

基于超弱光纤布拉格光栅的高信噪比分布式 振动传感系统

唐健冠, 刘宇哲, 李成立, 郭会勇, 杨明红*

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 提出了一种基于超弱光纤布拉格光栅的高信噪比(SNR)分布式振动传感系统。该系统用 3 dB 带宽超过 3.4 nm、反射率为 10^{-5} 的在线制备啁啾光栅阵列作为传感光纤,通过典型双脉冲调制方式和 3×3 耦合器进行相位解调。为了消除激光器、调制器和光放大器等光学元器件带来的各类噪声干扰,结合最小均方算法和对称探测结构进行自适应滤波。实验结果表明,相比小波去噪算法,本算法能有效降低系统噪声,最大可将 1 kHz 解调信号的高频本底噪声降低 40.1 dB,SNR 达到 96.5 dB;对于 2 km 长的传感光纤,系统在 1~5 kHz 的应变灵敏度可达 13.66 $\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

关键词 光纤光学; 分布式振动传感; 超弱光纤布拉格光栅; 信噪比; 最小均方算法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306014

Distributed Vibration Sensing System with High Signal-to-Noise Ratio Based on Ultra-Weak Fiber Bragg Grating

Tang Jianguan, Liu Yuzhe, Li Chengli, Guo Huiyong, Yang Minghong*

National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technologies, Wuhan University of Technology,
Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract A distributed vibration sensing system with a high signal-to-noise ratio (SNR) based on an ultra-weak fiber Bragg grating is proposed in this paper. The system uses an online inscribed chirped grating array with a 3 dB bandwidth greater than 3.4 nm and a reflectivity of 10^{-5} as the sensing fiber, and phase demodulation is realized through typical dual-pulse modulation and a 3×3 coupler. To eliminate interference noises from optical components including laser, modulator, and optical amplifiers, we employ the least mean square algorithm and a symmetric detection structure for adaptive filtering. The experimental results show that compared with the wavelet denoising method, the method can greatly decrease the system noise. It can reduce the high-frequency noise floor of the 1 kHz demodulated signal by 40.1 dB at the maximum, and the SNR is as high as 96.5 dB. For the 2 km long sensing fiber, the strain sensitivity of the system reaches 13.66 $\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1–5 kHz.

Key words fiber optics; distributed vibration sensing; ultra-weak fiber Bragg grating; signal-to-noise ratio; least mean square algorithm

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 070.1060

1 引言

相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)的分布式

振动传感技术具有监测距离长、灵敏度高、抗电磁干扰能力强和安全性高等优点,在电力、交通、石油化工等领域的周界安防、结构健康监控具有广泛的应

收稿日期: 2021-03-17; 修回日期: 2021-04-13; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(62025505)

通信作者: minghong.yang@whut.edu.cn

用。 Φ -OTDR 系统的信噪比 (SNR) 会影响传感系统的动态范围、空间分辨率和灵敏度等参数。一方面,普通光纤的背向瑞利散射信号极弱,从根本上限制了系统的 SNR;另一方面,分布式振动传感系统受光源线宽、调制器消光比、传感光纤、探测器性能以及信号处理器件的影响,系统噪声较大、灵敏度较低,限制了系统 SNR 的提升。因此,提升传感系统的 SNR 是 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感技术急需解决的一个关键技术问题。

普通光纤中的背向瑞利散射率仅为 $10^{-6} \sim 10^{-8}$,一般通过放大信号或使用复杂的脉冲调制方法进行改善,如脉冲编码方式可将信号的 SNR 提高 5 dB^[1],非线性克尔效应引起的自相位调制可提高脉冲信号的消光比^[2]。信号处理方法也能进一步改善系统的性能,如移动平均法和移动差分法可以减小反向瑞利散射信号的幅度波动^[3],小波去噪法可以从背景噪声中提取信号并提高振动测量的检测性能^[4]。Zhu 等^[5]使用二维边缘检测法将信号的 SNR 提高了 8.4 dB;Li 等^[6]基于功率谱分析去噪方法消除了激光器频率漂移对信号的影响;Wu 等^[7]使用相位噪声补偿方法,使系统对声波信号的灵敏度可达到 $3.84 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。但受瑞利散射的影响,这些方法对 SNR 的提升有限。Guo 等^[8]在国内实现了拉丝塔在线制备弱光栅阵列,其反射率在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 范围内可调,且一致性较好。弱光栅的反射系数比光纤背向瑞利散射系数高 2~3 个数量级,良好的 SNR 和传感性能使基于弱光栅阵列的传感技术受到了人们的广泛研究和关注^[9-17],但该系统仍然受激光器、放大器、探测器等光学器件噪声的影响。Liu 等^[10]基于弱光栅阵列传感光纤,利用双脉冲调制的外差解调,使信号的 SNR 比普通单模光纤提高了 18 dB。Muanenda 等^[18]基于相位载波和微分交叉相乘算法,对光栅间距为 5 m 的 1 km 传感光纤使用零差解调方法,得到的信号 SNR 超过 34 dB。

