

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-06

# 小波降噪在分布式光纤干涉振动检测及定位系统中的应用

崔洪亮, 刘野, 于淼, 常天英\*, 陈建冬  
(吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130021)

**摘要:**讨论了 Sagnac 型分布式光纤干涉振动传感(DVS)系统的相位解调、定位原理以及对干涉信号的小波去噪原理。针对该系统易受环境噪声的干扰,从而产生误报或定位误差较大等现象,采用小波分析方法实现了对干涉信号的小波去噪和对振动信号的准确检测及精确定位。实验结果表明:针对振动信号的时频特性,选择合适的小波分析方法可有效提升检测信号的信噪比,提高振动检测的准确率,降低系统误报率,保证系统定位误差在  $\pm 50$  m 以内。与其他降噪方法相比,小波变换方法在系统信号处理中的应用,不仅提高了振动信号检测的准确率及空间分辨率,而且减小了系统定位误差,可适用于同类型的分布式振动检测系统。

**关键词:**光纤光学;分布式光纤振动传感系统;Sagnac 干涉仪;小波变换;小波去噪;定位检测  
**中图分类号:**TN253;TH825 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0000

## Application of wavelet denoising in distributed optical fiber interferometric vibration detection and location system

CUI Hong-liang, LIU Ye, YU Miao, CHANG Tian-ying\*, CHEN Jian-dong

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

\* Corresponding author, E-mail: tchang@jlu.edu.cn

**Abstract:** The phase modulation and positioning principle of a Distributed Optical Fiber Interferometric Vibration Sensing (DVS) system are discussed and the wavelet denoising principle for interferometric signals is introduced. As the DVS system is vulnerable to environmental noise interference and easy to produce false alarms or larger positioning errors, the paper uses the wavelet analysis method to implement the denoise of interferometric signals and the exact detection and accurate position of vibration signals. The experimental results show that proper wavelet analysis method selected for time-frequency characteristics of vibration signals improves the signal-to-noise ratio (SNR) of the detection signal and vibration detection accuracy obviously, and decreases the false alarm rate of the system. Meanwhile, it ensures the system positioning error within  $\pm 50$  m. As compared with other denoising methods, the application of wavelet transform in signal processing improves the accuracy and spatial resolution of the vibration detection and reduces the system positioning error. The method is applicable for the same types of distributed vibration sensing systems.

收稿日期:2015-05-07;修订日期:2015-05-27.

基金项目:中国海洋局资助项目(No. 201405026-01);十二五国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAK04B03);科技部国际部国际合作项目(No. 2013DFA11550)

**Key words:** fiber optics; distributed optical fiber interferometric vibration sensing system; Sagnac interferometer; wavelet transform; wavelet denoising; position determination

## 1 引言

分布式光纤干涉振动检测系统因具有传感灵敏度高、监测距离长、数据处理实时性好、动态检测范围大等优点而得到了广泛的关注与研究,并已应用于重要安防区域、长距离通信干线、能源管道的定位监测中。与其他类分布式干涉振动检测系统相比,基于  $3 \times 3$  耦合器的 Sagnac 型光纤干涉振动检测和定位系统不仅结构简单、灵敏度高、定位准确,且在实际应用中铺设方便、可扩展性强,因而具有很高的科研价值和实用性<sup>[1-5]</sup>。

Sagnac 型分布式光纤干涉振动检测和定位系统基于  $3 \times 3$  耦合器的相位还原算法,利用  $3 \times 3$  耦合器的固有相位差和互补对称性,通过对输出的干涉信号进行补偿还原,使用微分-积分的方法还原相位。这种方法不受扰动信号强度的影响,同时具有很高的还原精度。该系统采用传统的频谱“陷波点”的方法实现定位。由于属于干涉型传感系统,系统对外界环境十分敏感,检测到的扰动信号往往存在背景噪声。这些背景噪声主要包括热噪声、散粒噪声和低频噪声 3 种。当信号受噪声影响很大时,有用的信号可能完全淹没在噪声中,无法准确进行振动信号的检测,同时噪声的频谱可能与振动信号的频谱混叠,导致得到的频谱陷波点失准,定位误差较大,因此有必要对干涉信号进行去噪处理。

传统的信号分析是建立在傅里叶变换的基础上的。当信号与噪声的频带是分离的,傅里叶变换是有效的降噪方法,但傅里叶分析是一种全局的变换,无法表述信号的时域局域性质,而这种性质却是实际应用中非平稳信号最关键的性质。加窗傅里叶变换能够满足信号处理的某种特殊需要,但当窗口函数选定后,它不能随着信号成分的高频与低频信息而相应变化,对非平稳信号的分析能力很有限。

