

# 基于小波信息熵的分布式振动传感系统的 扰动评价方法

冯 欣 曾周末 封 皓\* 安 阳

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 针对基于相敏型光时域反射计(OTDR)的振动传感系统所使用的平均算法、差分算法不能有效实现对扰动的识别定位问题,提出了一种结合小波分析理论和信息熵理论的处理算法,以实现系统对外界扰动的准确评价。在深入分析系统所得信号特征及小波信息熵处理方法特点的基础上,探讨了窗长、步长对评价算法的影响,并使用加权算法对该评价算法进一步优化。实验表明,本方法可以区别噪声信号和扰动信号,实现对外界扰动事件的快速准确识别并精确定位扰动发生的位置,对系统的实际应用有重要意义。

**关键词** 光纤光学;分布式光纤传感;扰动评价;小波信息熵

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1106005

## A Method for Evaluating the Disturbance in Distributed Vibration Sensor Based on Wavelet Information Entropy

Feng Xin Zeng Zhoumo Feng Hao An Yang

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A processing algorithm combined with wavelet analysis and information entropy theory is proposed to settle the problem of average and difference methods' not being effective enough to evaluate the vibration events in phase-sensitive optical time-domain reflectometer (OTDR) vibration sensing system. Based on a well-developed discussion on the features of acquired signal and wavelet information entropy method, the effect the length of window and step on processing result is revealed. Meanwhile, an adoption of weighting algorithm is proposed for further optimization. Experiments prove that this method performs well in distinguishing noise from disturbance, and can recognize exterior interference in a rapid, accurate way as well as pinpoint the interference location, which can enhance the performance of phase-sensitive OTDR system.

**Key words** fiber optics; distributed fiber sensor; disturbance evaluating; wavelet entropy

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.3180; 030.1670; 290.5870

## 1 引 言

近几十年中,分布式光纤传感技术得益于其相较传统传感技术无可比拟的技术优势,受到了深入的研究并广泛应用于工业现场。分布式、灵敏度高、动态范围大、免疫电磁干扰等特性使其成为了许多

应用场合的最佳选择<sup>[1]</sup>,例如桥梁、建筑、能源输送管道、工业作业机械部件等重要结构的安全健康监测。利用分布式光纤传感技术,可以有效替代需大规模布放才可实现区域监测的点传感器,能够灵敏捕获光纤沿线由结构毁损所产生的扰动信号,并准确定位

收稿日期: 2013-05-31; 收到修改稿日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61240038)

作者简介: 冯 欣(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: tjufx@tju.edu.cn

导师简介: 曾周末(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事检测技术及仪器、系统集成与智能化、微电子机械系统等方面的研究。E-mail: zhzmeng@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: fenghao@tju.edu.cn

扰动发生的位置,具有结构健康安全预警的功能,从而达到防患于未然、保障国民生产安全的目的。

光时域反射计(OTDR)技术由 Barnoski 等<sup>[2]</sup>于 1977 年提出,该技术通过将一系列光脉冲注入探测光纤中,探测背向瑞利散射光强变化、提取探测光纤各处反射率来获知光纤各点的特征信息。在过去的几十年里,OTDR 技术已广泛应用于通信领域中光纤长度、衰减、裂纹、连接损耗及断点的检测中。然而由于其灵敏度有限,通常只能响应光纤的静态变化。1993 年, Taylor 等<sup>[3]</sup>提出了相位敏感型 OTDR 技术。相位敏感型 OTDR 技术在保留传统 OTDR 检测系统结构简单、定位精度高、信号处理方法易行等特点的基础上,通过使用超窄线宽光源,增强背向散射光间的相干性,从而获得光纤各点所返回的受相位调制的干涉信号,使得系统拥有更高的灵敏度,具有对动态事件响应的能力。国外方面, Juarez 等<sup>[4]</sup>现场实验探测到了 19 km 以内的入侵事件,系统空间分辨率为 200 m。文献<sup>[5]</sup>通过引入外差探测法,进一步提升了系统的信噪比(SNR)。随后, Qin 等<sup>[6]</sup>通过采用保偏光纤以抑制偏振衰落和偏振噪声的影响,将 1 km 探测范围内的系统空间分辨率提升到 1 m。国内方面,吕月兰等<sup>[7]</sup>探究了相干短脉冲作用下瑞利散射过程的物理实质。杨斌等<sup>[8]</sup>通过在一段传感光缆之间嵌入多级光中继放大装置,实现了传感光缆的分段分时测量。梁可桢等<sup>[9]</sup>将数字相干检测和维纳滤波技术应用于相敏型 OTDR,解调出了瑞利信号的振幅和相位。