本文将超弱光纤布拉格光栅 (UWFBG) 与最小均方 (LMS) 算法相结合,实现了一种大容量、高 SNR 的 Φ -OTDR 系统,该系统使用的弱光栅啁啾光栅阵列间隔为 5 m。为了消除系统中光学器件,如激光器、探测器、掺铒光纤放大器 (EDFA) 带来的噪声干扰,通过双脉冲调制方式,利用双对称探测结构和两个 3×3 耦合器解调相位信号,同时采用 LMS 算法自适应滤波消除系统噪声。实验结果表明,相比经典的小波去噪算法,基于 LMS 的自适应

滤波算法具有运算简单、稳定性强、滤波速度快、效果好等优点,可适合在强背景噪声环境下实现目标振动信号的提取。

2 基本原理

UWFBG 使用拉丝塔技术通过 193 nm 的准分子激光器在线刻写,使用啁啾率为 2.5 nm/cm 的相位掩模板,光栅的 3 dB 带宽超过 3.4 nm ,可以确保温度或应力变化时,传感系统探测光的波长在光栅带宽内,光栅反射率可通过准分子激光器的工作电压控制在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间。通过主牵轮编码器的脉冲数控制准分子激光器的外触发脉冲,从而严格控制光栅之间的距离,相邻光栅之间的距离误差精度达到 mm 量级^[19]。传感系统通过现场可编程门阵列 (FPGA) 产生双脉冲电信号驱动调制器,产生双脉冲探测光 P_1 和 P_2 ,两束光的脉冲频率均为 ω ,时间间隔 $\Delta\tau = 2nL/c$,对应光往返光栅间距 L 的时间。其中, n 和 c 分别为光纤的有效折射率和真空中的光速,单个脉冲宽度小于相邻 UWFBG 的间隔,如图 1 所示。

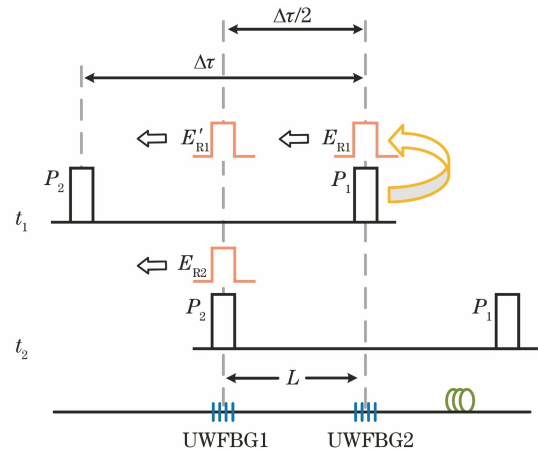


图 1 双脉冲调制相邻光栅干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-pulse interference between adjacent gratings

双脉冲探测光进入传感光纤, P_1 经过 UWFBG1 后,透射光在 t_1 时刻到达 UWFBG2 后发生反射,其光场为 E_{R1} ,经过 $\Delta\tau/2$ (t_2) 后的光场为 E'_{R1} 。同时,后脉冲光 P_2 在 t_2 时刻到达 UWFBG1 被反射,其光场为 E_{R2} 。由于前后脉冲的间隔与经过相邻光栅往返的时间相同,即 E_{R2} 会与 E'_{R1} 发生干涉。在 t_1 时刻, P_1 经 UWFBG2 反射后的光场 E_{R1} 可表示为