小波分析是一种窗口大小固定,但窗口形状可变、时间窗和频率窗都可改变的分析方法,属于时频分析的一种,能在时频域中根据有效信号与噪声在小波分解时所表现的不同特征来进行信号

去噪处理<sup>[6-9]</sup>。本文利用小波分析方法进行分布式光纤干涉振动检测及定位系统的降噪,明显地提高了信噪比,从而提高了振动检测系统的准确率和定位精度。

## 2 系统原理

基于  $3 \times 3$  耦合器的 Sagnac 型分布式干涉振动传感系统如图 1 所示。该系统由 SLED 宽谱光源、光隔离器、环形器、 $3 \times 3$  耦合器 C1, 长度为  $L_d$  的时延光纤、法拉第旋光镜(FRM)、光电探测器(PD)、高速数据采集卡和传感光纤等组成。其中,传感光纤用来拾取外界扰动信号,在  $D$  点处施加外界扰动信号。若扰动点为  $D$ , 扰动点距离传感光纤尾端面  $L_x$ 。从光源发出的光波在系统中形成多路光,发生干涉的两路光波分别为:

光路 1: 光源  $\rightarrow$  I  $\rightarrow$  I  $\rightarrow$  FRM  $\rightarrow$  II  $\rightarrow$  2  $\rightarrow$  III  $\rightarrow$  PD<sub>2</sub>;

光路 2: 光源  $\rightarrow$  I  $\rightarrow$  2  $\rightarrow$  II  $\rightarrow$  FRM  $\rightarrow$  1  $\rightarrow$  I  $\rightarrow$  PD<sub>1</sub>。

两路光波为同一光源发出,经过相同长度的传播光路,因经过扰动点  $D$  的时间不同而产生相位差,可在  $3 \times 3$  耦合器中形成稳定的干涉。本文通过  $3 \times 3$  耦合器解调方法来还原扰动信号,通过对光电探测器接收到的两路光强信号进行直流补偿、归一化、微分等数据处理<sup>[10]</sup>,推导得到:

$$\int_0^t [I_{11}I'_{21} - I_{21}I'_{11}] dt = -\sin(2\varphi)\varphi(t), \quad (1)$$

式中:  $I_{11}$ ,  $I_{21}$  为经过归一化处理的两路光强信号;系统固有相位差  $\varphi = 2\pi/3$ ;  $\varphi(t)$  为作用在传感光纤上因外界扰动而引起的相位变化。

干涉型分布式光纤传感定位技术基于相位调制原理,只有形成干涉的光才能携带扰动点的相位信息。由于干涉光来回两次经过扰动点,所获得的扰动信息实际上是叠加后形成的合扰动信息,其频率特性与扰动距离密切相关。当外界扰动信号作用于传感光纤时,系统无法感应扰动信号中某一系列的特征频率,表现为对解调后的  $\varphi(t)$  作功率谱估计,其频谱上这一系列特征扰动频率对应的幅值明显小于周边频率对应的幅值,

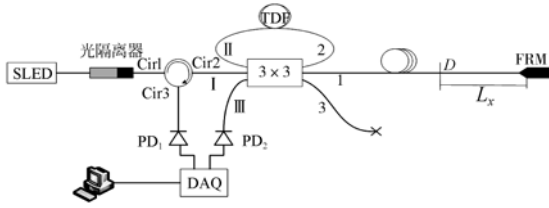


图 1 基于 3×3 耦合器的 Sagnac 型分布式干涉振动传感系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of Sagnac distributed interferometric vibration sensing system based on 3×3 coupler

存在陷波点,根据陷波点的位置可以对扰动信号进行定位<sup>[11]</sup>。令扰动点  $D$  离法拉第旋镜的距离为  $L_x$ ,特征频率为  $f_{null}(k)$ ,两者关系为:

$$L_x = \frac{(2k + 1) \cdot c}{4n_{\text{eff}}f_{\text{null}}(k)}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

其中: $c$  为光速,  $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率。根据式(2)可确定扰动点的位置。

### 3 小波变换原理

小波变换是一种窗口面积固定,但时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法,具有自适应性,即在低频部分则具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,而在高频部分则具有较高的时间分辨率和较低频率分辨率。这种特性使得小波变换适合分析非平稳信号<sup>[12-14]</sup>。