振动传感的缺点在于反射光中含有许多随机噪声,通常需要使用大量反射曲线做平均处理,以滤除随机扰动对系统的影响。然而对于动态变化的探测,需要系统拥有较高的频率响应能力,量级从千赫兹到兆赫兹。平均算法在降低等效采样率的同时,实质上为一种低通滤波算法,损失了高频信号分量。虽然使用移动平均算法、移动差分算法<sup>[5]</sup>及由本课题组提出的改进型移动平均算法<sup>[10]</sup>可以改善结果,却均无法从实质上解决此矛盾。

本文提出了一种与传统平均算法、差分算法截然不同的方法以实现光纤沿线各点扰动情况的有效评价,利用小波分析理论聚焦不同频率尺度;利用信息熵理论评价扰动情况。小波是良好的时频分析工具,而信息熵则可以将噪声处理为熵值恒定的整体,从而在不降低采样率和不损失高频信息的情况下去除噪声的影响。在深入分析系统所得信号特征及小波信息熵处理方法的特点的基础上,探讨了窗

长、步长对评价算法的影响,并使用加权算法对该评价算法进一步优化。

## 2 方法原理

### 2.1 信号特征

系统所得空域信号,即散射曲线,其波形呈现光强随距离不断上下起伏的锯齿状变化,如图 1(a)中所示。受光纤的制作工艺、掺杂比率以及各处光纤扭曲及弯曲情况的影响,传感光纤各处的折射率不尽相同,光纤各处干涉信号的相位存在差异。当仅考虑简化模型时,干涉光光强的交流项为

$$I = A \cos(\phi_0 + \phi), \quad (1)$$

式中  $A$  为光强幅值,  $\phi_0$  为干涉相位差,  $\phi$  为受外界扰动影响所产生的相位差。因而传感光纤各处散射光所形成的干涉信号光强受该处特性所决定的相位信息的调制,散射曲线在一定时间内呈现相对较为稳定的相干增强和相干消隐间隔的形状。

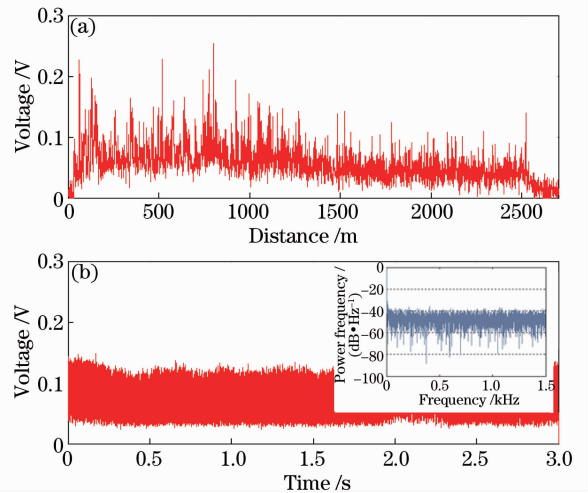


图 1 系统所得信号特征。(a)反射回波曲线;

(b)时域信号(插图为其功率谱)

Fig. 1 Signal characteristics. (a) Backscattering curve;

(b) time-domain signal (illustration shows its power spectrum)

对系统时域信号加以分析:提取连续数次光脉冲所返回多条散射曲线中的相同位置处的采样点,连缀形成该点时域信号,图 1(b)为图 1(a)中约 1270 m 位置处的时域信号。不难发现,受噪声和光纤所布放环境局部蠕动的影响,传感光纤各点的时域信号呈现相对恒定的随机波动的形式——缓变信号上夹杂着高频噪声。噪声主要由激光器的相位噪声、波长漂移、偏振噪声、环境噪声及电路噪声组成。

结构损伤所产生的扰动信号在形式上通常表现为冲击信号,冲击信号具有宽带频谱特征,与随机噪

声频谱[图 1(b)中插图所示为其功率谱]有较高的相似度,使用传统滤波手段,不易从强背景噪声中提取出所需信号。而后文所述的小波分析工具,对于非平稳信号的处理却具有先天的优势,提供了对瞬态冲击信号进行处理的有力工具。

