电转换后的模拟信号进入采集卡,计算机软件对采集到的信号下采样控制采样间隔,下采样后可得到每帧采样点数确定的FBG信号 $x(n)$ .由该频率以下的信号能量占信号总能量的99%以上为准获取数字截止角频率 $\omega_c$ ,得到用来配置滤波器系数的 $m$ 与 $\lambda$ ,带入式(7)快速配置适用于该 $\omega_c$ 的全相位低通滤波器,信号 $x(n)$ 与全相位低通滤波器 $g_d(n)$ 做卷积运算,得到降噪后的FBG信号 $x_d(n)$ ,提取峰值.

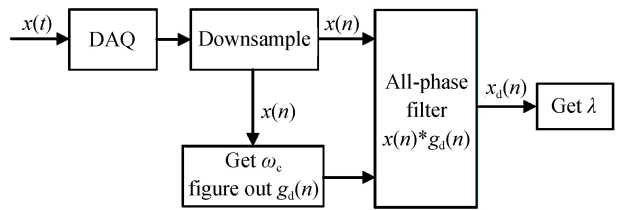


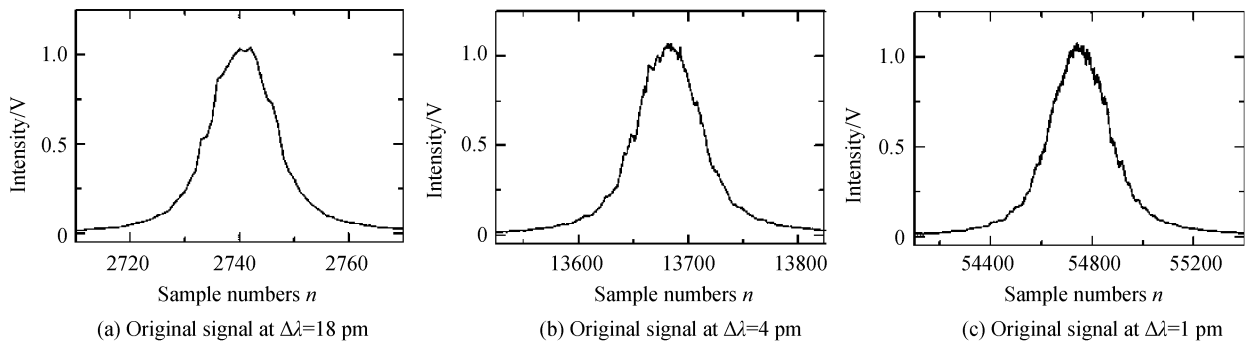
图3 全相位滤波降噪解调算法流程  
Fig.3 Flow chart of noise reduction demodulation algorithm based on all-phase filters

## 2 实验与分析

为验证算法的有效性,搭建如图1所示的传感系统,使用Labview程序控制采样间隔,获得不同采样间隔下的原始信号 $x(n)$ .

### 2.1 不同采样间隔下信号的降噪效果

使用全相位低通滤波器对不同采样间隔下原始信号 $x(n)$ 降噪,得到降噪后的信号 $x_d(n)$ .不同采样间隔下FBG降噪前后的波形如图4,(a)~(c)显示了采样间隔为18 pm、4 pm、1 pm的原始信号,(d)~(f)为对应降噪后的信号,采样间隔用 $\Delta\lambda$ 表示.从波形上看,经过全相位滤波算法处理的信号,消除了峰值位置附近的毛刺与幅值偏移,信号平滑没有畸变.



