

引用格式: WANG Xiaoli, DONG Bo, CHEN Enqing, et al. Intensity Demodulation Technology of FBG Time Division Multiplexing Based on Sagnac Ring[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0506003

王晓丽,董波,陈恩情,等. 基于 Sagnac 环的 FBG 时分复用强度解调技术[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0506003

基于 Sagnac 环的 FBG 时分复用强度解调技术

王晓丽^{1,2}, 董波¹, 陈恩情^{1,2}, 李杨^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:提出了一种基于 Sagnac 光纤环的布拉格光栅时分复用强度解调方法,多个中心波长相同的光纤布拉格光栅组成时分复用传感网络,通过光纤布拉格光栅网络输出光谱的强度变化对光信号进行解调;在系统信号解调模块,采用小波分析与高斯拟合的算法对信号进行滤波处理及拟合优化处理。实验结果证明,系统信号信噪比由 8.06 dB 提高到 11.7 dB,提高了约 36%,有效提升了系统的抗干扰能力以及检测外界参量传感的准确度。该方法在极大降低解调系统成本的同时,有效提高了布拉格光栅传感器复用数量,可用于各种传感系统或者参量检测系统中。

关键词:布拉格光栅;调制;光纤传感;Sagnac 环;光学系统;时分复用

中图分类号:TP212

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215005.0506003

Intensity Demodulation Technology of FBG Time Division Multiplexing Based on Sagnac Ring

WANG Xiaoli^{1,2}, DONG Bo¹, CHEN Enqing^{1,2}, LI Yang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method of fiber Bragg grating time-division multiplexing intensity demodulation based on Sagnac fiber ring is presented. The time-multiplexing sensing system, consisted of the several FBG gratings with the same central-wavelength, can demodulate the signals by observing the intensity changes of the output spectrum of the FBG gratings. In the signal processing module, the wavelet analysis and Gaussian simulation algorithm are combined to demodulate the system signal together. The experimental results show that the signal-to-noise ratio of the system signal is increased by about 36% from 8.06 dB to 11.7 dB, which effectively improves the anti-interference ability of the system and the detection accuracy for the external parameters. The proposed method effectively increases the number of fiber Bragg grating sensors in the demodulation system with less cost and can be widely applied to various sensor systems or parameter detection systems.

Key words: Fiber Bragg grating; Modulation; Optical sensing; Sagnac ring; Optical systems; Time-division multiplexing

OCIS Codes: 060.3735; 060.4080; 280.4788; 120.5790; 120.4820

基金项目:中科院百人计划项目(No.Y829321213)

第一作者:王晓丽(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感技术。Email:wangxiaoli17@mailsucas.ac.cn

导师(通讯作者):董波(1978—),男,研究员,博士,主要研究方向为光子集成器件及信号处理。Email:bdong@opt.ac.cn

收稿日期:2020-11-20;录用日期:2021-01-07

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

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG),因其传感检测精度高、灵敏度高等众多优点而被广泛应用于各领域。FBG传感中最核心的技术是FBG传感器的信号解调技术,传统的FBG解调技术包括非平衡马赫-曾德(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)干涉仪法、CCD光谱解调技术及可调谐法布里珀罗(Fabry Perot, F-P)滤波器解调等技术。但是以上技术通常易受环境影响、成本昂贵、结构复杂、可解调的传感器FBG的数量有限,限制了FBG传感技术的广泛应用。近年来,YAN Lianshan等^[1]提出了一种使用分布反馈(Distributed Feedback,DFB)光纤激光器解调FBG信号的方法;李政颖等^[2]采用半导体光放大器和F-P滤波器组成的高速扫描激光器,设计了4通道大容量高速光纤光栅解调仪;梅佳伟等^[3]提出了将基于色散调谐宽带扫频光纤激光器应用于应变系统的光纤光栅解调方法,激光器扫频带宽达到43 nm,接近于增益带宽;李政颖等^[4]利用色散补偿光纤的色散效应,将光纤光栅的波长漂移信息转换成时域信息。以上解调方法各有优点,但解调成本依然较高,并且都是基于波分复用的解调技术,系统可解调的FBG传感器数量仍然有限。

