

引用本文: 熊培元, 徐韶华, 黎恒, 等. 基于 Φ -OTDR 的 SV-VMD 振动定位及信号恢复方法[J]. 光通信技术, 2025, 49(2): 40–43.

基于 Φ -OTDR 的 SV-VMD 振动定位及信号恢复方法

熊培元¹, 徐韶华¹, 黎恒¹, 陈大华^{1*}, 陈聪², 杨松², 杜浩²

(1. 广西北投信创科技投资集团有限公司, 南宁 530200; 2. 桂林电子科技大学 光电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对传统相位差分法在振动定位中因信噪比不足导致的定位精度低和信号恢复困难问题, 提出一种基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的滑动方差变分模态分解(SV-VMD)振动定位及信号恢复方法。SV 算法通过滑动窗口计算相位差分方差, 选取振动点前 10 m 的相位作为修正参考相位, 有效抑制累积噪声; VMD 通过多尺度分解分离有效信号分量与趋势噪声, 消除正交解调引入的直流偏移。实验结果表明: 与传统相位差分法相比, SV 算法使系统信噪比提升 12 dB(从 14 dB 至 26 dB), 并在多振动源场景下清晰分辨了 400 m 和 650 m 处的干扰事件; 经参数优化(惩罚因子 $\alpha=100$, 模式数 $K=3$)的 VMD 算法成功恢复了三角波信号, 显著抑制了非振动相关噪声。

关键词: 相位敏感光学时域反射仪; 振动定位; 滑动方差; 相位解调; 变分模态分解

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0040-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



SV-VMD vibration localization and signal recovery method based on Φ -OTDR

XIONG Peiyuan¹, XU Shaohua¹, LI Heng¹, CHEN Dahua^{1*}, CHEN Cong², YANG Song², DU Hao²

(1. Guangxi Beitou IT Innovation Technology Investment Group Co., Ltd., Nanning 530200, China;

(2. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In response to the issues of low localization accuracy and signal recovery difficulties caused by insufficient signal-to-noise ratio in traditional phase difference methods for vibration localization, a sliding variance variational mode decomposition(SV-VMD) vibration localization and signal recovery method based on phase-sensitive optical time-domain reflectometer(Φ -OTDR) is proposed. The SV algorithm calculates the phase difference variance via a sliding window and selects the phase within the 10 m range preceding the vibration point as the corrected reference phase, effectively suppressing cumulative noise. The VMD algorithm separates the effective signal component from trend noise through multi-scale decomposition, thereby eliminating direct current offsets induced by orthogonal demodulation. The experimental results demonstrate that compared to conventional differential methods, the SV algorithm improves the system signal-to-noise ratio by 12 dB(from 14 dB to 26 dB) and clearly resolves interference events at 400 m and 650 m in multi-vibration-source scenarios. The VMD algorithm with optimized parameters (penalty factor $\alpha=100$, mode number $K=3$) successfully recovers the triangular wave signal and significantly suppresses non-vibration-related noise.

Key words: phase-sensitive optical time domain reflectometer, vibration localization, sliding variance, phase demodulation, variational mode decomposition

收稿日期: 2025-02-21。

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035047)资助; 广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2023133)资助。

作者简介: 熊培元(1996—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为平台后端开发、数据挖掘、光纤传感及算法调研, 负责完成了基于 Φ -OTDR 的突发事件监测系统的样机开发工作。

* 通信作者: 陈大华(1985—)男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能交通、智能物联网感知。



0 引言

分布式声学传感器(DAS)凭借其低损耗、抗电磁干扰及耐腐蚀等特性, 近年来在周界安防与管道监测领域得到广泛应用^[1-5]。其中, 相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)技术因具备宽传感带宽、高可靠性及对外部振动的高灵敏度, 成为结构健康监测和安防系统的核心方法之一。

目前, 相位解调过程中常采用空间方向相位差分方法抑制激光器噪声, 即通过光纤初始端相位与其它

位置相位的差值运算降低噪声影响^[6-12]。然而,该方法对累积随机噪声的处理能力有限。为提升相位波形重构精度,需优化参考相位选择策略,以消除振动位置前的相位噪声累积。基于此,本文提出基于 Φ -OTDR 与滑动方差变分模态分解(SV-VMD)算法的振动定位及信号恢复方法。