设函数  $\psi(t) \in L^2(R)$ ,其傅里叶变换为  $\hat{\psi}(\omega)$ ,当  $\hat{\psi}(\omega)$  满足条件:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (3)$$

此时  $\psi(t)$  为一个基本小波。将母函数  $\psi(t)$  经伸缩和平移后得:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (4)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$  为一个小波序列; $a$  为伸缩因子,  $a \neq 0$ ;  $b$  为平移因子,  $b \in R$ 。

对于任意函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换为:

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt, \quad (5)$$

其重构公式为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db. \quad (6)$$

离散小波变换阈值去噪法的基本思想是对信号进行小波分解后对得到的各层小波系数进行阈值处理,把绝对值较小的小波系数归零,保留绝对值较大的小波系数,通过对阈值处理后的小波系数做小波反变换,重构出经过去噪处理后的信号。这种方法不仅能降低噪声,甚至可以完全滤除噪声。具体实现步骤如下:

(1) 信号的小波分解:根据被处理信号的特征,选择一个合适的小波函数对信号进行  $N$  层分解。

(2) 小波分解系数的阈值处理:因噪声主要包含在高频系数中,选择合适的阈值函数对第  $1 \sim N$  层的高频系数进行阈值处理。

(3) 小波重构:对第  $N$  层的低频系数和经阈值处理后的各高频系数进行小波重构,得到降低噪声后的信号。

目前,常用的小波去噪方法包括小波分解与重构法、离散小波变换阈值去噪法以及小波变化模极大值法等。其中,模极大值法虽然能得到很高的信噪比,但存在去噪误差较大,算法稳定性较差等缺点;小波变换尺度间相关性去噪算法比较稳定,去噪效果也较好,但计算量大,程序运行效率偏低;而离散小波变换阈值去噪法可有效解决这些问题。针对振动信号的时频特征及应用需求,本文采用离散小波变换阈值去噪法。

### 4 小波去噪结果及分析

实验中,Sagnac 型分布式光纤干涉振动传感系统的光源为中心波长为 1 550 nm 的 SLED 光源,光功率为 0~20 mW 可调;耦合器采用工作波长为 1 550 nm、具有均一分光比的 3×3 耦合器;法拉第旋镜的工作波长为 1 550 nm,反射率可达到 95% 以上;光纤采用长为 20.6 km 的普通单模(9/125 μm)光纤;数据采集卡是凌华-9812,采集速率为 20 MS/s。上位机处理程序利用 Labview 与 Matlab 联合开发。

如图 2 所示,在距离传感光纤尾端 17.65 km 处进行敲击,得到了含有背景噪声的振动时域波形。图 3 是经去噪处理后的振动时域波形。通过

对比可发现,经过小波去噪后原始信号的信噪比得到了明显提升。

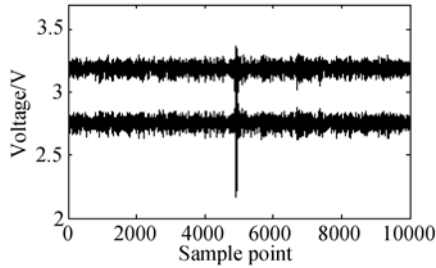


图2 含噪声的两路干涉信号

Fig. 2 Two interference signals containing noise

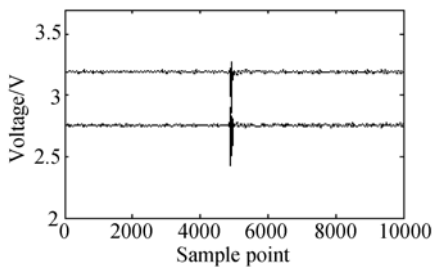


图3 小波去噪后的两路干涉信号

Fig. 3 Two interference signals after wavelet denoising

这里以两路干涉信号中的一路为例,具体阐述离散小波变换阈值去噪法。首先,对原始信号进行小波分解,图4为含噪的原始信号。图5是选择 sym5 小波,使用离散小波变换函数 `wavedec` 进行尺度为 5 的分解后得到的小波系数,其中  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  分别是各尺度下的高频系数,  $a_5$  为尺度 5 的低频系数。其次,对小波系数进行阈值处理。使用 `thselect` 函数,根据振动信号的时频特性获取合适的阈值,利用 `wden` 函数进行阈值去噪,图6为阈值去噪后的小波系数。最后进行小波重构,图7所示为选择 `waverec` 对阈值去噪后的小波系数进行重构后得到的振动时域波形。