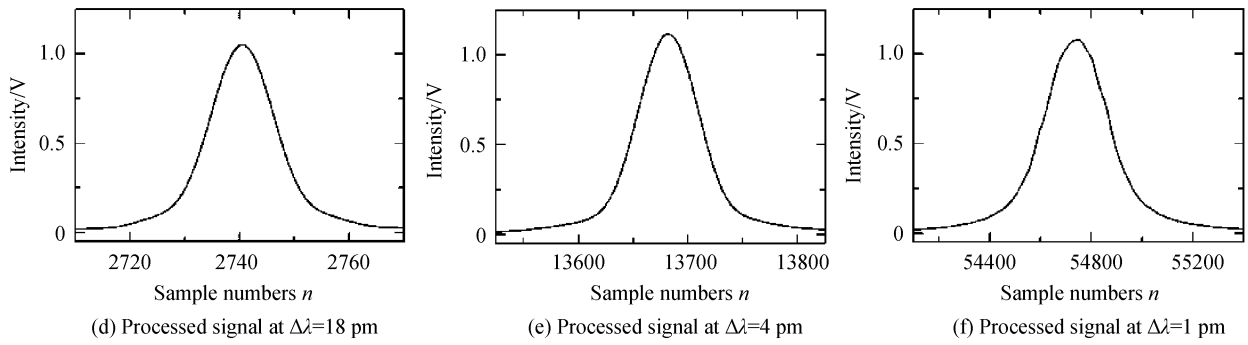


图4 不同采样间隔下原始信号与滤波后信号的对比

Fig.4 Comparison of the original and filtered signal at different sampling intervals

## 2.2 解调波长稳定性

使用全相位滤波算法与传统解调算法对不同采样间隔下的 FBG 信号解调,得到的波长标准差见表 1,其中,每种采样间隔情况下采集 500 帧数据,并确保采集过程中受温度、应变等环境因素不变。

表 1 不同采样间隔下解调波长标准差

Sampling interval/pm	35	18	9	4	2	1
All-phase filters algorithm	4.62	1.9	1.21	0.89	0.68	0.67
Gaussian fitting algorithm	4.68	1.89	1.19	0.9	0.75	0.73
Centroid detection algorithm	6.73	2.6	2.1	1.79	0.94	0.89

实验结果表明,相同采样间隔下,使用质心法解调波长标准差最大,使用全相位滤波算法与高斯拟合法解调波长标准差接近,间隔小于 4 pm 时采样全相位滤波算法解调波长标准差最小。对于同一传感通道信号,当采样间隔较大时,高于阈值的采样点数少,噪声可能导致反射光谱的波动和形变,以观测到的数据来计算,峰值波长波动性也相应的增大,精度下降<sup>[16]</sup>;当采样间隔小时,高于阈值的采样点数多,虽然随机噪声对反射光谱质心的影响将被削弱,但系统解调稳定性依然受到系统本身固有噪声、压电陶瓷非线性等因素的制约。从平均解调时间来看,三种算法随着采样间隔变小,需要处理的采样点数增多,解调时间也会相应增加,对采样间隔为 9 pm 的数据解调,全相位滤波法耗时 14 ms,高斯拟合法耗时 154 ms,质心法耗时 1.5 ms。使用全相位滤波算法降噪能够有效滤除高于传感器信号数字截止频率  $\omega_c$  的噪声影响,提高了系统解调波长的稳定性,并具有较快的解调速度。

对于 FBG 温度、应变等传感系统,采样间隔相同的情况下,传感系统的检测稳定性依赖于解调波长的稳定性,使用本算法将有效提高系统检测的稳定性及抗噪声干扰能力。

基于全相位低通滤波器的边带位置与实际采样信号数字截止频率的依赖特性,用该算法对单通道波分复用的 6 支传感器进行解调,同样获得了良好的降噪解调效果。

## 3 结论

本文针对 FBG 传感系统中噪声影响解调精度的问题,提出一种基于全相位滤波技术的 FBG 降噪解调算法。不同采样间隔下 FBG 传感器信号具有不同数字频率特征,根据信号的数字截止频率  $\omega_c$ 。配置低通滤波器边带频率能够有效滤除高频噪声,由此推导了全相位低通滤波器的解析表达式。搭建 FBG 传感系统,对不同采样间隔下的信号解调,结果表明,本算法对不同采样间隔下的 FBG 信号均有良好的降噪效果,其解调波长稳定性较质心法提高了 30%,与高斯拟合法相近,但平均解调时间缩短了 10 倍。此外,本算法对单通道波分复用多支传感器也有良好的降噪解调效果,具有广泛的应用价值。

## 参考文献

- [1] JIANG Jun-feng, YAN Jin-ling, WANG Shuang, *et al.* Research on suppression of FBG demodulation sweeping fluctuation about filter in temperature changing environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(12): 1206001.  
江俊峰, 闫金玲, 王双, 等. 环境变温下光纤布喇格光栅解调中滤波器扫描波动抑制研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(12): 1206001.