1 Φ -OTDR 系统

Φ -OTDR 系统结构如图 1 所示,主要组件包括:窄线宽激光器(NLL,中心波长为 1 550.15 nm,线宽为 3 kHz)、声光调制器(AOM)、环形器(CIR)、平衡探测器(BPD)及信号发生器(AFG)。AFG 为 AOM 提供脉宽为 100 ns、重复周期为 14 μ s、移频为 200 MHz 的脉冲调制信号。NLL 输出的连续激光经 90:10 分束器(OC₁)分为 2 路:90% 光功率经 AOM 调制成探测脉冲,通过 CIR 注入 1.2 km 单模传感光纤;10% 光功率作为参考光与后向瑞利散射光经 50:50 分束器(OC₂)耦合,由 BPD 进行光/电转换。压电陶瓷(PZT)与扬声器分别置于距离 CIR 400 m 与 650 m 处模拟外部扰动。在信号处理过程中,对数字化数据进行正交解调,正交解调后的电信号经放大、滤波、数据采集卡(DAQ)采集,最后输入到计算机进行后续处理。

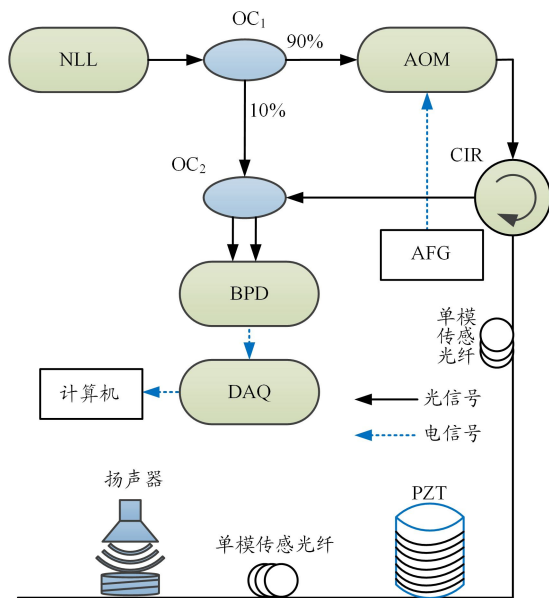


图 1 Φ -OTDR 系统框图

2 实验方法及参数设置

本文首先使用 SV 算法定位振动事件,通过时域窗口内的相位变化量降低背景噪声;其次,以振动点前 10 m 的相位作为修正参考相位重构时域波形;最

后,采用 VMD 算法消除信号中的直流分量与趋势项噪声,实现振动信号的精准恢复。

2.1 SV 算法

在分布式光纤振动传感系统中,传感光纤返回的后向瑞利散射光需经过正交解调处理以提取相位信息。传统方法通常采用相位差分法对振动事件进行定位,然而实际应用中,相位信号易受环境噪声干扰,导致定位结果的可靠性下降。为有效抑制噪声并提升振动定位的信噪比,本文提出基于 SV 算法的相位处理方案:首先,对差分相位数据进行 SV 算法处理;然后,在距离振动点前方约 10 m 的位置选取相位值作为修正参考相位;最后,利用修正后的参考相位差重建振动波形。获得的方差相位变化可表达为

$$\Delta\varphi(i,j)=\frac{1}{T}\sum_{i=m}^{m+T}\left[\Delta\psi(i,j)-\frac{\sum_{i=m}^{m+T}\Delta\psi(i,j)}{T}\right]^2 \quad (1)$$

其中, $\Delta\varphi(i,j)$ 是方差相位, T 是所选滑动窗口的大小, m 是当前所选的后向瑞利散射光的条数值, i 为后向瑞利散射光的条数索引, j 是光纤上采样点对应位置的索引, $\Delta\psi(i,j)$ 是传统差分相位。

2.2 VMD 算法

在振动信号解调过程中,正交解调方法虽能有效提取相位信息,但其精度易受环境噪声(如温度漂移、电磁干扰等)干扰,导致相位差分结果出现伪特征或定位误差。针对这一问题,本文采用 VMD 算法对重建后的时域波形进行降噪处理,以提升振动信号相位波形的信噪比。

2.3 实验参数设置

本实验采用长度为 1.2 km 的单模传感光纤,通过定点施加振动验证算法性能。具体设置如下:

1) 振动源配置。在距离 CIR 650 m 处布置高频扬声器,施加 3.5 kHz 正弦波振动,峰值电压为 2 V;在距离 CIR 400 m 处安装 PZT 压电传感器,施加 500 Hz 三角波振动,峰值电压为 5 V。

2) 数据采集与处理。使用光纤传感系统采集沿光纤分布的后向瑞利散射光信号,共获取 357 组空间离散的相位数据;对比传统相位差分定位算法与本文提出的 SV 算法的定位性能,评估指标包括定位误差、信噪比提升幅度及多事件分辨能力。

3 实验结果与分析

3.1 单一振动源定位性能

传统相位差分法与 SV 算法对单一扬声器振动的

熊培元, 徐韶华, 黎恒, 等: 基于 Φ -OTDR 的 SV-VMD 振动定位及信号恢复方法

定位结果如图 2 所示。从传统相位差分法定位及时空图可以看出, 在振动位置 (650 m 处) 呈现显著峰值, 但背景噪声干扰明显; 其对应的时空图像中, 位于 650 m 处黄蓝相间的直线与扬声器所播放的正弦信号周期一致, 且定位直线比较模糊。从 SV 算法定位及时空图可以看出, 在 650 m 处有一条清晰明亮的黄色直线。这表明 SV 算法有效抑制了振动区域的背景噪声, 定位信噪比显著提升。

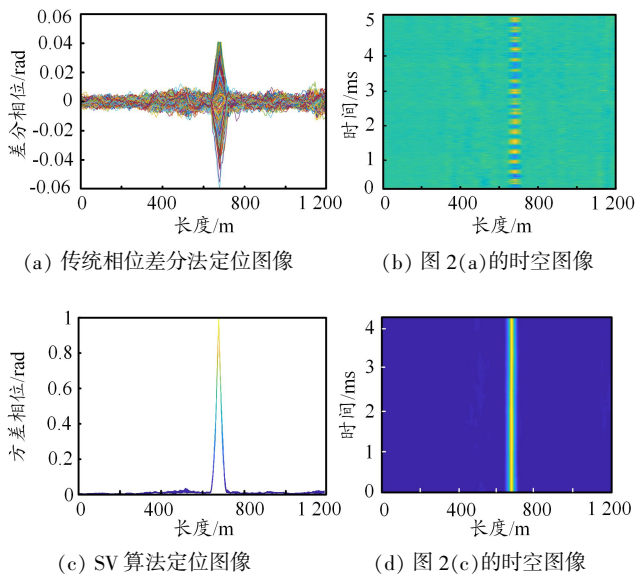


图 2 单一扬声器的振动定位图

3.2 多振动源定位验证

为验证 SV 算法对多点振动的定位能力, 本实验在 PZT 和扬声器上同时施加 500 Hz、5 V 正弦波信号, 得到定位结果及其时空分布图像如图 3 所示。可

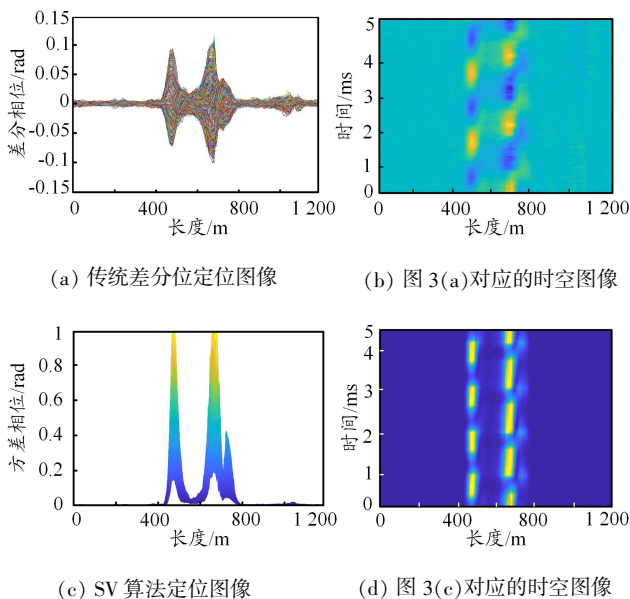


图 3 PZT 和扬声器的振动定位图

以看出, 与传统相位差分法相比, 无论是定位图像, 还是时空图像, 经 SV 算法处理后的图像更清晰, 这充分验证了 SV 算法在振动定位中的有效性。

3.3 信噪比性能评估

通过计算振动区域 (扬声器周围 100 m) 的平均功率谱密度, 对传统相位差分法与 SV 算法的信号特性进行对比分析, 结果如图 4 所示。可以看出, 传统相位差分法的信噪比为 14 dB, 而 SV 算法通过抑制本底噪声将信噪比提升至 26 dB, 较传统相位差分法提高了 12 dB, 验证了其在信号质量优化中的有效性。