传统处理方法中,平均算法通常能有效地去除高频噪声的干扰,但对于低频蠕动却无能为力;当使用差值算法来评价扰动时,这些低频蠕动会显现为曲线上的尖峰,严重影响扰动点的定位。同时经过平均算法的处理,结构损伤产生的振动信号也会因“平均效应”被削弱,和低频噪声的区分度很差。而小波信息熵算法,可以有效克服以上问题,正确有效评价系统扰动的情况。

## 2.2 小波信息熵

小波分析是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种信号的时频分析方法,很好地解决了信号处理中时间分辨率与频率分辨率的矛盾,尤其适用于非平稳信号的处理<sup>[11]</sup>。

熵的概念由鲁道夫·克劳修斯提出,表征体系的混乱的程度,是对系统不确定性的一种度量。1948 年,信息论的创始人克劳德·艾尔伍德·香农将熵的概念引入信息论中,提出了建立在概率统计模型上的信息度量,实现了对信息不确定度的评价<sup>[12]</sup>。

### 2.2.1 小波分析

对第  $n$  个信号序列  $x(n)$  进行  $N$  层离散小波分解,可得

$$x(n) = \sum_{i=1}^N D_i(n) + A_N(n), \quad (2)$$

式中  $D_i(n)$  为第  $i$  层小波分解得到的高频分量经单子带重构所得的小波重构系数,  $A_N(n)$  为第  $N$  层低频分量的重构小波系数。若信号的采样率为  $f_s$ , 则第  $i$  层小波重构系数所对应的频率范围为  $2^{-(i+1)}f_s \leq f \leq 2^{-i}f_s$ , 通过小波分析,可以获得不同频率范围上的信号特征。

为使符号简单明了,将(2)式统一表示为

$$x(n) = \sum_{i=1}^{N+1} C_i(n), \quad (3)$$

定义尺度  $i$  下信号的能量  $E_i$  为

$$E_i = \sum |C_i(k)|^2, \quad (4)$$

即某尺度下信号的能量为该尺度下小波系数的平方和。

### 2.2.2 信息熵

信息熵的定义如下:

设系统  $E$  中存在多个事件  $E = \{E_1, E_2, \dots,$

$E_n\}$ , 每个事件的概率分布  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,

$\sum_{i=1}^n p_i = 1$ , 则系统的信息量(香农信息熵)为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \text{lb}(p_i), \quad p_i \in [0, 1], \quad (5)$$

其单位为 bit。信息论使用涵盖系统全部信息所需的比特数来表征系统的信息量。越有序的系统,完整描述系统信息所需的比特数越少,即信息熵值越小。对于随机波动的背景噪声,使用信息熵可以有效诠释其混乱程度,实现对噪声水平的整体评价。

### 2.2.3 小波信息熵

小波分析提供了不同频率尺度、时间尺度下的细节信息,香农信息熵提供对序列不确定度的良好估计。参照信息熵的定义,定义小波信息熵为

$$S_{\text{wt}} = S_{\text{wt}}(p) = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \text{lb}(p_i), \quad (6)$$

式中

$$p_i = \frac{E_i}{E_{\text{total}}}, \quad (7)$$

$$E_{\text{total}} = \sum_i^{N+1} E_i, \quad (8)$$

即取小波分解后每一层的能量所占总能量的比例  $p_i$  来评价信号的不确定度。显然有  $\sum_{i=1}^{N+1} p_i = 1$ , 满足香农信息熵的定义。 $S_{\text{wt}}$  其表征的物理含义为能量分布的无序性的度量。一定时长内,当信号中只含有随机波动的背景噪声时,其对应能量分布拥有确定的混乱度,即拥有相对恒定的小波信息熵;而当结构损伤发生时,其所产生的冲击信号会改变信号能量的频率分布,从而使其小波信息熵值发生变化。应用小波信息熵分析能够有效区分噪声信号和结构损伤引起的振动信号。

(6)~(8)式提供了一段时间内所得信号的能量分布的不确定度的良好估计。为分析信息熵随时间变化的情况,定义时变小波信息熵:取窗长为  $L$  的滑动时间窗,间隔步长  $s$ , 依次滑动窗口截取信号序列  $x(n)$ , 得

$$x_j(k) = x[(j-1) \cdot s + k], \quad k \in [1, L], \quad (9)$$

$x_j(k)$  表示第  $j$  个滑动窗中第  $k$  个采样点。对每个时间窗内的信号做以小波信息熵处理,作为该时间窗中中心采样点所对应时刻的小波信息熵值。分析所得小波信息熵序列,即不同时刻对信号扰动的评价,可以得到扰动情况随时间变化的信息。

