

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307164

小波域噪声估计的分块自适应降噪方法提升 Φ -OTDR 信噪比研究*

王仕昊¹ 高妍¹ 张红娟¹ 靳宝全²

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院 太原 030024; 2. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室 太原 030024)

摘要:相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)以激光器为探测光源进行光纤沿线振动信号的检测,但激光器的自发辐射现象会导致光场相位发生波动,直接影响相位解调信号的信噪比。针对此问题,提出了一种小波域噪声估计的分块自适应降噪方法。分析了激光器自发辐射导致的相位噪声特征,通过连续小波变换提取系统相位噪声在不同分解尺度下的噪声水平,结合无偏似然估计调整小波系数的分块长度和阈值,实现对不同输入信号的自适应降噪。实验证明,与未经本算法处理相比,在光纤4.5 km处,单频信号的信噪比从40.01 dB提升至54.60 dB,系统的应变分辨率从66.15 $\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ 优化至11.69 $\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$;线性扫频信号的信噪比从18.31 dB提升至26.40 dB。与其他同领域的降噪算法相比,单频信号均方根误差低至0.009 6,信噪比增益达到14.59 dB;线性扫频信号的均方根误差低至0.080 9,信噪比增益达到8.09 dB。研究表明,该方法在保留有效信号的同时,抑制了相位噪声,提高了相位还原的精度。

关键词: 相位敏感光时域反射计;降噪算法;信噪比;连续小波变换;噪声估计;自适应

中图分类号: TN911.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Improving signal-to-noise ratio in Φ -OTDR through block adaptive denoising method in wavelet domain noise estimation

Wang Shihao¹ Gao Yan¹ Zhang Hongjuan¹ Jin Baoquan²

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Phase-sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR) utilizes a laser as the detection light source for detecting vibration signals along the optical fiber. However, the spontaneous emission of the laser can lead to phase fluctuations in the optical field, directly impacting the signal-to-noise ratio (SNR) of the phase-demodulated signal. To tackle this issue, a block adaptive denoising method in wavelet domain noise estimation is proposed. The characteristics of phase noise caused by laser spontaneous emission has been analyzed. The phase noise levels at different decomposition scales are extracted using continuous wavelet transform (CWT). By combining with unbiased risk estimation to adjust the block length and threshold of the wavelet coefficients, adaptive denoising for different input signals is achieved. Experimental results demonstrate that compared to untreated signals, at 4.5 km of optical fiber, the SNR of single-frequency signals improves from 40.01 dB to 54.60 dB, and the system's strain resolution optimizes from 66.15 $\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ to 11.69 $\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$. The SNR of linear swept-frequency signals improves from 18.31 dB to 26.40 dB. In comparison with other denoising algorithms, for single-frequency signals, root mean square error (RMSE) reduces to 0.009 6 with an SNR gain of 14.59 dB; for linear swept-frequency signals, RMSE decreases to 0.080 9 with an SNR gain of 8.09 dB. The study demonstrates that this method suppresses phase noise while preserving effective signals, thereby improving the accuracy of phase recovery.

Keywords: Φ -OTDR; denoising method; SNR; CWT; noise estimation; adaptive

收稿日期: 2023-12-27 Received Date: 2023-12-27

* 基金项目: 国家自然科学基金(62375197)、山西省重点研发计划项目(202102130501021)、中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B004)、山西省基础研究计划(202103021222010)、山西省科技创新团队项目(201805D131003)资助

0 引言

分布式光纤传感技术(distributed optical fiber sensor, DOFS)是一种以光纤为传感媒介的分布式传感技术,具有高灵敏度、高精度、高实时性和分布式的特点^[1]。其中,相位敏感光时域反射计(phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR)通常用于监测外界的振动信号,实现光纤上任意位置振动事件的定位,并重构相位信息^[2]。相较于传统的振动传感器, Φ -OTDR 具有更广阔的应用前景,例如输电线路状态监测、电缆外破预警、土木结构健康和输油管道泄漏检测等领域^[3-4]。

当传感光纤外部发生振动时,纤芯直径、折射率和纤芯长度变化,探测光的相位也会随之变化,具体振动信息可通过瑞利后向散射信号获得^[5]。振动信号的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)会受到系统噪声的影响,主要由散粒噪声、热噪声、激光相位噪声和放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)噪声组成^[6]。这些噪声会导致 Φ -OTDR 系统应变灵敏度降低,不利于振动信号的检测和还原^[7]。降低相位噪声干扰对于提高相位解调信号的信噪比至关重要。