边缘滤波法是将FBG中心波长偏移量转化为信号光强变化量的强度解调方法,可采用光电探测器进行探测,系统结构简单,制作成本较低。同时,避免了大型解调装置产生的机械移动影响,解调系统及解调能力更稳定,完全避免上述提到的传统解调技术的问题。郝文良等^[5]研究出基于高双折射光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)的双折射Sagnac环高分辨率FBG解调系统;王巨峰等^[6]将带有一段保偏光纤(Polarization Maintain Fiber, PMF)的Sagnac环作为边缘滤波器,DFB激光器的单波长激光作为参考光,对FBG波长信号和参考光信号同时进行滤波。但是,上述边沿滤波解调方法只能解调一个FBG传感器,没有体现出FBG复用传感应用的优势。因此,如果用边沿滤波法解调FBG传感器,同时扩展FBG传感器解调数量,采用边沿滤波器的时分复用技术是信号解调更好的选择。

本文提出了基于Sagnac环边沿滤波器的FBG时分复用强度解调技术,整体传感系统解调成本较低。其中,采用基于保偏光纤PMF的Sagnac环作为边缘滤波器,同时采用FBG的时分复用技术,可以有效提高FBG传感解调系统的FBG传感器复用数量。在数据处理模块,选择运用小波算法和高斯拟合的复合算法进行处理;由于FBG的反射谱波形基本符合高斯曲线分布规律,选择高斯拟合算法可以在保护信号的情况下达到更好的拟合效果。

1 FBG时分复用强度解调系统

1.1 解调系统的结构

图1展示了基于Sagnac环的FBG时分复用强度调制的传感系统结构,该FBG解调系统主要由宽带激

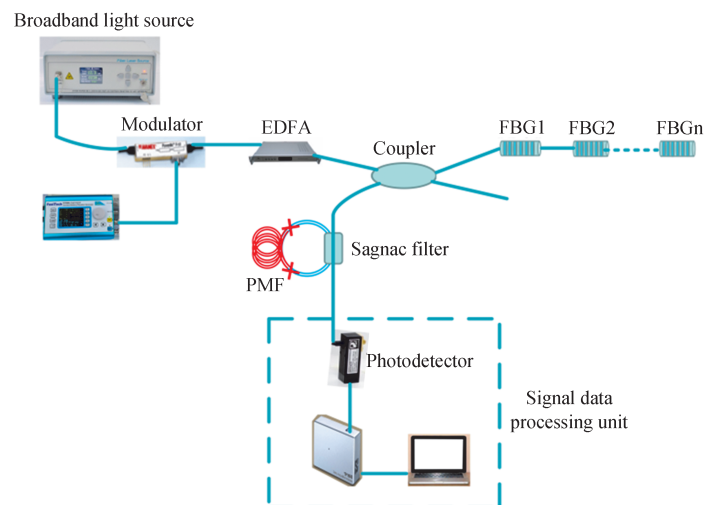


图1 强度解调系统结构

Fig.1 The structure of the intensity demodulation system

光光源、调制器、掺 Er 光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)、Sagnac 滤波器、数据采集卡和数据处理模块组成。首先,宽带光源(ASE-CL-20-M)产生的宽带光(1 525~1 605 nm)经过调制器对信号进行调制,调制信号是由频率为 20 kHz、脉宽为 10 ns 的信号发生器产生的电脉冲信号;然后,经过调制的光信号进入 1 550 nm EDFA 被放大,放大输出光的光功率为 9.7 dBm;之后,经放大的光信号通过耦合器进入时分复用的传感器 FBG 串,每一个 FBG 传感器的中心波长均为 1 550.122 0 nm,3 dB 带宽为 0.2 nm,反射率为 10%,相邻 FBG 间隔为 5 m;最终,经过 FBG 反射回来的光信号返回经过耦合器,进而进入信号解调模块,该模块包括 Sagnac 滤波器、AC-80MKz 的放大光接收器和数据处理模块。

1.2 解调系统的原理

本文的解调系统是基于时分复用和 Sagnac 滤波技术的 FBG 传感系统,FBG 沿纤维长度方向的折射率产生周期性扰动,模式耦合发生在称为布拉格波长的反射波长(λ_B)处。FBG 的反射波长取决于反向耦合模式的有效折射率和光栅周期,改变这两个参数的任何物理过程都会导致光栅波长漂移^[7]。所以,测量中心波长的漂移量或者 FBG 反射谱强度变化可以直接或间接地感知各种外部物理量的变化,这也是 FBG 用于测量各种外界参量变化的原理。FBG 传输机理如图 2 所示,其中反射波长定义为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \tag{1}$$