数据处理流程如图 2 所示,对背向散射曲线中每点的时域信号做以时变小波信息熵处理,得到小

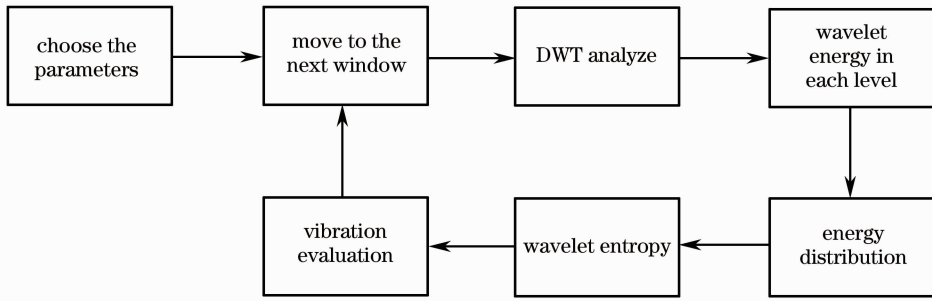


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Flowchart of data processing

波信息熵关于时间和空间的二维矩阵, DWT 表示应用离散小波变换。

### 3 实验设施

相位敏感型 OTDR 系统的结构和原理如图 3 所示。光源为 NP Photonics 公司生产的超窄线宽激光器, 线宽小于 3 kHz, 输出功率为 90 mW。由激光器产生的连续光经声光调制器(AOM)调制为脉冲光。光脉冲由掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大以弥补 AOM 的插入损耗, 并为远距离传输提供功率, 其中自发辐射噪声由光纤光栅滤除(图中未画

出), 放大后的光脉冲通过光纤环形器注入传感光纤之中。系统选用 THORLABS 公司的光电探测器, 该探测器采用雪崩光电二极管(APD), 带宽为 50 MHz, 最小可探测光功率为 3.3 nW, 可探测受相位调制的微弱背向散射光信号。信号采集卡(DAQ)为 NI 公司生产的 NI-5122 高速采集卡, 最高采样频率为  $10^8 \text{ s}^{-1}$ 。作为同步触发采集和声光调制器驱动的脉冲信号, 由上位机(IPC)控制现场可编程门阵列(FPGA)产生, 并可以根据最远探测距离的要求, 对调制脉冲频率进行调整。

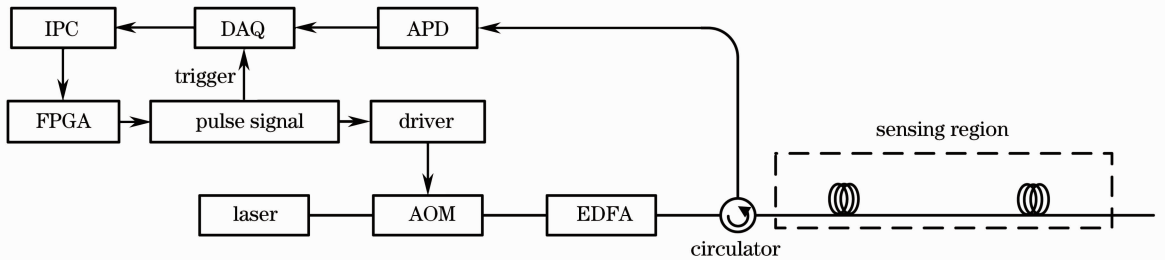


图 3 系统结构示意图

Fig. 3 Schematic configuration of the system

相敏型 OTDR 技术利用脉宽之内的散射光间的干涉效应实现对外界扰动的传感, 其实质为光脉冲长度内形成的散射光发生多光束干涉的结果, 因而系统的空间分辨率受脉宽影响, 并可由公式  $\Delta x = \tau c / (2n)$  求得, 其中  $\tau$  为脉宽,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为光纤中光波的群折射率。实验中所使用的脉冲宽度为 200 ns, 计算可得空间分辨率约为 20 m。当实验系统的采样率高于由脉宽所决定的空间分辨率对采样率的最小要求时, 即  $f_s \geq 1/\tau$ , 采样率的提高并无法从实质上提高系统分辨率, 光脉冲长度内的采样点均是该脉冲长度的扰动情况的反映。然而由(1)式可知, 各采样点受所对应光纤位置特性的影响, 彼此间具有不同的干涉相位差, 即初始相位不同, 因而对于外界扰动的响应存在差异。设外界扰