$$E_{R1} = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (1)$$

式中, t 为时间, A_1 和 φ_1 分别为反射光的振幅和初

始相位。弹光效应的外界扰动信号会引起两相邻光栅光纤的长度发生变化(ΔL),相邻 UWFBG 反射光之间的相位差变化量为 $\Delta\varphi$ 。在 t_2 时刻,由 UWFBG2 和 UWFBG1 产生的反射光光场分别为

$$E'_{R1} = A_1 \cos \left[\omega t + \varphi_1 + \frac{4\pi n}{\lambda} (L + \Delta L) \right], \quad (2)$$

$$E_{R2} = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (3)$$

反射光 E'_{R1} 和 E_{R2} 的干涉信号强度可表示为

$$I(t) \propto D + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_{12} + \Delta\varphi), \quad (4)$$

式中, \propto 为成正比符号, D 为干涉信号的直流分量, λ 为光波长, $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + 4\pi n L / \lambda$ 为相邻 UWFBG 之间没有扰动的初始相位差, $\Delta\varphi = 4\pi n \Delta L / \lambda$ 。由外界扰动引起的 $\Delta\varphi$ 与光纤长度变化量 ΔL 呈线性关系,可通过解调 $\Delta\varphi$ 还原相邻 UWFBG 之间发生的扰动。

3 实验原理与结构

图 2 为系统实验结构示意图,传感系统接收部分由信号干涉仪(SI)和参考干涉仪(RI)组成,每个干涉仪均使用 3×3 耦合器探测结构。窄线宽激光器(NLL)的线宽、中心波长、输出功率分别为

5 kHz,1550.12 nm 和 10 mW。通过 FPGA 产生的双脉冲电信号驱动声光调制器(AOM),从而将连续光调制为双脉冲探测光。双脉冲探测光中的脉冲宽度为 40 ns,脉冲间隔为 50 ns。双脉冲探测光经过 EDFA 放大后被 3 dB 耦合器分为两部分,分别进入 SI 和 RI。SI 由环行器(CIR1)、传感光纤、 3×3 耦合器及 3 个光电探测器(PD)组成。双脉冲探测光经 CIR1 发射到 2 km 长的 UWFBG 阵列中,光栅间隔为 5 m,将传感光纤 0.5,1,1.5 km 的位置分别缠绕在三个相同的压电陶瓷晶体(PZT)上,缠绕长度为 1 m,通过信号发生器驱动 PZT 调节振动信号的幅度和频率。由于双脉冲探测光的时间间隔等于两倍相邻光栅间距产生的时延,相邻光栅的反射脉冲会发生干涉,干涉信号通过 3×3 耦合器由 PD 转换成电信号后被高速数据采集卡(DAQ)采集并上传至上位机(PC)。RI 由环行器(CIR2)、两个与传感光纤中相同的 UWFBG、 3×3 耦合器及 3 个 PD 组成,双脉冲探测光经 CIR2 进入两个 UWFBG,其干涉信号通过 3×3 耦合器后,由 PD 转换成电信号,经过 DAQ 采集并由 PC 进行信号处理。

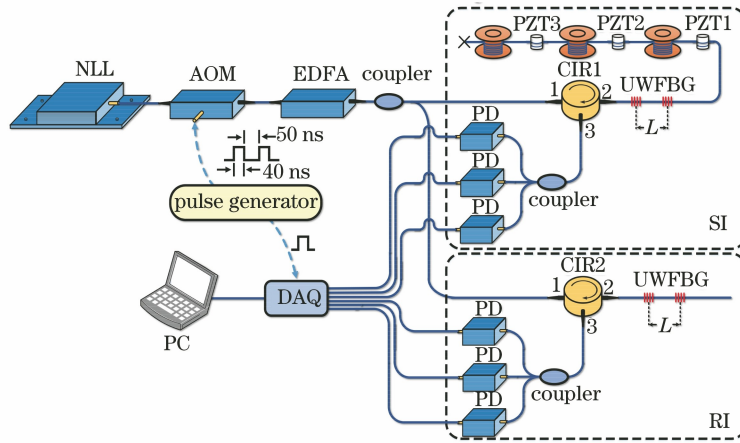


图 2 基于 UWFBG 阵列的分布式振动传感实验装置

Fig. 2 Experimental setup of distributed vibration sensing system based on UWFBG array