式中, n_{eff} 是纤芯的有效折射率, Λ 是光栅周期。

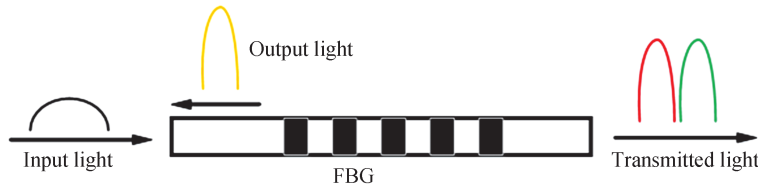


图 2 FBG 传输机理结构
Fig.2 The transmission structure of the FBG

在该系统中,光纤传感阵列由满足时分复用要求的多个相同中心波长(1 550.122 0 nm)的 FBG 组成,每个 FBG 相邻间隔为 5 m,解调信号是有着相同延时的 FBG 高斯型反射谱。脉冲光源入射到光纤光栅阵列中,依次经过光纤上位于不同位置的光纤光栅,任意两个相邻的 FBG 返回的传感信号在时间上是间隔的,不同 FBG 的反射信号会在不同时刻到达光电探测器^[8]。所以,探测器所接受到的不同光脉冲的延时反映了各个传感器的位置,光脉冲的振幅变化或中心波长的漂移变化反映了该位置 FBG 外加被测物理量的大小,即时分复用,其原理如图 3 所示。

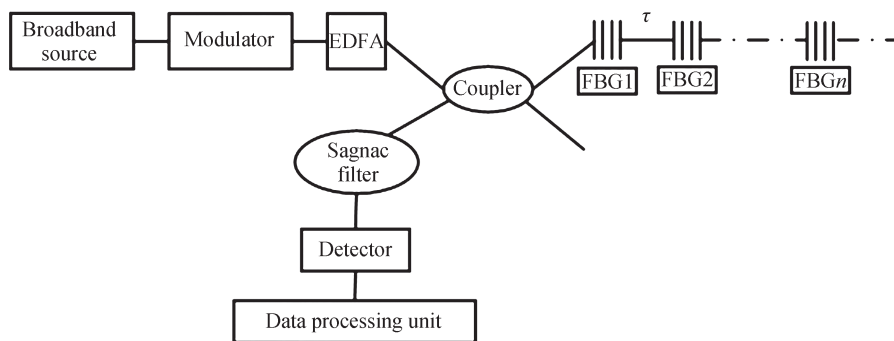


图 3 时分复用解调系统原理
Fig.3 The schematic structure of TDM demodulation system

Sagnac 环作为滤波器进行边缘滤波的原理是 Sagnac 环中顺时针和逆时针方向传输的两束光经过 PMF 的双折射,会产生两个偏振态的相位差,之后两束光会在 3 dB 耦合器处发生干涉,引入相位差。如图 4 所示,将一段 PMF(长度为 4 m)接在 3 dB 耦合器的两个臂之间,形成一个 Sagnac 环作为该解调系统的滤波器^[9]。在本文强度解调系统中,采用 Sagnac 环长度为 4 m,Sagnac 产生的透射谱如图 5 所示。

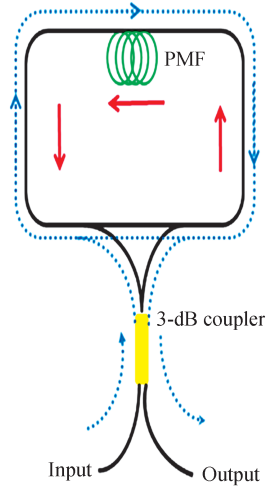


图4 Sagnac滤波器结构
Fig.4 The structure of Sagnac filter

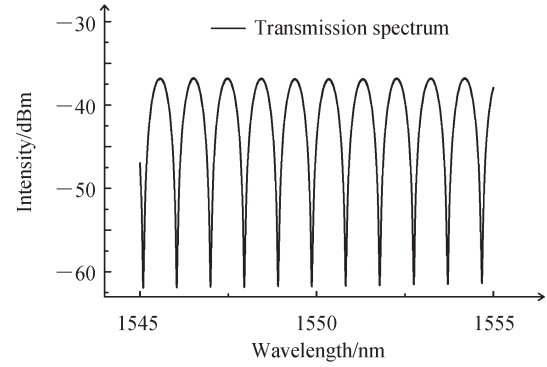


图5 长度为4 m的Sagnac滤波器透射谱
Fig.5 The transmission spectrum of Sagnac filter with length of 4 m

基于时分复用系统可以有效扩展FBG传感系统的复用数量,所选的FBG的反射率为10%,在同一个波长可以时分复用10个FBG传感器。对于C+L波段(80 nm)宽带光源来说,如果该系统用于温度传感,波分复用加时分复用技术可复用的数量可达800(80×10)个传感器,选用发射率更低的传感器其复用数量会更多。