动为  $\phi = \cos t$ , 在不同的初始相位  $\phi_0$  下, 系统对扰动的响应如图 4 所示。可知当初始相位接近  $\pi/2$  的整数倍时, 系统对于外界扰动有最高的灵敏度, 幅值的

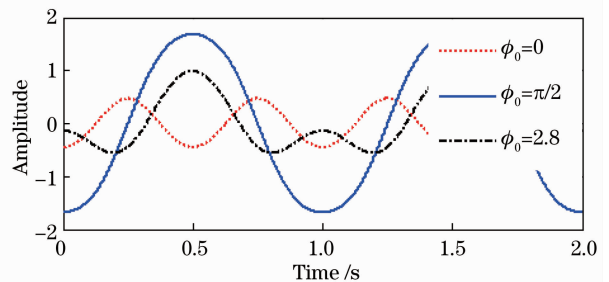


图 4 不同初始相位下对外界扰动的响应

Fig. 4 Response to external disturbances under different initial phases

变化幅度最大。因此当满足脉宽所决定空间分辨率对应的最小采样率的要求时,继续提高系统采样率,增加脉宽内采样点的数量,可以提高获得响应度更好的采样点的概率,对提高系统信噪比有重要意义。权衡高采样率对系统的负担和优化系统信噪比的需求,最终选择采样率为 20 MHz,即脉宽之内有四个采样点。

## 4 实验结果及分析讨论

### 4.1 振动检测

实验传感光纤全长 5 km,在光纤中段约 2.5 km 处取一段长约 10 cm 的裸纤,将其粘连在一块厚约 1 mm 的薄铝板上,使得人工施扰所产生的振动信号可以通过铝板耦合进入传感光纤。敲击铝板所产生的冲击信号和实际中结构损伤的振动信号有很高的相似度,实验中采用人工敲击来模拟结构损伤信号,敲击频率大致为 1 Hz。传感光纤的其他部分放置

于用隔振箱中以消除干扰,和暴露于振动场中的实验部分形成良好对照。脉冲频率为 3 kHz,对应实际可探测距离约为 30 km。

对 1 s 内所得的共 3000 条回波曲线分别使用传统移动平均、差值方法和时变小波信息熵方法进行处理,对于移动平均、差值算法,选取曲线平均数量为 200;而对于时变小波信息熵算法,取分解层数  $N$  为 8,经离散小波分解所得各层分量对应频率范围为:1500~3000 Hz、750~1500 Hz、375~750 Hz、...、11.71875~23.4375 Hz、0~11.71875 Hz,设定滑动窗窗长  $L$  为 256,间隔步长  $s$  为 3,所选取窗长  $L=256=2^8$  是为了配合离散小波处理的需要。图 5 用三维图显示了处理结果的对比, $x$  轴表示空间, $y$  轴表示时间,为使图形清晰直观,对处理结果在空间和时间维度上同时进行截取,图 5 为 2.5 km 位置处(振源附近)、振动发生前后的处理结果。

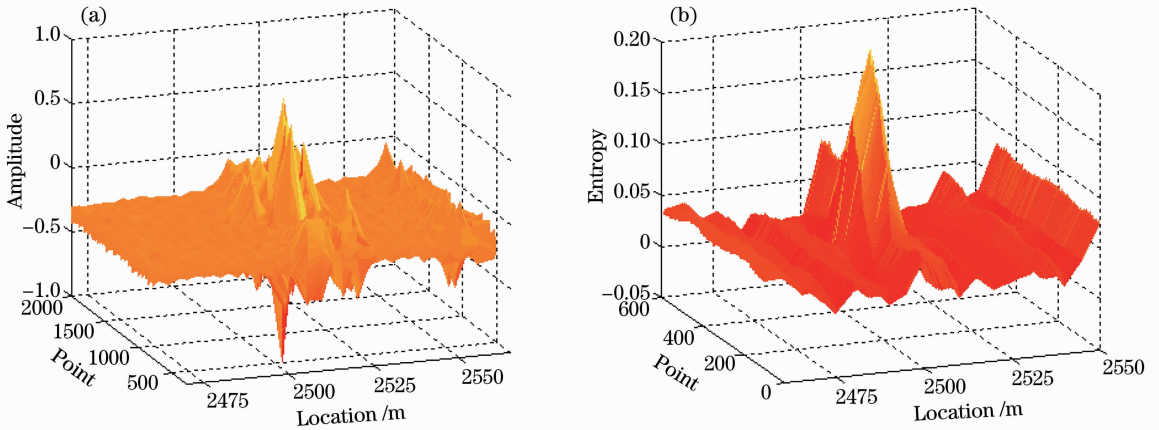


图 5 处理结果。(a)平均算法、差分算法处理结果;(b)时变小波信息熵算法处理结果

Fig. 5 Processing results. (a) Result for averaging and difference algorithms; (b) result for time evolution of wavelet entropy