振动信号的相位变化量由 3×3 耦合器解调法解调^[20],由(4)式可知,相位变化量包含了初始相位差 φ_{12} 和扰动引起的相位差变化量 $\Delta\varphi$ 。若耦合器为理想无损耗的耦合器,输出的相位差均为 120° ,则 3×3 耦合器输出的三束光光强相等,输出信号经过光电转换后,可表示为

$$\begin{cases} I_1 = D + A \cos[\varphi(t)] \\ I_2 = D + A \cos[\varphi(t) - 2\pi/3], \\ I_3 = D + A \cos[\varphi(t) - 4\pi/3] \end{cases}, \quad (5)$$

将(5)式进行交叉相乘、差分 and 积分运算后,可得到

与相位变化量成正比的电压信号

$$V = \sqrt{3} \varphi(t) = \sqrt{3} (\varphi_{12} + \Delta\varphi). \quad (6)$$

传感系统的噪声来源除了传感光纤的多级反射串扰外,还包括激光器、调制器、探测器以及 EDFA 的自发辐射谱。假设 SI 和 RI 的干涉信号交流分量 $I_{AC,SI}(t)$ 和 $I_{AC,RI}(t)$ 分别包含相位噪声 $\delta\varphi_1(t)$ 和 $\delta\varphi_2(t)$,可表示为

$$\begin{cases} I_{AC,SI}(t) = A_{SI} \cos[\varphi_{12} + \Delta\varphi + \delta\varphi_1(t)] \\ I_{AC,RI}(t) = A_{RI} \cos[\varphi_{12} + \delta\varphi_2(t)] \end{cases}. \quad (7)$$

经过 3×3 耦合器解调法解调后分别得到相位信号 $\Delta\varphi + \delta\varphi_1(t)$ 和 $\delta\varphi_2(t)$, 由于 SI 和 RI 的结构相似, $\delta\varphi_1(t)$ 和 $\delta\varphi_2(t)$ 的噪声特性也类似。经过 LMS 算法自适应滤波后, 可基本消除系统噪声 $\delta\varphi_1(t)$, 从而降低传感系统光学器件噪声对系统的影响, 降低系统的底噪, 提高信号的 SNR 和系统的传感精度^[21]。

LMS 算法的滤波原理如图 3 所示, 其中, 输入信号 $x(n)$ 通过参数可调的数字滤波器生成输出信号 $y(n)$, 并将参考信号 $d(n)$ 与 $y(n)$ 相减得到误差信号 $e(n)$ 。通过自适应算法调整滤波器参数 $W(n)$, 使 $e(n)$ 的均方值最小, 从而实现系统噪声的最佳估计, 达到最优的噪声消除效果。LMS 算法的自适应滤波器可表示为

$$\begin{cases} y(n) = W^T(n)x(n) \\ e(n) = d(n) - y(n) \\ W(n+1) = W(n) - 2\mu e(n)x(n) \end{cases}, \quad (8)$$

式中, $W^T(n)$ 为 $W(n)$ 的转置, μ 为控制稳定性和收敛速度的步长因子。为了使 $e(n)$ 快速收敛, 将常规的固定步长替换为关于反正切函数的可变步长, 可变步长 $\mu'(n)$ 可表示为^[22]

$$\mu'(n) = \beta \arctan(\alpha |e(n)x(n)|), \quad (9)$$

式中, α, β 为可调系数。

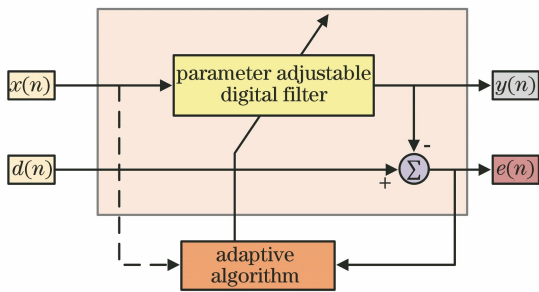
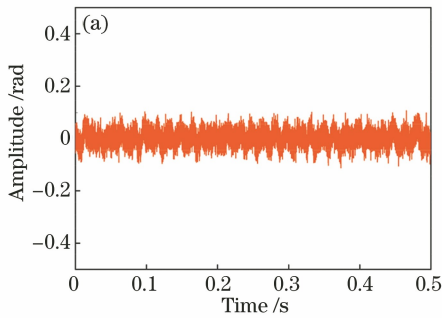