2 解调信号模块

2.1 解调模块算法

现有的FBG解调方法大致可以分为干涉法、滤波法以及峰值拟合法三类优化方法。本文为提高系统的信号解调效率,除了硬件上采用Sagnac环边缘滤波的方法外,提出结合了小波变换和高斯拟合优化法的数据处理算法。小波分析主要对信号进行降噪和滤波处理,高斯拟合算法对滤波后信号进行拟合,在保证不丢失有效信号的情况下达到最优的拟合效果^[10-11]。

小波分析主要通过使用小波变换对小波低频系数进行置零、对高频系数进行阈值量化来实现含噪信号的基线校正和谱线光滑。因为基线漂移干扰主要集中在低频系数中,而有效信号分布在高频系数中。根据小波去噪的三个核心步骤(小波分解,阈值量化,小波重组)来确定系统最优化处理的小波基函数、分解层数以及阈值选择方法,对信号进行降噪处理^[12-13]。本文选择软阈值法降噪,因为软阈值消噪可使处理后的曲线更加光滑;而硬阈值是一种直接置零的方法,虽然可以保留信号的特征,但在平滑方面有所欠缺。

软阈值法规则为

$$\bar{w}_\lambda = \begin{cases} \text{sgn}(w_\lambda)(|w_\lambda| - \lambda) & |w_\lambda| \geq \lambda \\ 0 & |w_\lambda| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

硬阈值法规则为

$$\bar{w}_\lambda = \begin{cases} w_\lambda & |w_\lambda| \geq \lambda \\ 0 & |w_\lambda| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中, w_λ 是小波分解系数, \bar{w}_λ 是阈值化得到的小波分解系数。

FBG的反射谱波形可以表示为

$$I(\lambda) = A \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta \lambda_B} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, λ 为FBG波长, λ_B 为FBG中心波长, $\Delta \lambda_B$ 为反射谱的3 dB带宽, A 为反射谱光功率的幅值。

高斯函数的表达式为

$$F(x) = A \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\sqrt{2} \delta} \right)^2 \right] \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,FBG的反射谱波形基本符合高斯曲线分布规律,高斯拟合算法对采集到的波形进行阈值分割后,直接整体作为高斯函数处理,利用最小二乘法得到偏差平方和S,当S取最小值时候,可以得到最佳的拟合曲线^[14]。很明显,高斯拟合的原理是让它的偏差平方和S取最小,因此其中少数数据点的干扰对拟合曲线的参数影响并不大。实际上,各参数值的大小主要取决于整体观测值,有效减小解调系统实际使用中随机噪声的干扰,减小光谱寻峰误差,进而提高解调系统的波长检测精度^[15-16]。其中,偏差平方和S可以表示为

$$S_{\min} = \sum_{i=0}^m [F(\lambda) - I(\lambda)]^2 \quad (6)$$

2.2 解调信号的结果

光纤传感系统信号的去噪以及优化的效果可以由信噪比(SNR)的变化作为判定,信号处理后,信噪比越高,表示系统解调有效信号的能力越强。信噪比SNR的数学表达式为

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Noise}}} \quad (7)$$

式中, P_{Signal} 和 P_{Noise} 分别为信号的噪声的光功率。

1.2.1 小波基函数的选择

小波基函数包括 Daubechies 小波 (dbN)、Symlets 小波 (symN)、Coiflet 小波 (coifN) 等,由于 dbN 小波基函数具有紧支、正交、连续等优点,与降噪能力密切相关^[17-18]。所以选择不同的 dbN 函数对比去噪效果,并与具有阶梯特性的 Haar 函数滤波效果作比较。

Haar 小波函数的定义为

$$\varphi_H = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 0.5 \\ -1 & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