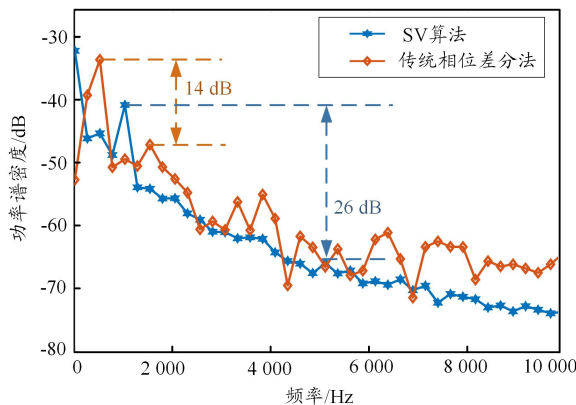


图 4 传统相位差分法和 SV 算法的功率谱密度比较图

3.4 相位修正与信号恢复

在相位修正过程中, 以首个振动点前 10 m 的相位值为参考, 重建时域波形, 得到修正前后的曲线如图 5 所示, 其中时域图中的黄色、蓝色、棕色线分别表示 340、390、440 m 处提取的时域相位信号。图 5(a) 与图 5(b) 是通过减光纤初始端相位 (修正前) 得到的最终

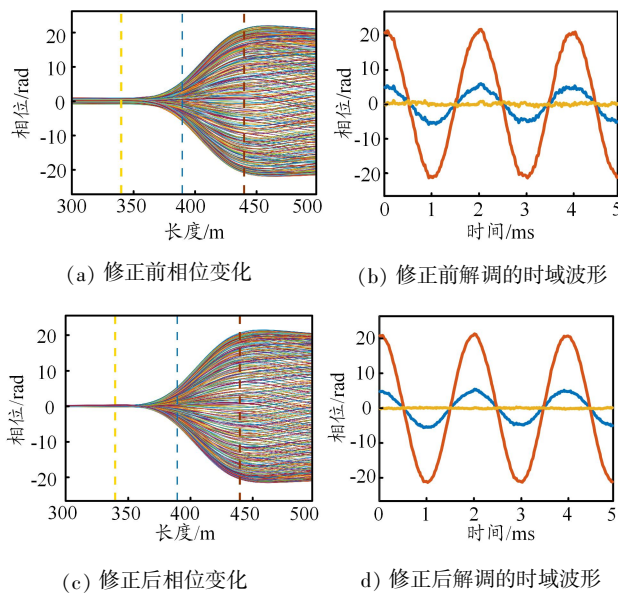
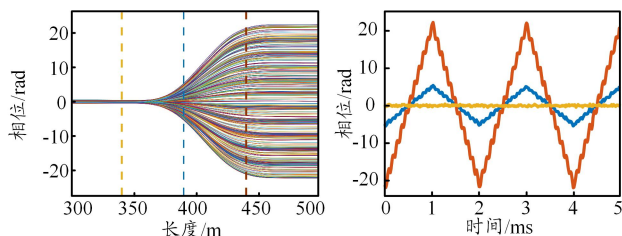


图 5 采用 SV 算法修正前后的相位变化与时域波形

解调相位变化;图 5(c)和图 5(d)是与修正后的参考相位相减得到的最终解调相位变化。可以看出,修正后相位噪声显著减少,解调波形更接近真实振动信号。

在 PZT 施加 500 Hz、5 V 三角波激励信号的相位恢复过程中,解调获得的最终相位变化如图 6(a)所示,其通过实测相位与修正参考相位差分运算得到。然而,由于正交解调过程中引入的直流偏移分量,导致重构波形出现明显的锯齿状畸变(图 6(b))。为此,本文采用 VMD 算法进行信号分解,参数设置为:惩罚因子 $\alpha=100$,拉格朗日乘子 $\lambda(t)=1.0$,模式数 $K=3$,中心频率均匀初始化,分解结果如图 7 所示。可以看出,当 $K=3$ 时,共分离出 3 个分量 SF_1 、 SF_2 、 SF_3 (其中 SF_1 是有效信号,而 SF_2 、 SF_3 则为原始信号中的噪声),通过 VMD 算法处理,直流偏移显著抑制,三角波轮廓得以清晰恢复。