系统硬件结构直接影响相位恢复结果的信噪比。李信宇等^[8]提出了一种弱光纤光栅(weak fiber bragg grating, WFBG)阵列的系统结构来提高系统的 SNR。Shao 等^[9]提出了一种双激光器外差结构,根据两路拍频信号之间固定的频率差,有效抑制了激光器的相位噪声。李鲁川等^[10]利用内调制啁啾脉冲技术,增强了探测光的能量,提高了 Φ -OTDR 系统相位恢复结果的信噪比。

相较于硬件方法,信号处理技术无需增加额外的硬件成本。高浩天等^[11]提出了一种基于变分模态分解去噪方法,实现了振动信号信噪比的增强,但该方法中模态分量个数的设置具有主观性。彭怀敏等^[12]提出了一种基于小波包的降噪优化方法,该方法有效去除了振动信号以外的噪声,但该方法未考虑降噪阈值的自适应性。陈娟等^[13]提出了一种基于改进奇异值分解法的信号处理方法,该方法提高了还原信号的信噪比,但该方法的降噪效果依赖于截断阈值的设置,对于变频信号的适应能力较差。

尽管上述算法在不同程度上均提高了 Φ -OTDR 系统的信噪比,但它们未深入分析相位噪声的特性,对于变频信号的适应性较差。相位噪声是影响相位恢复精度的主要因素之一^[14],通过研究 Φ -OTDR 系统中相位噪声的特性,构建相应算法,可以更有效地抑制原始相位恢复中的噪声水平,提升系统的信噪比。

本文提出了一种小波域噪声估计的分块自适应降噪

方法,用以提高 Φ -OTDR 系统对于不同信号的相位还原精度。通过理论分析,验证了相位噪声在 Φ -OTDR 系统中的分布规律。根据相位噪声在 Φ -OTDR 系统中的特点,在相位恢复过程中分层估计小波系数的噪声水平,分割阈值块并进行信号估计。通过上述算法,有效抑制了 Φ -OTDR 系统中的相位噪声,提高了系统的信噪比。实验表明,该方法对于单频信号、线性扫频信号均具有较好的降噪能力。

1 原理分析

1.1 Φ -OTDR 系统噪声产生机理

Φ -OTDR 技术利用光纤中背向瑞利散射(rayleigh backscatter signal, RBS)的相干效应,并通过光时域反射技术进行传感^[15]。当外部振动作用在传感光纤上时,光纤的长度、折射率以及芯径随之发生改变,导致各个散射点的瑞利散射信号发生相位改变,彼此的相对相位也随之发生改变,致使叠加后信号的 RBS 强度发生改变^[16],通过分析扰动前后位置的相位差对振动信号进行定量测量^[17]。

设振动作用在光纤上的长度为 L ,光波经过后会产生相位延迟:

$$\varphi = \beta L = \frac{\omega n}{c} L = nKL \quad (1)$$

式中: β 为光在光纤中的传输常数, ω 是光波的角频率, n 是光纤折射率, c 是光在真空中的传播速度, K 是光波在真空中的波数。

对式(1)进行微分,可得:

$$\Delta\varphi = L \left(nK \frac{\Delta L}{L} + n\Delta K + K\Delta n \right) \quad (2)$$

根据式(2)可知,相位变化包含应力效应、弹光效应、泊松效应 3 部分。

振动沿轴向对光纤产生拉伸效果,引起光纤长度的变化,造成的相位变化为:

$$\Delta\varphi_1 = LnK \frac{\Delta L}{L} = nK\varepsilon_3 L \quad (3)$$

式中: ε_3 是光纤的纵向应变。

光弹效应会改变光纤的折射率,从而引起相位发生变化,可表示为:

$$\Delta\varphi_2 = -\frac{1}{2} LKn^3 [(p_{11} + p_{12})\varepsilon_1 + p_{12}\varepsilon_3] \quad (4)$$

式中: p_{11} 、 p_{12} 为光纤的弹光系数, ε_1 为光纤横向应变。

泊松效应相比弹光效应与应变效应,泊松效应产生的光相变十分微弱,在计算时通常将其忽略不计。因此,相位信号变化量可写成如下形式:

$$\Delta\varphi = nK\varepsilon_3 L - \frac{1}{2} LKn^3 [(p_{11} + p_{12})\varepsilon_1 + p_{12}\varepsilon_3] \quad (5)$$

因此,通过监测相位信号变化量,可实现振动信号的还原。然而,激光器的相位噪声会对实际的测量值产生干扰,影响 Φ -OTDR 系统还原振动信号的准确度。

激光器中的相位噪声是由光场的相位波动导致的,而这些波动源于光子自发辐射事件,导致光场的相位和强度发生波动^[18]。激光器中由自发辐射引起的光场强度 ΔE_{se} 的变化为:

$$\Delta E_{se} = \sum_{i=1}^{n_s} \Delta I_i \exp[i(\varphi_0 + \theta_i)] \quad (6)$$