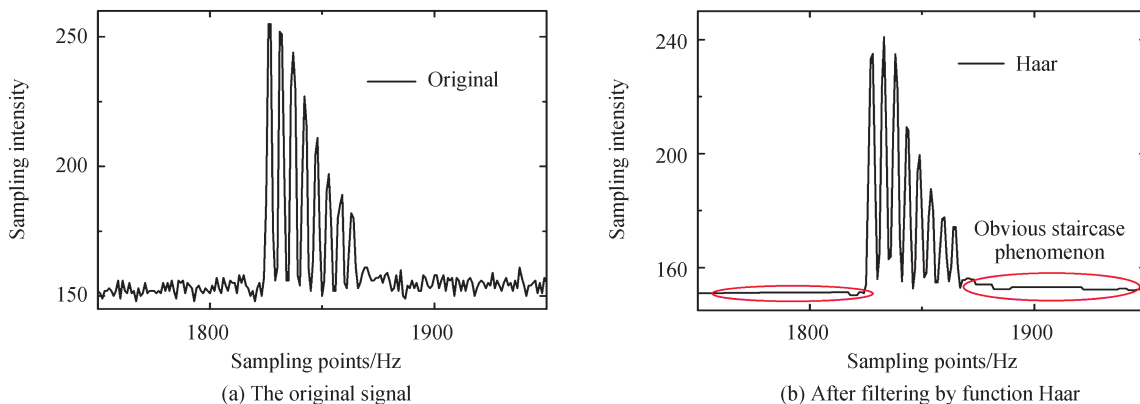
Daubechies (dbN) 小波基函数^[19]的定义为

$$|m_0(\omega)| = \left(\cos^2 \frac{\omega}{2} \right)^N P \left(\sin^2 \frac{\omega}{2} \right) \quad (9)$$

式中,令 $P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k$, C_k^{N-1+k} 表示二次项的系数, $m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-jk\omega}$ 。

当使用相同的阈值函数及相同的分解层数时,分别对比 Haar、db14、db02 三个小波基函数的滤波效果。原始含噪信号的信噪比为 8.06 dB,滤波后的信噪比分别为 10.2 dB、9.47 dB 和 10.7 dB,图 6(b)~(d) 分别展示三种不同小波基函数的滤波效果及滤波特征。

通过图 6 明显可以看出:用 Haar 小波出现了明显的阶梯现象;db02 相比同类函数的 db14 小波基的消噪效果较好,小波信号的连续性也较好,所以选择 db02 为最优小波基函数。



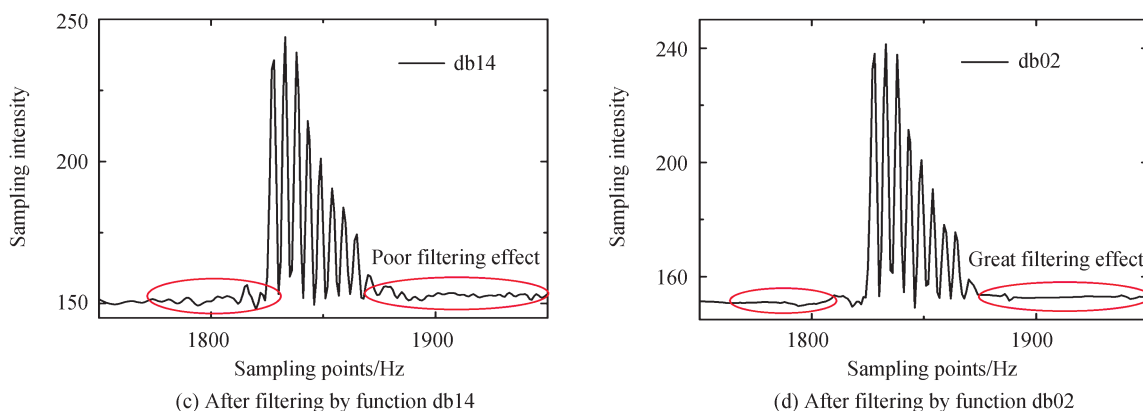


图6 三种小波基函数实时降噪效果对比

Fig.6 The real-time denoising results of three different wavelet functions

1.2.2 分解层数的选择

当使用同一种小波基函数 db02 且阈值函数都是 Minimaxi 函数时,小波分解层数不同,滤波效果也不同^[20],结果如图 7 所示。在本文强度解调系统中,分解层数分别为 1 层和 10 层时,信噪比分别为 10.4 dB 和 11.7 dB;明显地,分解层数越多,信号处理地越平滑,所以解调系统的小波分析将 10 层设为最佳的层数选择。

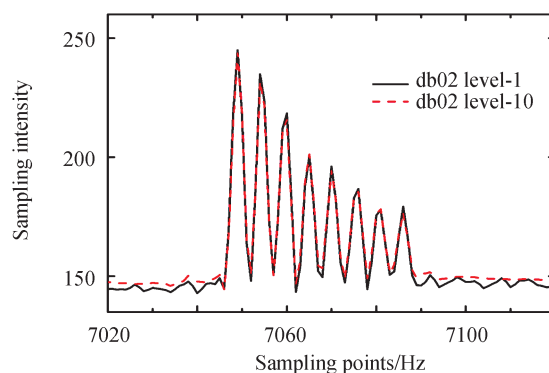


图7 不同分解层数的滤波效果对比

Fig.7 The filtering results of different wavelet levels

分解层数的选择对于界定背景信息(噪声信号、基线信号等)和光谱信息极其重要,小波分解层数需要慎重选择才能高效地对信号进行优化处理^[21]。分解层数过多会导致后续重构信号中含有较多背景信息,分解层数过少会使得被置零的小波低频含有部分有效的光谱信息。