- [2] SURESH R, BHALLA S, HAO J, *et al.* Development of a high resolution plantar pressure monitoring pad based on fiber Bragg grating (FBG) sensors[J]. *Technology and Health Care*, 2015, 23(6):785-794.
- [3] QOMARUDDIN, SETIONO A, AFANDI M I. Improving frequencies range measurement of vibration sensor based on Fiber Bragg Grating (FBG)[J]. *Journal of Physics*, 2017, **817**: 012043.
- [4] LIU Qiang, ZHANG Xiao-yu, LIU Yi-ying, *et al.* Study on bending fiber Bragg grating target flow sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, **38**(02): 336-340.  
刘强, 张晓雨, 刘懿莹, 等. 弯曲光纤布喇格光栅靶式流量传感器的研究[J]. *应用光学*, 2017, **38**(02): 336-340.
- [5] CHEN Y, WU C T, LIU H L. EMD self-adaptive selecting relevant modes algorithm for FBG spectrum signal[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, **36**:63-67.
- [6] ZHONG Qi-yuan, HUANG Xian-xiang, TAN Li-long, *et al.* Effect of laser noise on the precision of fiber Bragg grating demodulation[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(09): 956-960.  
仲启媛, 黄先祥, 谭立龙, 等. 光源噪声对光纤光栅解调精度的影响[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(09): 956-960.
- [7] YING Xiang-yue, XU Tie-feng. Improvement of measurement precision of fiber Bragg grating wavelength by means of Gaussian fitting[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(03): 323-325.  
应祥岳, 徐铁峰. 高斯拟合提高光纤布喇格光栅波长检测精度[J]. *激光技术*, 2009, **33**(03): 323-325.
- [8] CHEN Zhi-jun, BAI Jian, WU Zu-tang, *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. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1112001.
- [9] NING J, ZHANG Y, CUI H. Improving SNR of fiber Bragg grating sensor by digital signal processing[C]. *SPIE*, 2007, 6713: 67130O.
- [10] HARASIM D, GULBAHAR Y. Improvement of FBG peak wavelength demodulation using digital signal processing algorithms[P]. *Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments (WILGA)*, 2015.
- [11] LI Zhi-quan, CAO Ping, WANG Ya-nan, *et al.* FBG demodulation system based on EMD denoise[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8):1367-1371.  
李志全, 曹平, 王亚男, 等. 基于经验模态分解消噪的光纤光栅解调系统[J]. *光子学报*, 2010, **39**(08): 1367-1371.
- [12] 黄翔东. 全相位数字信号处理[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [13] WU Wei, LIU Xin, CHEN Ting. FIR filter for improving the performance of Fiber Bragg Grating sensor system[J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, (2): 73-76+80.  
吴薇, 刘辛, 陈婷. FIR滤波法改善光纤布喇格光栅传感系统性能[J]. *光电子技术*, 2008, (2): 73-76+80.
- [14] SU Fei, WANG Zhao-hua. Design and implementation of all phase digital filter in DFT Domain[J]. *Signal Processing*, 2004, (3): 231-235.  
苏飞, 王兆华. DFT域全相位数字滤波器的设计与实现[J]. *信号处理*, 2004, (3): 231-235.
- [15] HUANG Xiao-hong, WANG Zhao-hua. Research and design of all phase digital filter [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2006, **20**(1): 98-103.  
黄晓红, 王兆华. 全相位数字滤波器的研究与设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2006, **20**(1): 98-103.
- [16] 王梓萌. 光纤光栅传感信号解调方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2011.