式中: n_s 为激光器中自发辐射事件的总数, ΔI_i 为第 i 次自发辐射事件中的光强变化, φ_0 为初始相位角, θ_i 代表自发辐射引入的随机相位。

由激光器的自发辐射对输出连续光场相位的直接影响 θ_p 可以表示为:

$$\theta_p = \Delta I_i^{-1/2} \sin \theta_i \quad (7)$$

此外,自发辐射会改变输出光场的振幅,进而影响光子的分布密度,导致相位信号出现偏差,这种效应被称为幅相耦合。由幅相耦合引起的相位扰动可表示为:

$$\theta_{apc} = -\frac{\alpha}{2\Delta I} + \frac{1}{\Delta I^{1/2}} [\sin \theta_i - \alpha \cos \theta_i] \quad (8)$$

式中: α 为激光器的失谐参数,受激光器中折射率变化的影响。

激光器输出激光的相位变化 $\Delta \theta$ 可表示为:

$$\Delta \theta = \sum_{i=1}^n (\theta_p + \theta_{apc}) = \sum_{i=1}^n -\frac{1}{2\Delta I} [\alpha - 2\Delta I^{1/2} (\sin \theta_i - \alpha \cos \theta_i)] \quad (9)$$

由式(9)可知,自发辐射引起的相位变化是一个具有独立增量的随机过程。中心极限定理表明,当独立随机变量的样本数量足够大时,它们和的分布将近似于高斯分布。因此,自发辐射现象会导致激光器相位扰动,且该扰动近似于高斯分布。

1.2 小波域噪声估计的分块自适应降噪方法设计

在语音增强领域中,小波降噪方法在抑制高斯白噪声方面具有很好的性能^[19]。因此,通过连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 将时间序列转换到时频域上,有助于提高相位恢复的准确度。小波域噪声估计的分块自适应降噪方法结构如图1所示。

在 Φ -OTDR 系统中,相位结果可视为相位噪声和振动信号叠加的结果。其中,参考相位噪声可以通过解调未受干扰位置的相位来获得。并且激光器自发辐射导致的相位噪声近似于高斯分布。因此,第 i 层小波系数的噪声水平 σ_i 可表示为:

$$\sigma_i = \frac{\text{MAD}(|w_i|)}{0.6745} \quad (10)$$

式中: $\text{MAD}(\cdot)$ 代表中位数绝对偏差 (median absolute deviation, MAD), w_i 是第 i 层小波系数的集合, 0.6745

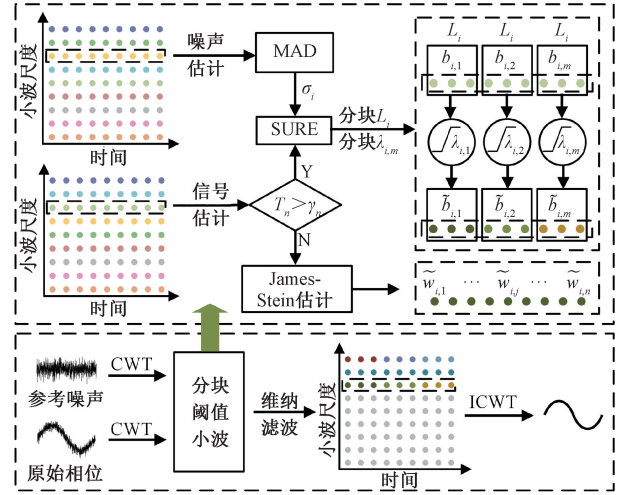


图1 小波域噪声估计的分块自适应降噪方法结构

Fig. 1 Block adaptive method in wavelet domain noise estimation

是标准正态分布中标准差对应的分位数。根据噪声水平 σ_i 和无偏似然估计 (stein's unbiased risk estimate, SURE), 确定阈值块的长度 L_i 和其对应的阈值 $\lambda_{i,m}$ 。在每个分解尺度上, 将小波系数划分为长度为 L_i 的 m 个不重叠的块。其中, 第 i 层第 m 个块 $b_{i,m}$ 可表示为:

$$b_{i,m} = \{w_{i,k} | (m-1)L_i + 1 \leq k \leq mL_i\} \quad (11)$$

将每个小波系数视为独立个体, 进行小波阈值处理, 以减小噪声分量。其中, 块 $b_{i,m}$ 对应的阈值为 $\lambda_{i,m}$, 噪声水平为 σ_i , 则经小波阈值处理后的估计量可表示为:

$$\begin{cases} \tilde{b}_{i,m} = b_{i,m} \left(1 - \frac{\lambda_{i,m} L_i \sigma_i^2}{S_{i,m}^2}\right)_+, & T_n > \gamma_n \\ \tilde{w}_{i,j} = w_{i,j} \left(1 - \frac{2 \log n}{S_i}\right)_+, & T_n \leq \gamma_n \end{cases} \quad (12)$$

$$S_{i,m}^2 = \sum_{i,j \in b_{i,m}} w_{i,j}^2 \quad (13)$$

$$T_n = \sum (w_{i,j}^2 - 1)/n \quad (14)$$

$$\gamma_n = \log_2^{3/2} n / n^{1/2} \quad (15)$$

式中: $w_{i,j}$ 为第 i 层第 j 个小波系数, n 为小波系数在时域上的长度。当 $T_n \leq \gamma_n$ 时, 估计量转换为块长度为 1 的 James-Stein 估计。

维纳滤波与小波降噪相结合, 可有效地去除高斯噪声和非高斯噪声, 保留信号的细节信息^[20]。依据小波系数的初始估计构建维纳滤波器, 其最终估计量可表示为:

$$\begin{cases} \hat{b}_{i,m} = b_{i,m} \left(\frac{|\tilde{b}_{i,m}|^2}{|\tilde{b}_{i,m}|^2 + L^s \sigma_i^2} \right), & T_n > \gamma \\ \hat{w}_{i,j} = w_{i,j} \left(\frac{|\tilde{w}_{i,j}|^2}{|\tilde{w}_{i,j}|^2 + L^s \sigma_i^2} \right), & T_n \leq \gamma_n \end{cases} \quad (16)$$

对小波系数的最终估计进行 CWT 逆变换,即可获取重构相位的时域信息。

2 Φ -OTDR 系统信噪比提升实验

2.1 实验系统搭建

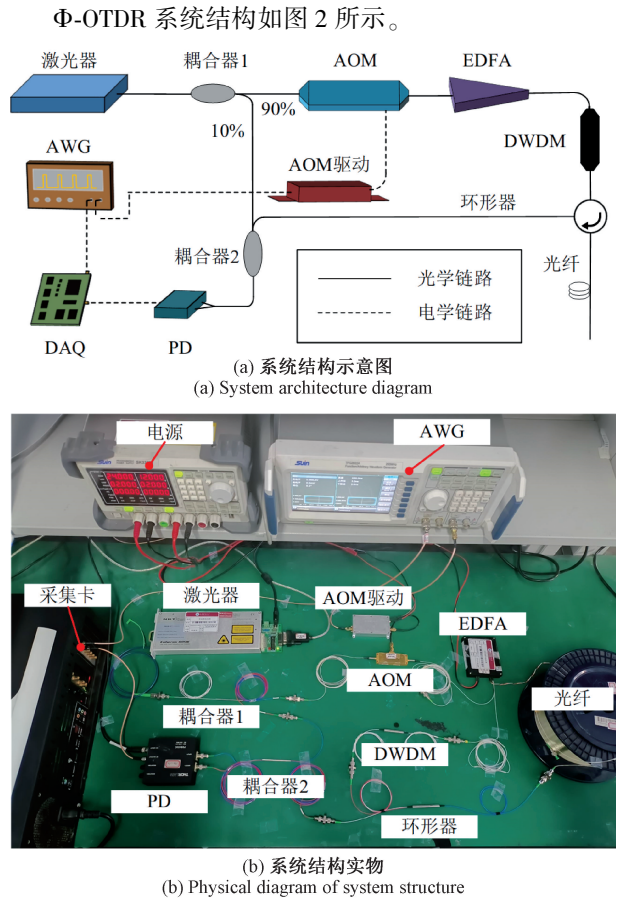


图 2 Φ -OTDR 系统结构

Fig. 2 Φ -OTDR system architecture diagram

首先,窄线宽激光器的输出光经 90 : 10 的耦合器 1 分成探测光和本振光。声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 将 90% 的探测光调制成脉冲光,并产生 200 MHz 的频移。利用掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 对脉冲光进行放大,保证脉冲光的强度。然后,放大后的光脉冲经光学滤波器 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 滤波,通过环形器入射到传感光纤中。后向瑞利光从传感光纤返回环形器,与 10% 的本振光在 50 : 50 的耦合器 2 中进行 1 : 1 拍频。通过电路系统中的光电探测器 (PD) 捕捉带有振动信息的光学信号,将其转化为电学信号,通过采集卡 (data acquisition, DAQ) 实现数据采集。任意波发生器 (arbitrary waveform generator, AWG) 产生同步触发 AOM