1.2.3 阈值的选择

小波变换用于谱线平滑的关键步骤在于对每层小波系数选择合适的阈值处理,当信号中的噪声比例较小时,常采用 Minimaxi 法进行阈值估计,能够更加有效地保留信号中的有用部分^[22-23]。

当使用可达到最优滤波效果的 db02 小波基函数以及 10 层的分解层数时,研究不同的 Stein 无偏似然估计的 Sure 法、Universal 法、Hybrid 法及 Minimaxi 法的阈值选择对解调信号的优化处理结果,滤波后信号信噪比分别为 9.3 dB、10.8 dB、9.5 dB、11.7 dB。根据图 8 可以看出,相比之下,效果最优的是 Universal 和 Minimaxi 函数,且优化效果接近,但是 Minimaxi 函数解调信号的信噪比更高,所以最优阈值函数选择 Minimaxi 函数。

系统采用高速数据获取卡 DAQ(Data Acquisition)用于采集数据,需要实时处理大量数据信息,其中每一组 FBG 信号都经过该解调系统进行实时滤波处理。如图 9(a)所示,整体上噪声信号水平明显下降;如图 9(b)所示,随意抽取一组 FBG 信号的滤波效果,信噪比明显提高,降噪后曲线变得平滑很多。

综上,所提出的时分复用 FBG 强度解调系统中,小波分析最优参数选择小波基函数 db02,分解层数设