(a) 357 条连续相位变化曲线 (b) 减修正后参考相位获得的时域波形
图 6 三角波信号的相位变化曲线和时域波形

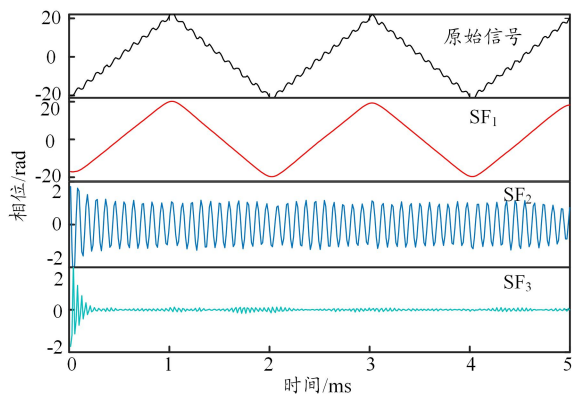


图 7 VMD 算法分解结果

4 结束语

本文提出一种基于 Φ -OTDR 的 SV-VMD 振动定位及信号恢复方法。实验结果表明,相较于传统相位差分法,SV 算法通过优化相位差分抑制策略,显著降低了环境噪声干扰,使 Φ -OTDR 系统的信噪比提升了 12 dB,

并在多振动源场景下实现了更清晰的时空定位分辨能力。此外,本文采用修正参考相位策略,通过选取振动区域前 10 m 的相位值作为基准,有效抑制了相位解调过程中累积的噪声误差,进一步提升了时域波形重构精度。针对正交解调引入的直流分量干扰问题,本文结合 VMD 算法对原始振动信号进行多尺度分解。通过优化 VMD 算法参数(惩罚因子 $\alpha=100$ 、模式数 $K=3$),成功将有效信号分量与趋势分量分离,有效抑制了三角波等复杂信号中的非振动相关直流偏移。因此,本文所提方法在单频信号恢复中展现出优越性能,为分布式光纤传感系统的高精度振动定位与信号解析提供了可靠技术路径。

参考文献:

- [1] 张旭萍. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] ELLMAUTHALER, LEBLANC M, BUSH J, WILLIS M E, et al. Real-time DAS VSP acquisition and processing on single- and multi-mode fibers[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(13): 14847–14852.
- [3] ABUFANA S A, DALVEREN Y, AGHNAIYA A, et al. Variational mode decomposition-based threat classification for fiber optic distributed acoustic sensing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 100152–100158.
- [4] BRISBOURNE M, KENDALL M, KUFNER S, et al. Downhole distributed acoustic seismic profiling at Skytrain Ice Rise, West Antarctica[J]. The Cryosphere, 2021, 15(7): 3443–3458.
- [5] HE Z, LIU Q. Optical fiber distributed acoustic sensors: a review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3671–3686.
- [6] WU H, LU H, YANG S, WANG Y, et al. Vertical offset-distance estimation and threat level prediction of vibrations with DAS[J]. IEEE Access, 2020, 8: 177245–177254.
- [7] QIN Z, GAO J, ZHU W, et al. Vibration detection based on multipath information fusion in dual-channel phi-OTDR system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 20318–20330.
- [8] ZAN W, WANG Y, LIU X, et al. Envelope extraction for vibration locating in coherent Φ -OTDR[J]. Sensors, 2022, 22(3): 1197–1205.
- [9] MEI X, PANG F, LIU H, et al. Fast coarse-fine locating method for Φ -OTDR[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2659–2667.
- [10] 贺梦婷, 庞拂飞, 梅烜玮, 等. 基于 IQ 解调的相位敏感 OTDR 的研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(9): 23–26.
- [11] ZHONG Z, WANG F, ZONG M, et al. Dynamic measurement based on the linear characteristic of phase change in phi-OTDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(14): 1191–1194.
- [12] FAN C, LI H, HE T, et al. Large dynamic range optical fiber distributed acoustic sensing (DAS) with differential-unwrapping-integral algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39: 7274–7280.