和 DAQ 的脉冲。
实验中,关键器件的参数如表 1 所示。

表 1 实验参数表

Table 1 Experimental parameter table

系统参数	参数值
激光器波长	1 550. 12 nm
AOM 中心频率	200 MHz
触发脉冲重频	20 kHz
触发脉冲宽度	100 ns
PD 带宽	350 MHz
采集卡采样率	1 GSa/s

2.2 实验验证与分析

实验中, Φ -OTDR 系统传感侧接入长度为 5 km 的传感光纤,在传感光纤 4.5 km 处通过压电陶瓷 (piezoelectric ceramic transducer, PZT) 施加扰动。传感光纤段的连接方式如图 3 所示。

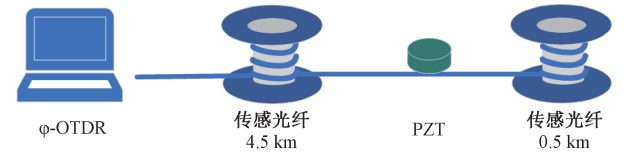


图 3 传感光纤结构

Fig. 3 Sensing fiber structure

1) 噪声分析

在无扰动情况下,采集 Φ -OTDR 系统的相位噪声,其时域波形如图 4 (a) 所示,统计分布如图 4 (b) 所示。

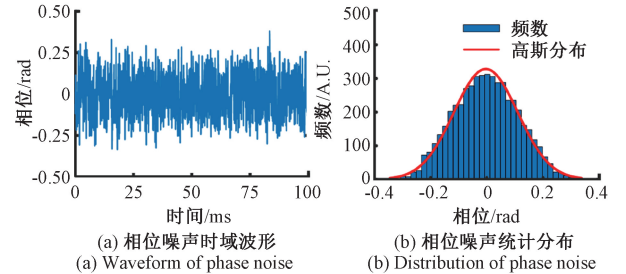


图 4 相位噪声特征

Fig. 4 Characteristics of phase noise

经计算,相位噪声的均值为 1.53×10^{-3} rad,方差为 0. 013 4 rad²,服从高斯分布,与理论分析一致。

2) 单频信号信噪比提升实验

首先验证该算法对正弦信号的降噪能力,通过 PZT 分别施加 10、100、500、1 000 Hz 频率的正弦扰动。采集 100 ms 信号,其时域波形如图 5 所示。图 5 (b) ~ (d) 左上角的时域曲线为矩形框选区域 77. 5 ~ 87. 5 ms 的时域

波形图。

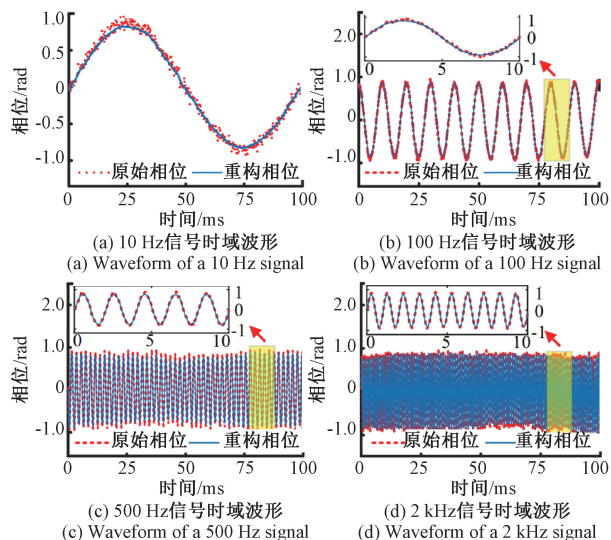


图5 正弦信号时域波形

Fig. 5 Time domain waveform of sine wave

比较原始相位和重构信号在时域上的结果,重构信号相较于原始信号更接近实际正弦信号,这表明该算法对于正弦信号具有较好的降噪效果。

为进一步验证该算法抑制噪声的性能,通过 PZT 施加 21 组不同频率正弦信号,对解调结果进行算法降噪和信噪比计算。

图 6(a) 为 10 Hz 原始相位的功率谱密度 (power spectral density, PSD),图 6(b) 为 10 Hz 重构相位的功率谱密度。本文使用功率谱密度计算单频信号的信噪比,10 Hz 原始相位的信噪比为 41.29 dB,10 Hz 重构相位的信噪比为 56.83 dB,信噪比提升了 15.54 dB。10 ~ 1 000 Hz 信号的信噪比如图 6(c) 所示,原始相位的平均值为 40.01 dB,恢复相位的信噪比平均值为 54.60 dB,平均提升了 14.59 dB。