图 3 LMS 算法的自适应滤波原理

Fig. 3 Principle of adaptive filtering of LMS algorithm



若将噪声作为输入信号 $x(n)$, 将同时包含有用信号和噪声的待滤波信号作为参考信号 $d(n)$, 将误差信号 $e(n)$ 作为滤波输出, 从而得到有用信号。该滤波方法不需要预先知道输入信号和噪声的统计特性, 在信号处理过程可根据统计特性自动调整其自身参数, 以达到最佳的滤波效果。

4 实验结果与分析

首先, 使用常规的 3×3 耦合器解调法对信号进行解调, 即没有使用对称的 RI。实验中通过信号发生器驱动 PZT 作为振动源, 将 0.5 km 处长度为 1 m 的传感光纤缠绕在 PZT1 上, 对 PZT1 施加一个频率为 1 kHz、电压为 5 V 的正弦信号。通过 3×3 耦合器解调法解调得到的原始相位曲线如图 4(a) 所示, 相位信号的局部放大图如图 4(b) 所示。可以发现, 相位信号中存在着大量的干扰噪声, 表现为信号包络崎岖不平, 且波谷与波峰处有明显的毛刺。

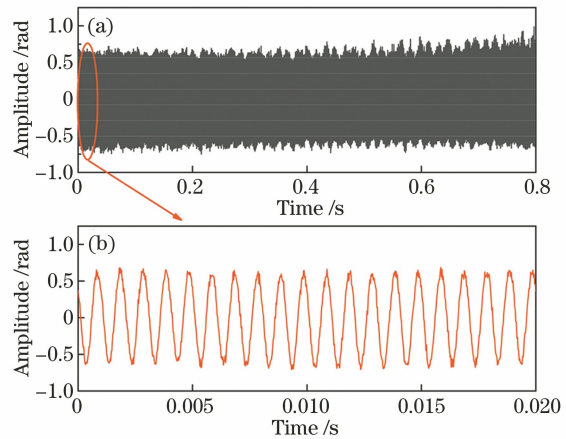


图 4 信号的解调结果。(a)原始相位曲线;(b)局部放大图

Fig. 4 Demodulation result of the signal. (a) Original phase curve; (b) partial enlarged view

为了检验 RI 对噪声的抑制效果, 将 RI 与 SI 的底噪声进行对比。图 5(a) 为 RI 在未受到扰动时解

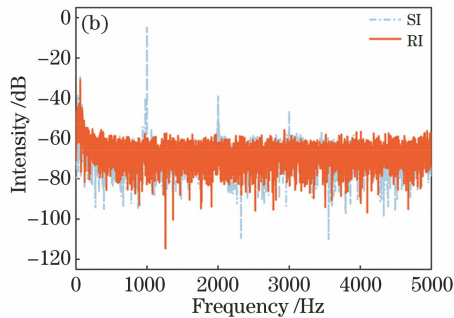


图 5 SI 和 RI 的噪声特性。(a) RI 的底噪;(b) SI 和 RI 的频域响应

Fig. 5 Noise characteristics of SI and RI. (a) Noise floor of the RI; (b) frequency domain responses of SI and RI

调的强度噪声,其最大幅值约为 0.1 dB。将图 4(a)中的原始相位曲线和图 5(a)中 RI 的底噪声分别进行快速傅里叶变换(FFT),结果如图 5(b)所示。可以发现,SI 和 RI 的噪声特征与强度相似,且原始相位曲线的频谱中包含高阶谐波分量,这主要是由 3×3 耦合器的不对称分光比造成^[23]。

为了对比本算法与常规小波去噪算法的滤波性能,对 0.5 km 处的 PZT1 分别施加 0.01, 0.5, 1 kHz 的 5 V 正弦信号,并用两种算法进行滤波处理。本算法用 RI 的输出信号作为 $x(n)$ 、用 SI 的输