为 10 层,并采用 Minimaxi 阈值法,达到了良好的降噪滤波效果,系统信噪比由 8.06 dB 提高到 11.7 dB,提高了 36%。

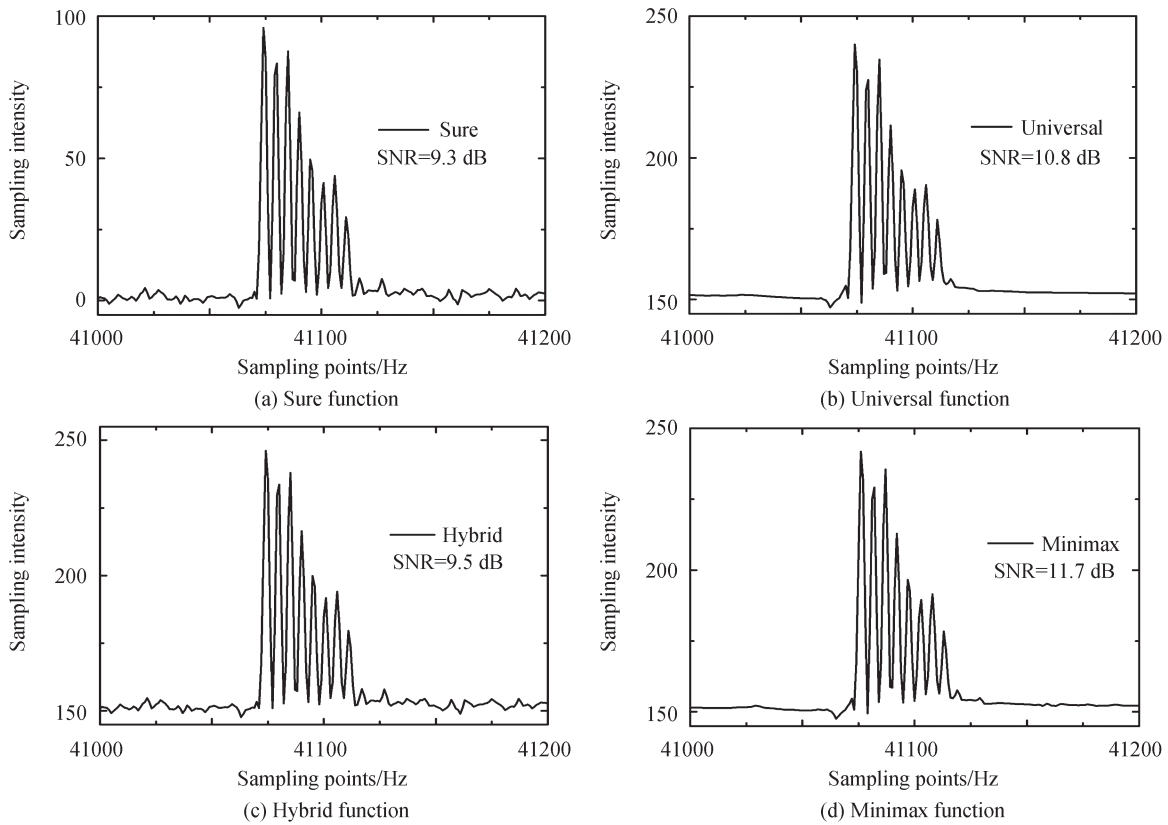


图 8 不同阈值选择方法的降噪效果对比

Fig.8 The filtering results of different threshold methods

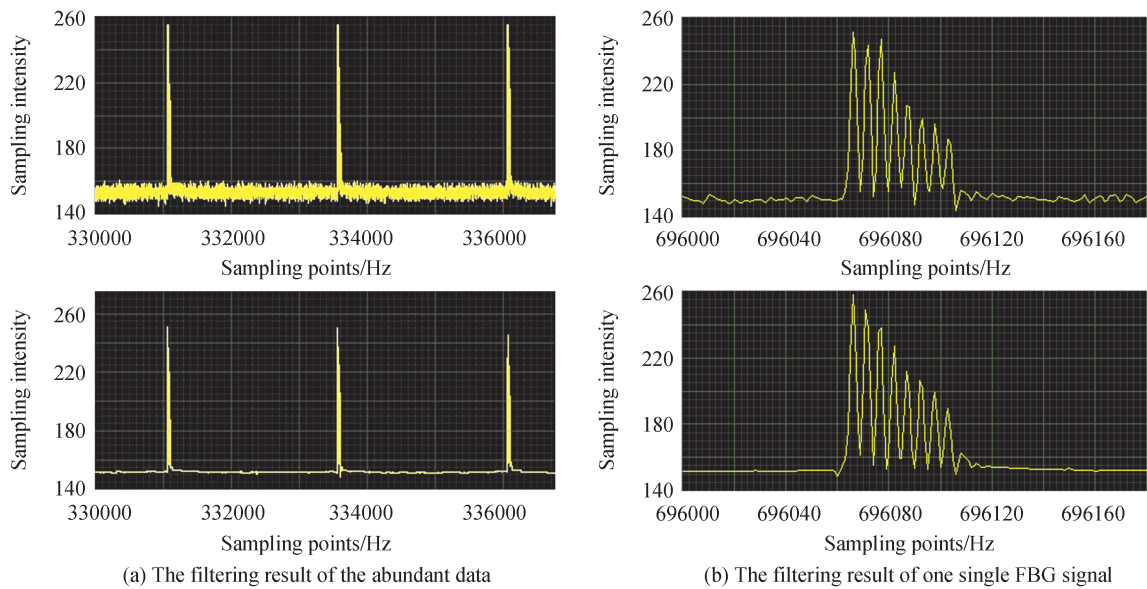


图 9 高速采集卡采集数据的实时解调效果

Fig.9 The real-time demodulation result of the DAQ

3 结论

本文结合时分复用技术和线性滤波技术提出了基于 Sagnac 环的 FBG 时分复用强度解调技术,可以有

效扩展FBG的复用数量,同时降低解调系统的成本。在信号处理模块中,小波分析选择db02小波基、10层分解层数以及Minimaxi阈值函数,并采用高斯拟合算法对信号进行处理。研究表明:所提的信号处理算法能够在有效去除干扰噪声的同时最大程度保护有效信号,系统信噪比提高了36%。提出的解调系统真实有效地提高了被测信号的抗干扰能力及检测准确度,可广泛应用到各行业传感系统或者参量检测系统中。