如图 6(a)、(b) 所示,原始相位的最大噪声级为 -49.26 dB,即 $3.44 \times 10^{-3} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。重构信号的最大噪声级为 -64.32 dB,即 $6.08 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。PZT 膨胀区光纤长度为 5.085 m。经计算,原始相位的应变分辨率为 $66.15 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$;重构相位的应变灵敏度为 $11.69 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这表明该算法能够改善系统的应变分辨率,增强了 Φ -OTDR 系统的检测能力。

3) 线性扫频信号信噪比提升实验

为验证该算法对于变频信号的降噪能力,通过 PZT 生成了一组线性扫频信号,频率范围为 10~2 000 Hz,持续时间为 0.5 s,啁啾率为 3 980 Hz/s。采集 0.625 s 信号,其时域波形如图 7 所示。

线性扫频信号的 SNR 可用信号与噪声之比来表示:

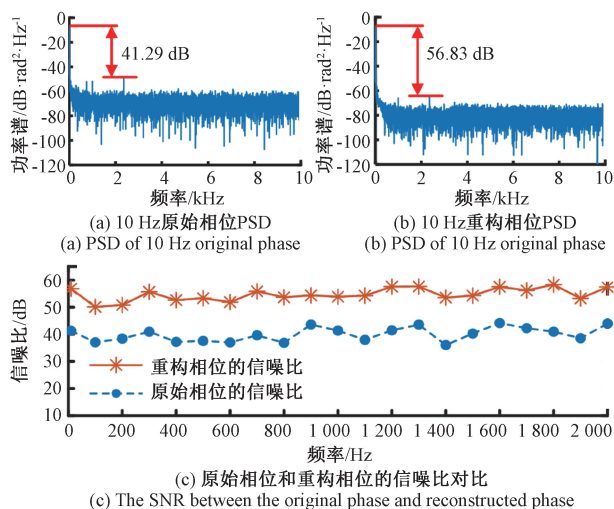


图6 正弦信号功率谱密度和信噪比结果

Fig. 6 PSD and SNR of sine wave

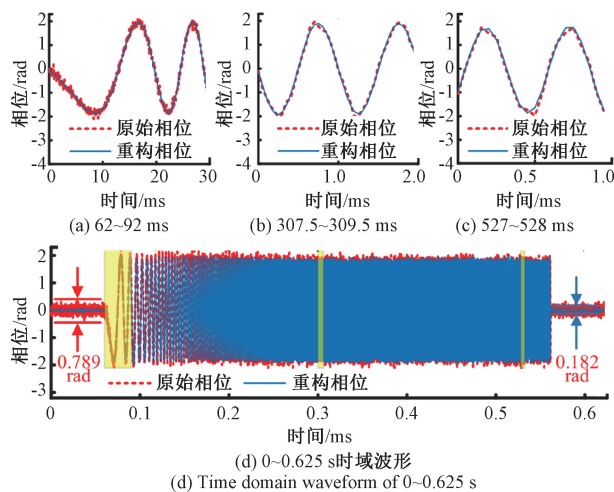


图7 线性扫频信号时域波形

Fig. 7 Waveform of linear frequency modulation signal

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (17)$$

式中: P_{signal} 为信号功率的平均值; P_{noise} 为噪声功率的平均值。

计算结果表明,原始相位的 SNR 为 18.31 dB,重构相位的 SNR 为 26.40 dB,SNR 提升了 8.09 dB。从图 7(d) 中可以看出,原始信号相位噪声的峰峰值为 0.789 rad,重构相位噪声的峰峰值为 0.182 rad,噪声降低了 0.607 rad;对于局部放大图 7(a)、(b)、(c) 中的原始相位和重构相位,重构信号相较于原始信号曲线更加平滑,更接近实际的线性扫频信号。这表明该算法对于变频信号具有较好的适应性。