图 5(a)中,信号经平均、差分处理,一定程度上消除了噪声的影响,能够捕获敲击所引起的扰动,但信噪比较差,噪声在图中显示为真实信号周围的小尖峰,和信号幅值较为接近,信噪比仅为 3.9 dB。如果想改善处理结果,需进一步提高平均的数目,而在提高系统处理负荷的同时,系统的频响能力将进一步受到抑制。图 5(b)中,由时变小波信息熵方法得到的处理结果对噪声和信号有较好的区分评价的能力,与理论分析相一致,噪声仅表现为熵值较为稳定的常量,而在出现敲击信号的位置,信号的熵值陡然抬升。这是因为敲击信号打乱了背景信号的有序性,提升了其混乱度、复杂度,经小波信息熵算法处

理,反映为熵值的剧烈变化。相较传统方法,时变小波信息熵处理方法能更为有效地评价扰动情况,可以更好地区分噪声和信号,拥有更强的抗噪声能力,信噪比为 7.3 dB,优于传统移动平均、差分算法。

进一步验证时变小波信息熵对连续扰动信号的处理能力。图 6 为对四次连续敲击信号的处理结果,其中图 6(a)为所对应振动源处的采样点的时间域信号的小波信息熵的变化情况,所选取窗长  $L$  为 256,间隔步长  $s$  为 10。敲击间隙间仅含有背景噪声信号,经小波信息熵处理后,得到的是较为平滑的恒定曲线;而对于敲击信号其处理结果显示为熵值的突变。整个敲击信号的小波信息熵在持续时长上



经历了熵值逐渐递增又回落的过程,即信号的从相对的有序状态变化到混乱状态又恢复到相对有序的状态的过程。图 6(b)显示整个时空域上光纤不同位置不同时刻的扰动评价情况,图中纵轴表示时间,横轴表示距离。将光纤每点噪声对应的小波信息熵值(处理结果的直流项)的影响即背景噪声水平不同的影响去除,仅分析小波信息熵值的变化部分。通过阈值的选取,整个时空图中留下由敲击产生的四次振动信号。

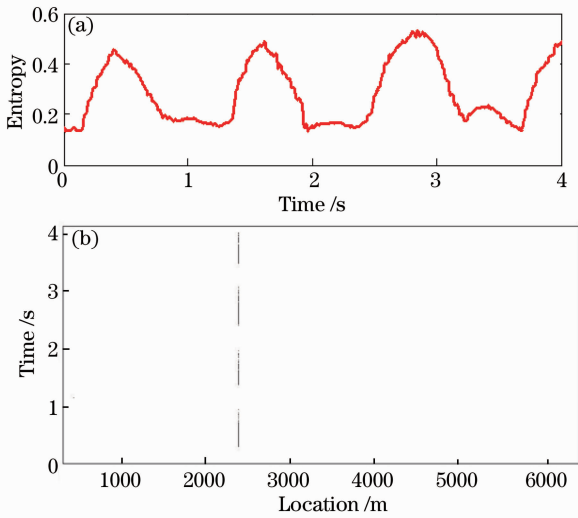


图 6 单点连续四次振动。(a)时域图;(b)时空图

Fig. 6 Four times vibrations. (a) Time domain diagram;  
(b) space-time diagram

## 4.2 讨论

时变小波信息熵处理中,滑动窗窗长  $L$  和间隔步长  $s$  的选取是影响处理结果的重要因素。小波信息熵是对窗长内信号扰动情况的评价,选取一定时长的噪声才能获得其真实的统计学规律,当窗长选取的过短时,所得小波信息熵值无法真实反映噪声的混乱程度,因而相邻窗的熵值间可能存在较大的波动,形成对处理结果的干扰。而当所选取窗长过长时,时变小波信息熵处理的时间分辨率会发生恶化,过长的窗长的平均效应过大,不能灵敏捕获个别采样点混乱程度变化对整个窗长数据评价结果的影响。另一方面,合适的间隔步长  $s$  有助于在保留有效信息的同时,减小系统的工作量。作为监测结构健康的振动传感系统,系统对于实时性有较高的要求,只有能实现信号的实时在线处理及分析,才能保证毫无遗漏地捕获突发结构损伤所产生的扰动。采用间隔步长  $s$  可以有效降低系统的运算负荷,但过大的步长可能会“跃过”微小短暂的扰动,使系统出现过多的盲区。此外,虽然该方法采用了交叠型滑