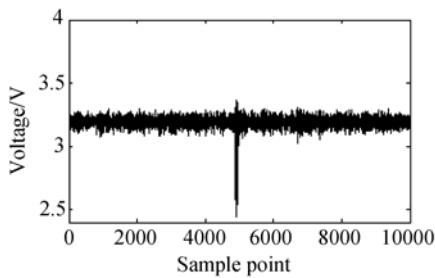


图4 原始干涉信号

Fig. 4 Original interference signal

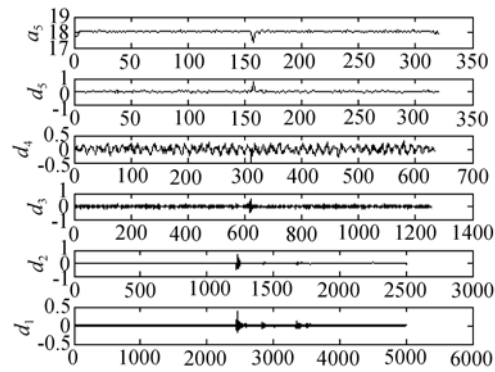


图5 小波分解后的小波系数

Fig. 5 Wavelet coefficients with wavelet decomposition

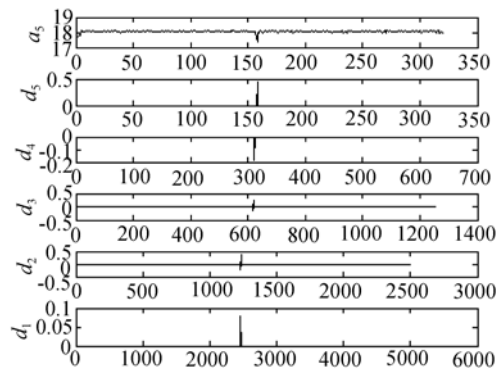


图6 阈值去噪后的小波系数

Fig. 6 Wavelet coefficients after threshold denoising

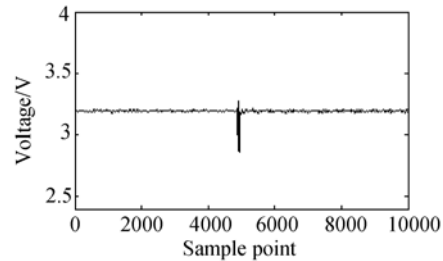


图7 小波重构后的信号

Fig. 7 Signal after wavelet reconstruction

对比图4与图7可知,采用离散小波阈值去噪方法有效提高了振动信号的信噪比,但去噪后振动信号的幅值变小。为消除幅值变化对扰动信号还原和定位的影响,在相位还原算法中对信号进行了归一化处理。

系统定位的准确与否在于  $f_{null}(k)$  获取的准确性,图8为系统对单个干扰的频率响应。图8(a)是对未经过小波去噪的信号作数据处理得到的频谱图,很难通过该信号准确找到其频谱陷波点(局部最小点),因此无法对振动信号进行有

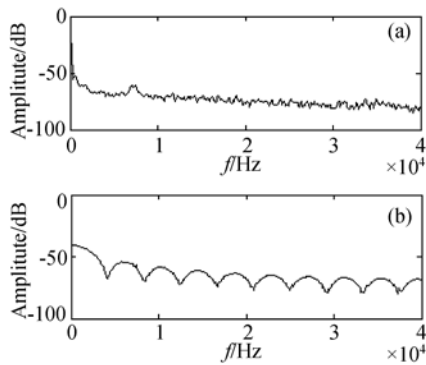


图8 获取的频谱信号

Fig.8 Signal spectra

效定位。图8(b)是对去噪后的信号进行数据处理得到的频谱图,根据该频谱信号可以清晰找到陷波点,从而准确实现振动定位。根据图8(b)所示的频谱图得到的各陷波点所对应的频率值,取光纤折射率为1.48,由式(2)计算出扰动点的位置为17.675 km;而根据OTDR测得的实际扰动位置为17.65 km,定位误差为25 m。选取传感光纤上其它几个不同位置进行振动监测实验,结果如表1所示。由表可知,系统的定位误差为 $\pm 50$  m。

表1 对不同位置的定位误差

Tab.1 Positioning errors at different locations

Location of vibration/km	Location of sensing/km	Relative error /%
3.467	3.509	1.211
8.216	8.198	0.219
11.622	11.649	0.232
14.32	14.286	0.237
17.65	17.675	0.142