语谱图能够反映信号在时间和频率维度上的能量分

布。线性扫频信号的语谱如图8所示,图8(a)为原始相位的语谱图,图8(b)为重构信号的语谱图。

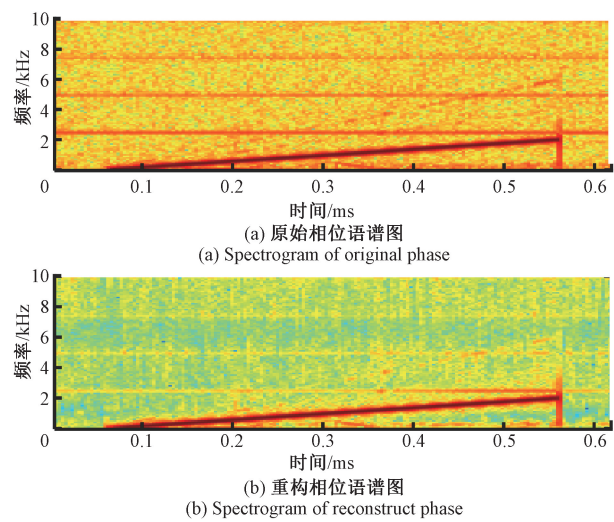


图8 线性扫频信号语谱图

Fig. 8 Spectrogram of linear frequency modulation signal

从图8中可以看出,原始相位和重构相位的能量均主要集中在10~2 000 Hz的变频直线上,但重构相位的噪声能量更低,与实际信号的分离程度更高。由此可见,该降噪算法对于线性扫频信号具有较好的噪声抑制效果。

4) 不同降噪算法对比实验

为进一步量化小波域噪声估计的分块自适应降噪方法在相位噪声抑制方面的优势,与文献[11]中的变分模态分解、文献[12]中的小波包阈值降噪、文献[13]中的改进奇异值分解法进行了实验对比。同时,引入均方根误差 (root mean square error, RMSE)、信噪比增益 (improved signal-to-noise ratio, ISNR) 两种评价降噪效果的指标。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2} \tag{18}$$

式中: N 代表信号长度, Y_i 代表降噪后的信号; y_i 代表原始信号。其中,RMSE越小,表明算法的降噪效果越好。

$$ISNR = SNR_s - SNR_n \tag{19}$$

式中: SNR_s 代表降噪后信号的信噪比; SNR_n 代表原始信号的信噪比。其中,ISNR越大,表明算法的降噪效果越好。

实验结果如表2所示。本文算法在正弦信号下的RMSE为0.009 6,ISNR为14.59 dB;线性扫频信号的RMSE为0.080 9,ISNR为8.09 dB。本文算法对于两类信号均具有最小的RMSE和最高的ISNR。结果表明,本文提出的算法对于正弦信号和线性扫频信号均具有较好

噪声抑制能力,在保证波形还原精度的同时,具备更高的信噪比增益。

表2 不同降噪算法对比

Table 2 Comparison of different denoising algorithms				
相位噪声抑制算法	正弦信号		线性扫频信号	
	RMSE	ISNR/dB	RMSE	ISNR/dB
变分模态分解法 ^[11]	0.035 9	6.83	0.166 2	1.39
小波包阈值降噪 ^[12]	0.020 5	10.54	0.153 1	3.63
改进奇异值分解法 ^[13]	0.026 2	9.18	0.126 2	5.48
本文算法	0.009 6	14.59	0.080 9	8.09

3 结 论

本文提出了一种小波域噪声估计的分块自适应降噪方法,提高了Φ-OTDR系统相位解调信号的信噪比。研究表明,Φ-OTDR系统中激光器自发辐射引起的相位噪声服从高斯分布。利用连续小波变换对信号进行多尺度分解,依据相位噪声在每个尺度下的噪声水平,结合SURE算法对信号的小波系数进行自适应分块滤波,实现相位信号的重构。实验结果证明,该算法在处理单频信号和线性扫频信号时均取得了较好的效果,单频信号的信噪比平均提高了14.59 dB,系统的应变分辨率从66.15 pε/√Hz改善至11.69 pε/√Hz;线性扫频信号的信噪比提高了8.09 dB。该方法有助于提高Φ-OTDR系统还原振动信号的准确度,增强Φ-OTDR系统的检测性能。

参考文献

[1] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 184-190.
ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Improved phase demodulation method for fiber optic vibration sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 184-190.

[2] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 100-114.
ZHANG X P, DING ZH W, HONG R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 100-114.

[3] 张驰,邹宁睦,宋金玉,等. Φ-OTDR系统的数字信号处理及应用[J]. 光电工程, 2023, 50(2): 4-21.