动窗,但当间隔步长取得过长时,其实际交叠的部分变短,对扰动信号无法形成足够精细的不同时刻上的评价。

为探究不同间隔步长  $s$  以及滑动窗窗长  $L$  对所得处理结果的信噪比的影响,取振源分别位于传感光纤首段、中部、尾端每处各 10 组实验数据,在不同间隔步长  $s$ 、滑动窗窗长  $L$  下对实验数据进行时变小波信息熵处理,并计算处理结果的信噪比。系统信噪比的定义为  $R_{SN} = 10\lg(V_{sig}/V_{noise})$ ,其中  $V_{sig}$ 、 $V_{noise}$  分别为信号和噪声的幅值。图 7 显示了实验结果,图中各点为在所对应间隔步长  $s$ 、滑动窗窗长  $L$  下 30 组实验结果的信噪比均值。选取间隔步长  $s$  分别为 1、10、50、100,在不同间隔步长下依次变动窗长  $L$  为 128、256、512、1024 和 2048。随着窗长  $L$  的增加,信噪比呈现先增后减的趋势,和理论分析相一致;而通过提高间隔步长,在牺牲系统信噪比的情况下,可以得到更高的系统运行效率。

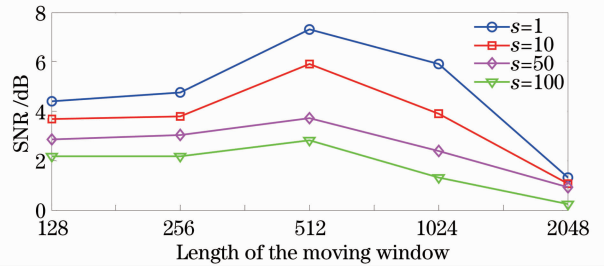


图 7 不同间隔步长下,不同窗长所得信噪比

Fig. 7 SNR under different step lengths and  
different window lengths

结合应用背景,监测系统总有特定感兴趣的信号,如应用于石油管道安全预警的入侵监测系统通常仅关注泄漏、挖凿等破坏管道设施的行为所产生的振动信号,而将车辆等造成的扰动视为噪声<sup>[13]</sup>。特定的信号通常有特定的频谱分布,如图 8 所示,车辆[图 8(a)]和人工挖掘[图 8(b)]所造成的扰动信号的频谱分布具有明显的差异。通过加入权值算法,增加感兴趣的频带的权值,可以有效提高时变小波信息熵处理方法对于特定信号的敏感度,并且降低噪声的干扰。图 9 中,经适度调整权值后,所得处理结果的信噪比有明显的提升。

图 10 为两点同时振动的实验结果,在传感光纤上距离约 20 m 的两点,能对同时施加于其上的外界振动信号分别做出响应,与空间分辨率的理论计算结果恰好相一致。在对多点同时振动传感的数据进行处理时,利用时变小波信息熵处理方法可以同时得到不同点扰动情况的良好评价。

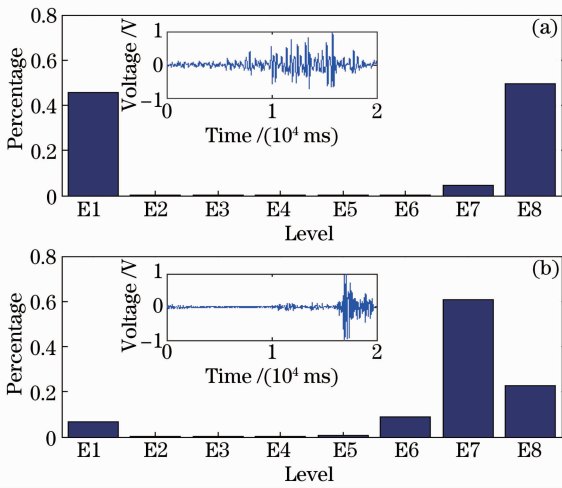


图8 不同信号的能量分布特征。(a)过车信号；  
(b)人工挖掘信号

Fig. 8 Energy distribution characteristics of different signals.  
(a) Vehicle signal; (b) man-made digging signal