出信号作为 $d(n)$;小波去噪算法采用 sym6 小波作为母小波,分解层数为 6 层,阈值为 Heursure 混合阈值下的软阈值。值得注意的是,LMS 算法中的 RI 仅用于采集噪声,对称结构的两个光路分别独立,不会影响信号,而小波去噪算法仅在常规的 3×3 耦合器解调法后进行,两种算法滤波后信号的时域特性如图 6~图 8 所示。可以发现,经小波去噪后信号的 SNR 有明显增强,但仍然存在一部分噪声,而 LMS 算法滤波后解调信号的噪声分量明显低于小波去噪算法。对于低频噪声,小波去噪算法

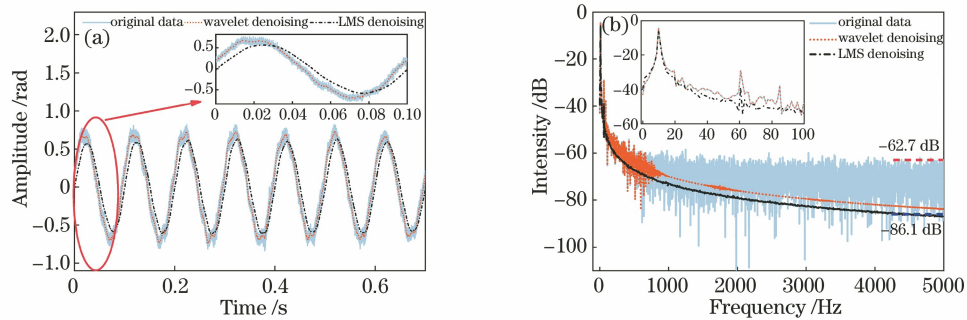


图 6 对 0.01 kHz 振动信号的降噪结果。(a)去噪后的相位信号;(b)振动信号的频域响应
Fig. 6 Noise reduction result of 0.01 kHz vibration signal. (a) Phase signal after denoising;
(b) frequency domain response of vibration signal

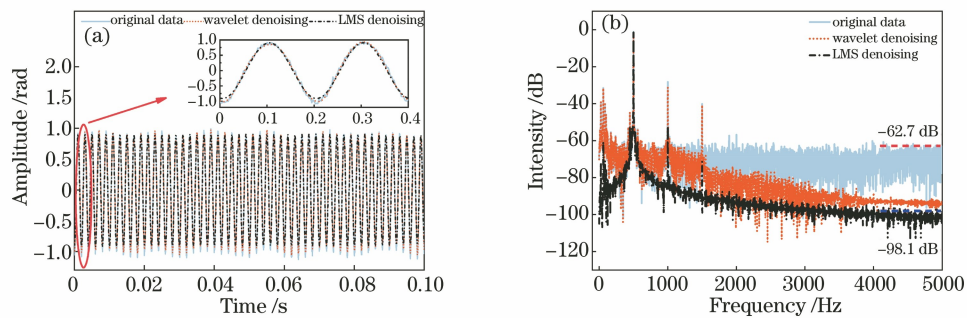


图 7 对 0.5 kHz 振动信号的降噪结果。(a)去噪后的相位信号;(b)振动信号的频域响应
Fig. 7 Noise reduction result of 0.5 kHz vibration signal (a) Phase signal after denoising;
(b) frequency domain response of vibration signal

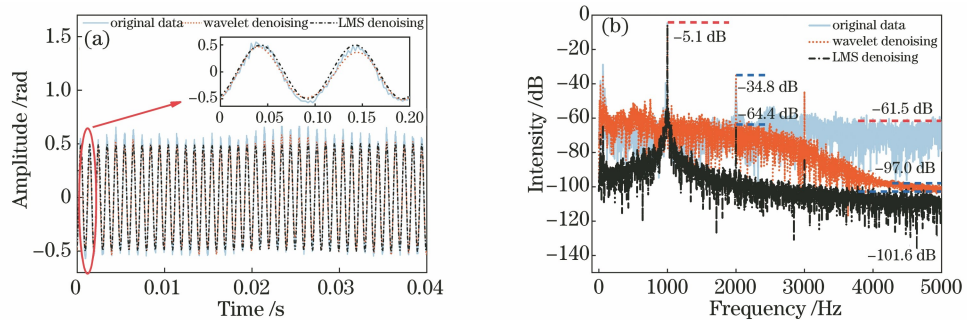
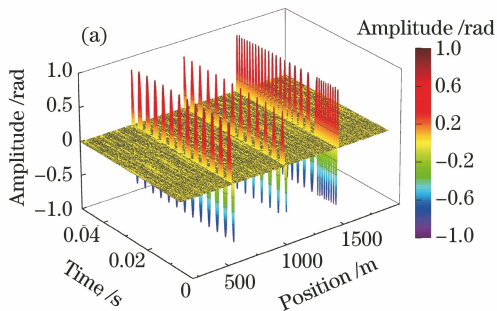