参考文献

- [1] YAN Lianshan, YI Anlin, PAN Wei, et al. A simple demodulation method for FBG temperature sensors using a narrow band wavelength tunable DFB laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(18):1391-1393.
- [2] 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.
- [3] MEI Jiawei, XIAO Xiaosheng, XU Mingrui, et al. Wavelength swept fiber laser based on dispersion tuning and its application on the demodulation of fiber Bragg grating[J].Acta Optica Sinica, 2012, 32(11):1114003.
梅佳伟,肖晓晟,许明睿,等.基于色散调谐宽带扫频光纤激光器及其在光纤光栅解调中的应用[J].光学学报,2012,32(11):1114003.
- [4] LI Zhengying, SUN Wenfeng, LI Zimo, et al. High-speed fiber grating demodulation method based on dispersion compensation fiber[J]. Journal of Physics, 2015, 64(23):234207.
李政颖,孙文丰,李子墨,等.基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法[J].物理学报,2015,64(23):234207.
- [5] HAO Wenliang, PENG Jun, YU Benli. High-resolution FBG demodulation system with two Sagnac loops based on high birefringence PCF[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 122(10):1443-1446,
郝文良,彭军,俞本立.基于高双折射PCF的双Sagnac环高分辨率FBG解调系统[J].光电子·激光,2011,22(10):1443-1446.
- [6] WANG Jufeng, ZHUANG Linling, LIU Shiwei, et al. Highly stable fiber Bragg grating sensor demodulation technology based on fiber Sagnac loop filter[J]. Chinese Journal of Laser, 2014, 41(9):0905004.
王巨峰,庄琳玲,刘士伟,等.基于光纤Sagnac环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调技术[J].中国激光,2014,41(9):0905004.
- [7] HUANG Fengqin, CHEN Tao, SI Jinhai, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing[J]. Optics Communications, 2019, 452:233 - 237.
- [8] CAO Yanpeng, ZHANG Hongmin, MIAO Yiping, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on microfiber Bragg Grating in Sagnac loop[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47:147 - 151.
- [9] GUO Yu, NI Yi, WU Haodong, et al. FBG wavelength demodulation based on bandwidth of radio frequency signals[J]. Optics Communications, 2019, 454: 124478.
- [10] NI Yi, QIN Xuanyi, YAO Huixuan, et al. A high efficient method for demodulation of FBG sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 38:70 - 74.
- [11] WANG Zhi, WEN Hongqiao, LUO Zhihui, et al. Time division multiplexing of 106 weak fiber Bragg gratings using a ring cavity configuration[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(2):132-136.
- [12] LI Ning, WANG Dong, WANG Yu, et al. Research on the effect of curve fitting algorithm on the demodulation performance of fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Sensor Technology, 2019, 32(5):711-714.
- [13] RUAN Juan, HU Lirui, LU Anshan, et al. Temperature sensor employed TCF-PMF fiber structure-based Sagnac interferometer[M]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(16):1364-1366.
- [14] BAI Yan, YAN Fengping, FENG Ting, et al. Temperature fiber sensor based on single longitudinal mode fiber laser in 2 μ m band with Sagnac interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 54:71 - 76.
- [15] ZHANG Weifang, LI Yingwu, JIN Bo, et al. A fiber Bragg grating interrogation system with self-adaption threshold peak detection algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(4):1140.
- [16] CHEN Zhijun, BAI Jian, WU Zutang, et al. Optimization and comparison of peak finding algorithms for fiber Bragg grating reflection spectrum[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.
- [17] ZHU Haohan, QIN Haikun, ZHANG Min, et al. Peak seeking algorithm in fiber Bragg grating sensor demodulation[J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(6):893-897.
朱浩瀚,秦海琨,张敏,等.光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J].中国激光,2008,35(6):893-897.
- [18] FENG Fei, WANG Fubei, XIE Fei, et al. Implementation of spectral overlap resolution based on wavelet transforms and Gaussian fitting[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(6):0630001
冯飞,王府北,谢非,等.小波变换与高斯拟合在光谱重叠峰解析中的应用[J].光子学报,2015,44(6):0630001.
- [19] CHEN Yong, CHENG Yanan, LIU Huanlin. Application of improved wavelet adaptive threshold de-noising algorithm in

- FBG demodulation[J]. *Optik*, 2017, 132:243-248.
- [20] ZHANG Yichi, KE Changjian, PAN Deng, et al. High resolution optical spectrum testing system based on LabVIEW[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7):0730001.
张亦驰,柯昌剑,潘登,等.基于 LabVIEW 的高分辨率光谱测试系统[J]. *光子学报*, 2014, 43(7):0730001.
- [21] HU Zhengwen, PANG Chengxin, CHNEG Fengyu, et al. Application of Gaussian LM algorithm in fiber Bragg grating reflection spectrum peak finding[J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2017, 54(1): 013001.
胡正文,庞成鑫,程冯宇. Gaussian-LM 算法在光纤布拉格光栅反射光谱寻峰中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 013001.
- [22] LIU Kun, LI Xin, JIANG Junfeng, et al. FBG noise reduction demodulation algorithm based on all-phase filtering technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0506002.
刘琨,李鑫,江俊峰,等.基于全相位滤波技术的 FBG 降噪解调算法[J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0506002.
- [23] CHEN Yong, YANG Xue, LIU Huanlin, et al. The exponential correction Gaussian fitting peak-finding algorithm to process FBG sensor signals[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5) :1516-1531.
陈勇,杨雪,刘焕淋,等.指数修正高斯拟合寻峰算法处理 FBG 传感信号[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5) :1516-1531.