由实验可知,小波分析方法可有效提高分布式光纤干涉振动检测系统的准确率和定位精度。

## 5 结 论

本文讨论了Sagnac型分布式光纤干涉振动传感系统的相位解调、定位原理以及干涉信号的小波去噪原理,并通过小波分析方法实现了干涉信号的小波去噪及振动信号的准确检测及精确定位。实验结果表明:针对振动信号的时频特性,选择合适的小波分析方法可有效提升检测信号的信噪比和振动检测的准确率,减小了系统的定位误差,保证系统定位误差在 $\pm 50$  m以内。与其他降噪方法相比,小波分析法在分布式干涉振动监测系统的信噪比提升方面具有较好的适用性,扩展了分布式振动系统在工程方面的应用。

## 参考文献:

- [1] CHEN W, WU J, TAN J. Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2128-2132.
- [2] WANG H, SUN Q ZH, LI X L. Improved location algorithm for multiple intrusions in distributed Sagnac fiber sensing system [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7587-7597.
- [3] HOFFMAN P R, KYZYK M G. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 494-498.
- [4] 曾周末,刘芳,封皓,等.基于 $3 \times 3$ 耦合器的双马赫曾德尔干涉仪数字化相位解调 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1410-1417.
- [5] 曾周末,张溪默,封皓,等.双Mach-Zehnder光纤干涉传感系统中的偏振衰落控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20: 468-476.
- [6] CHEN W ZH, WANG B W, ZHAN H. Wavelet denoising techniques with power spectral density to vibration signal [J]. *Kybernetes*, 2013, 42(4): 604-613.
- [7] SCHUKIN E L, ZAMARAIEV R U, SCHUKIN L I. The optimisation of wavelet transform for the impulse analysis in vibration signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(6): 1315-1333.

modulation based on  $3 \times 3$  coupler for dual Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1410-1417. (in Chinese)

ZENG ZH M, ZHANG X M, FENG H, et al.. Control of polarization fading for dual Mach-Zehnder fiber interferometric sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20: 468-476. (in Chinese)

- [8] 惠飞,史昕,赵祥模,等.基于改进阈值函数的小波去噪算法研究[J].现代电子技术,2011(12):61-64.  
HUI F, SHI X, ZHAO X M. Research of wavelet denoising algorithm based on improved threshold function [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011(12): 61-64. (in Chinese)
- [9] 李颖,陈兴林,宋申民.小波神经网络用于光纤陀螺漂移误差辨识[J].光学精密工程,2007,15(5):773-778.  
LI Y, CHEN X L, SONG SH M. Application of wavelet neural network for identification of drifts errors in fiber optical gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 773-778. (in Chinese)
- [10] 任广.干涉型分布式光纤周界及其定位技术研究[D].武汉:武汉邮电科学学院,2014:23-27.  
REN G. *Study on Interferometric Distributed Optical-fiber Perimeter and Perturbation Location Technology* [D]. Wu Han: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2014: 23-27. (in Chinese)
- [11] 许海燕.分布式光纤振动传感器及其定位技术研究[D].上海:复旦大学,2011:45-60.  
XU H Y. *Distributed Optical Fiber Vibration Sensor and Positioning Technology Research* [D]. Shanghai: Fudan University, 2011: 45-60. (in Chinese)
- [12] LI J. Research on the weak signal detection based on adaptive filtering of wavelet transform [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 2583-2587.
- [13] SAN EMETERIO J I, RODRIGUEZ-HERNANDEZ M A. Wavelet denoising of ultrasonic A-scans for detection of weak signals [C]. *19th International Conference on Systems, Signal and Image Processing*, 2012: 48-51.
- [14] 吴光文,王昌明,包建东.基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J].电子与信息学报,2014,36(6):1340-1347.  
WU G W, WANG CH M, BAO J D. A wavelet threshold denoising algorithm based on adaptive threshold function [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1340-1347. (in Chinese)

## 作者简介:



崔洪亮(1956-),男,美籍华人,博士,教授,1984年,1987年于美国史蒂文斯理工学院分别获得硕士、博士学位,国家“千人计划”特聘教授,主要从事光纤传感器、太赫兹科学技术及应用、纳米光学和纳米电子学等方面的研究。  
E-mail:hcui@jlu.edu.cn

## 通讯简介:



常天英(1981-),女,山东人,博士,美国纽约大学博士后,山东大学与美国史蒂文斯理工大学联合培养博士,主要研究方向为光纤传感技术与应用、光纤分布式传感(拉曼、布里渊技术、BOTDR)。E-mail:tchang@jlu.edu.cn



刘野(1990-),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事光纤传感及应用方面的研究。E-mail:liuye\_1225@163.com