图 8 对 1 kHz 振动信号的降噪结果。(a)去噪后的相位信号;(b)振动信号的频域响应
Fig. 8 Noise reduction result of 1 kHz vibration signal. (a) Phase signal after denoising;
(b) frequency domain response of vibration signal

的效果不佳,与原始相位信号的噪声水平相同,而 LMS 算法滤波后的底噪有明显下降,0.5 kHz 处的底噪强度比小波去噪算法低 10.1 dB。此外,相比原始相位信号,LMS 算法对 0.01,0.5,1 kHz 的解调信号进行滤波后,高频本底噪声分别降低了 23.4 dB、35.4 dB 和 40.1 dB。计算得到信号的强度为 -5.1 dB,1 kHz 解调信号经过 LMS 滤波后 SNR 达到 96.5 dB,比小波滤波去噪后的 SNR 提高了 4.6 dB。此外,LMS 滤波对解调信号的谐波成分也有明显的抑制作用,0.5 kHz 解调信号的 2 倍谐波分量比小波去噪算法低 21.0 dB,1 kHz 解调信号的 2 倍谐波分量比小波去噪算法低 29.6 dB;且 LMS 算法滤波得到的波形曲线更平滑,具有很好的适应性和滤波性能。



为了验证系统分布式检测振动的能力,分别对 0.5,1,1.5 km 处的 PZT 施加不同类型的扰动事件,将正弦波、三角波和扫频波分别作用于 PZT1、PZT2 和 PZT3 上,得到沿传感光纤 0~2 km 位置的三维时域解调结果,如图 9 所示。可以发现,系统能分布式探测各种不同的扰动信号。对于 2 km 位置处的光纤,系统的响应频率可达 0.3~20 kHz。传感光纤末端噪声的功率谱密度(PSD)如图 10 所示,可以发现,解调信号的噪声水平在 1~5 kHz 时为 -62.7 dB,相位灵敏度和应变灵敏度之间的关系可表示为^[7,24]

$$\frac{\Delta\varphi}{L\Delta\epsilon} = \frac{4\pi}{\lambda}(n + C_\epsilon), \quad (10)$$

式中, $\Delta\epsilon$ 为应变变量, C_ϵ 为折射率的应变参数。由(10)式计算得到系统的应变灵敏度为 13.66 $\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

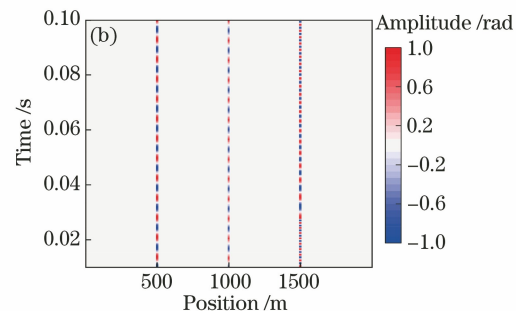


图 9 UWFBG 阵列上不同类型振动的解调波形。(a) 时域解调信号的三维显示;(b) 三维俯视图

Fig. 9 Demodulated waveforms of different types of vibration on UWFBG array. (a) Three-dimensional display of time-domain demodulation signal; (b) three-dimensional top view