- ZHANG CH, ZOU N M, SONG J Y, et al. Digital signal processing and application of Φ -OTDR system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(2): 4-21.
- [4] 胡泽, 崔源, 葛亮, 等. 分布式光纤的沙漠埋地油气管道入侵信号识别[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 93-100.
- HU Z, CUI Y, GE L, et al. Distributed fiber optics for intrusion signal identification of desert buried oil and gas pipelines [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(17): 93-100.
- [5] 王宇, 王俊虹, 梁斌, 等. 基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 信号衰落抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 23-30.
- WANG Y, WANG J H, LIANG B, et al. Fading suppression method of Φ -OTDR signal based on optical fiber frequency-shifted delay loop[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 23-30.
- [6] LU X, KREBBER K. Characterizing detection noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Optics Express, 2021, 29(12): 18791-18806.
- [7] 张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 87-100.
- ZHANG X P, ZHANG Y X, WANG F, et al. The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 87-100.
- [8] 李信宇, 车前, 熊玉川, 等. 基于弱光栅阵列增强的 Φ -OTDR 传感系统性能分析[J]. 光电子·激光, 2019, 30(7): 673-677.
- LI X Y, CHE Q, XIONG Y CH, et al. The analysis of improved phase-OTDR sensing system employing weak fiber Bragg grating array[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2019, 30(7): 673-677.
- [9] SHAO Y, LIU H, PENG P, et al. Distributed vibration sensor with laser phase-noise immunity by phase-extraction Φ -OTDR [J]. Photonic Sensors, 2019, 9: 223-229.
- [10] 李鲁川, 卢斌, 王校, 等. 基于内调制啁啾脉冲的高信噪比低成本直接探测型 Φ -OTDR 系统[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 202-209.
- LI L CH, LU B, WANG X, et al. Internally modulated chirped pulse based direct detection type Φ -OTDR system with high signal-to-noise ratio and low cost[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 202-209.
- [11] 高浩天, 康杰虎, 张振, 等. 基于变分模态分解的相位敏感光时域反射计信噪比提升方法[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 49-58.
- GAO H T, KANG J H, ZHANG ZH, et al. Enhancement of signal-to-noise ratio based on variational mode decomposition for phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(21): 49-58.
- [12] 彭怀敏, 陈宏滨, 陈平, 等. 基于小波包降噪与特征投影的 Φ -OTDR 振动定位[J/OL]. 光通信技术, 1-10 [2024-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20240312.1327.002.html>.
- GUO H M, CHEN H B, CHEN P, et al. Φ -OTDR vibration positioning based on wavelet packet noise reduction and feature projection [J/OL]. Optical Communication Technology, 1-10 [2024-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20240312.1327.002.html>.
- [13] 陈娟, 张红娟, 王鹏飞, 等. 基于改进奇异值分解法降噪的频分复用 Φ -OTDR[J/OL]. 中国激光, 1-16 [2024-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20240412.1045.042.html>.
- CHEN J, ZHANG H J, WANG P F, et al. Noise suppression of frequency-division multiplexed Φ -OTDR based on singular value decomposition method[J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 1-16 [2024-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20240412.1045.042.html>.
- [14] 李永倩, 马立. Φ -OTDR 振动传感系统中的相位模糊问题[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2800-2804.
- LI Y Q, MA L. Phase ambiguity in Φ -OTDR vibration sensing system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2800-2804.
- [15] 王宇, 郭柴旺, 王俊虹, 等. Φ -OTDR 系统非对称光纤耦合器相位解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 149-156.
- WANG Y, GUO CH W, WANG J H, et al. Study on phase demodulation method of asymmetric optical fiber coupler in Φ -OTDR system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 149-156.
- [16] 程亚楠, 万生鹏, 吕纬龙, 等. 基于改进压缩感知技术的 Φ -OTDR 系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3): 82-87.
- CHENG Y N, WAN SH P, LYU W L, et al. Phase sensitive OTDR system based on improved compressed sensing technology[J]. Foreign Electronic Measurement

Technology, 2023, 42(3): 82-87.

[17] 司召鹏, 卜泽华, 毛邦宁, 等. 基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 109-122.

SI ZH P, PU Z H, MAO B N, et al. Review of research on phase sensitive optical time-domain reflectometer based on phase demodulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 109-122.

[18] QI B, CHI Y M, LO H, et al. High-speed quantum random number generation by measuring phase noise of a single-mode laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 312-314.

[19] 汪金菊, 李青, 徐小红, 等. 基于分数阶小波域 GSM 模型的地震信号随机噪声压制方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2989-2997.

WANG J J, LI Q, XU X H, et al. Random noise attenuation method of seismic signal based on the fractional order wavelet domain GSM model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 2989-2997.

[20] LI Y, SU Z, CHEN K, et al. Application of an EMG interference filtering method to dynamic ECGs based on an adaptive wavelet-Wiener filter and adaptive moving

average filter [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2022, 72: 103344.

作者简介



王仕昊, 2021 年于太原理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电气智能检测技术。
E-mail: wangshihao1010@foxmail.com

Wang Shihao received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes electrical intelligent detection technology.



高妍(通信作者), 1998 年于太原理工大学获得硕士学位, 现为太原理工大学副教授, 主要研究方向为电力物联网与智能感知。
E-mail: gaoyantylg@163.com

Gao Yan (Corresponding author) received her M. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1998. Now she is a professor in Taiyuan University of Technology. Her main research interests include power Internet of Things and intelligent perception.