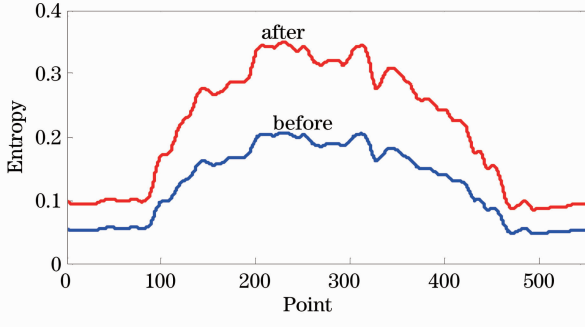


图9 权值算法对处理结果的影响

Fig. 9 Effect of weighting algorithm on the result

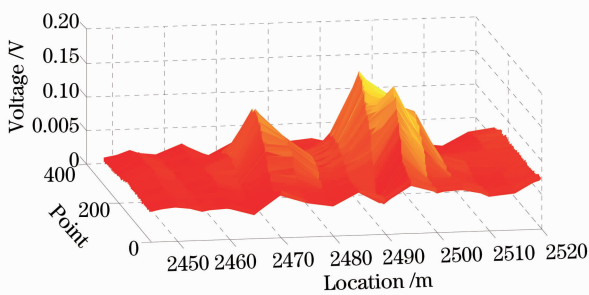


图10 两点同时振动的处理结果

Fig. 10 Processing results of two points vibrating at  
the same time

## 5 结 论

基于相位敏感型 OTDR 技术的分布式振动传感系统对结构健康监测有重要意义,提出了一种基于小波信息熵的信号处理方法,以解决传统处理方法中大量使用平均算法不能有效去除噪声干扰、而且削弱了系统高频响应能力的问题。深入探讨了信

号特征及小波信息熵算法的优势。实践证明,小波信息熵算法可以有效区分背景噪声同结构损伤所产生的振动信号,准确评价系统的扰动情况,提高相位敏感型 OTDR 系统的性能。且该算法的系统响应时间较短,在文中所采用的脉冲频率和采样率下,数据处理时间小于 0.1 s。

## 参 考 文 献

- Xiaoyi Bao, Liang Chen. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. *Sensors*, 2012, 7(12): 8601–8639.
- M K Barnoski, M D Rourke, S M Jensen, *et al.*. Optical time domain reflectometer [J]. *Appl Opt*, 1977, 16(9): 2375–2379.
- H F Taylor, C E Lee. Apparatus and Method for Fiber Optic Intrusion Sensing [P]. US Patent: 5 194 847, 1993.
- J C Juarez, E W Maier, K N Choi, *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensing system [J]. *J Lighwave Technol*, 2005, 6(23): 2081–2087.
- Yuelan Lu, Tao Zhu, Liang Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *J Lighwave Technol*, 2010, 28(22): 3243–3249.
- Z G Qin, T Zhu, L Chen, *et al.*. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 15(23): 1091–1093.
- Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0819001.  
吕月兰, 行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0819001.
- Yang Bin, Gao Wei, Xi Gang, *et al.*. Located super remote full optical fiber boundary safety guarding system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(5): 60–66.  
杨斌, 皋魏, 席刚, 等. 定位型超远程全光纤周界安防系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(5): 60–66.
- Liang Kezhen, Pan Zhengqing, Zhou Jun, *et al.*. Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0805004.  
梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0805004.
- An Yang, Feng Hao, Feng Xin, *et al.*. Phase sensitive OTDR based on two beam interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706005.  
安阳, 封皓, 冯欣, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706005.
- S Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence*, 1989, 11(7): 674–693.
- C E Shannon. A mathematical theory of communication [J]. *ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*, 2001, 5(1): 3–55.
- Zhang Jingchuan, Zeng Zhoumo, Lai Ping, *et al.*. A recognition method with wavelet energy spectrum and wavelet information entropy for abnormal vibration events of a petroleum pipeline [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 1–5.  
张景川, 曾周末, 赖平, 等. 基于小波能谱和小波信息熵的管道异常振动事件识别方法[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(5): 1–5.

栏目编辑: 何卓铭