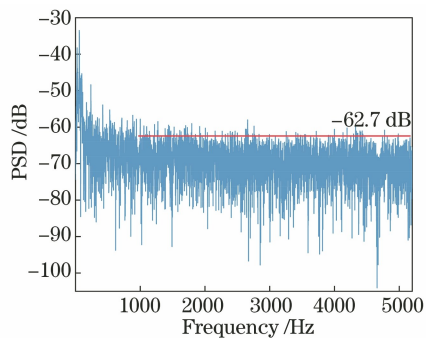


图 10 无干扰情况下 UWFBG 末端的噪声 PSD

Fig. 10 Noise PSD at the end of UWFBG without interference

5 结 论

将 UWFBG 阵列与 LMS 算法相结合,提出并实现了一种大容量、高 SNR 的 Φ -OTDR 系统。该系统基于在线制备的啁啾宽带 UWFBG 阵列,通过双脉冲调制设计了一种对称结构的探测方法,该方法能有效降低系统器件带来的噪声水平,实现一种

高 SNR 的分布式振动传感系统。实验结果表明,LMS 算法滤波后系统的噪声水平有大幅度下降,对于 1 kHz 解调信号,LMS 算法滤波后信号的高频本底噪声比原始相位信号最大降低了 40.1 dB,SNR 达到 96.5 dB,比小波去噪算法滤波后信号的 SNR 提高了 4.6 dB;对于 2 km 长的传感光纤,系统在 1~5 kHz 的应变灵敏度达到 13.66 $\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。该方法收敛速度快,不影响传感系统解调的实时性,能有效提高干涉型光纤传感系统的性能,对新型大容量、高精度和长距离分布光纤传感技术的研究具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Muanenda Y, Oton C J, Faralli S, et al. A cost-effective distributed acoustic sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection phase-OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-10.
- [2] Baker C, Vanus B, Wuilpart M, et al. Enhancement of optical pulse extinction-ratio using the nonlinear

- Kerr effect for phase-OTDR [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19424-19434.
- [3] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [4] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 542-544.
- [5] Zhu T, Xiao X H, He Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in Φ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [6] Li Q, Zhang C X, Li L J, et al. Signal-to-noise ratio enhancement of phase-sensitive optical time-domain reflectometry based on power spectrum analysis [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(2): 026106.
- [7] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Highly sensitive quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system by interrogating a weak reflector array [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3594-3597.
- [8] Guo H Y, Zheng Y, Tang J G, et al. Reflectivity measurement of weak fiber Bragg grating (FBG) [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 27(6): 1177-1179.
- [9] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based Φ -OTDR using a composite double probe pulse approach [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [10] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Interrogation of ultra-weak FBG array using double-pulse and heterodyne detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(8): 677-680.
- [11] de Miguel Soto V, Jason J, Kurtoglu D, et al. Spectral shadowing suppression technique in phase-OTDR sensing based on weak fiber Bragg grating array [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 526-529.
- [12] Ai F, Li H, He T, et al. Simultaneous distributed temperature and vibration measurement with UWFBG based coherent OTDR [C] // 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [13] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Quasi-distributed acoustic sensing based on identical low-reflective fiber Bragg gratings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(1): 015202.
- [14] Liu T, Wang F, Zhou L, et al. Phase sensitive distributed vibration sensing using double-pulse for ultra-weak FBG array [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [15] Li W, Zhang Y J. Enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer vibration sensing system based on weak grating array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0810001.
黎威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0810001.
- [16] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, et al. Distributed vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0210001.
刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0210001.
- [17] Tao X, Jiang S, Song K. Low-cost and long-perimeter system based on weak grating array and its alarm mechanism [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0406001.
陶鑫, 江山, 宋珂. 基于弱光栅阵列低成本大长周界系统及其报警机制 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0406001.
- [18] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in high-SNR DAS based on UWFBGs without phase unwrapping using scalable homodyne demodulation in direct detection [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10644-10658.
- [19] Tang J G, Shang F F, Li C L, et al. Fiber vibration sensing technologies based on draw-tower grating arrays [C] // 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [20] Todd M D, Seaver M, Bucholtz F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using 3×3 coupler [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(15): 784-786.
- [21] Liu F, Xie S R, Qiu X K, et al. Efficient common-mode noise suppression for fiber-optic interferometric sensor using heterodyne demodulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5453-5461.
- [22] Wang J F, Zhang B. Design of adaptive equalizer based on variable step LMS algorithm [C] // Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCST'10), August 14-15, 2010, Jiaozuo, China. Oulu: Academy Publisher, 2010: 256-258.
- [23] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [24] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7810-7815.