

基于时频特征的光纤周界入侵振动信号识别与定位

朱程辉 王建平 李奇越 左冬森 李帷韬

合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 针对光纤周界安防系统入侵信号的非线性、非平稳性和间歇性等特点,提出了一种时域与频域特征相结合的方法,对光纤周界安防系统入侵振动信号进行识别与定位。采用计算嵌入维数方法,确定信号的最小分帧长度,因而能够较好地保留信号时间序列内在的动力学特性;提出了对入侵振动信号两级判定识别方法,利用短时能量和短时平均过零率特征来判断是否有振动信号产生,依据振动信号各层小波系数的能量分布特点来识别入侵信号,该方法有效地降低了周界安防系统的漏识率和误识率;为提高入侵信号定位的准确性,采用小波域贝叶斯自适应阈值对入侵信号作降噪处理,将重建的信号转换到频率域来确定入侵信号的位置。通过实验验证了所提方法的有效性。

关键词 传感器;信号处理;光纤周界系统;时频特征;嵌入维数;贝叶斯阈值

中图分类号 TH74; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0610001

Recognition and Localization of Intrusion Vibration Signal Based on Time-Frequency Characteristics in Optical Fiber Perimeter Security

Zhu Chenghui Wang Jianping Li Qiyue Zuo Dongsen Li Weitao

School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract In order to deal with the nonlinearity, non-stationarity and intermittence of intrusive vibration signal in the optical fiber perimeter system, a method combining time and frequency domains characteristics is proposed to distinguish and locate intrusive vibration signal. The minimum frame length is determined by computing embedded dimension to better reserve the dynamic characteristic of the time series signal. The two stages judging and recognizing methods of intrusive vibration signal are proposed. Firstly, short-term energy and zero-crossing measurements are used for determining whether the vibration signal is generated, and then the intrusive signal is recognized according to the characteristic of the energy distribution of each layer's wavelet coefficients. This method effectively reduces the efficiencies of recognizing error and loss for optical fiber perimeter system. In order to improve the accuracy of locating intrusive signal, Bayesian adaptive threshold estimation in wavelet domain is applied to reduce the noise of the signal, and the reconstruction signal is finally transformed to frequency domain to find the intrusive point. The experiments result shows that the proposed algorithm is effective.

Key words sensors; signal processing; optical fiber perimeter system; time-frequency feature; embedding dimension; Bayesian threshold

OCIS codes 280.4788; 070.4340; 230.2285; 060.2430

1 引言

光纤传感器以其抗电磁干扰性强、电绝缘性好、传感器无源、灵敏度高、测量范围广以及复杂环境适应性强等优点,被广泛应用于周界安防系统^[1-3]。对光纤周界安防系统检测信号的处理、入侵振动信号的识别以及入侵点位置的确定一直是对光纤周界安防系统研究的热点问题。由于周界入侵振动信号具有非线性、间

收稿日期: 2016-01-04; 收到修改稿日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51177034)、国家自然科学基金青年科学基金(51304058, 61305029)

作者简介: 朱程辉(1959—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感信号处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: zhuchenghui@sina.com

歇性和非平稳性特点,使得对周界入侵振动信号的识别具有较大的不确定性,此外光纤周界传感器布设在野外,易受到噪声的干扰,因此增加了准确定位的难度。

近年来,随着信号处理技术和模式识别方法的不断进步,对光纤周界入侵振动信号识别和位置确定方法的研究取得了较大的进展。在入侵振动信号识别研究方面,文献[4]采用指定的长度截取待识别信号,并计算其每帧信号的短时能量与短时平均过零率,通过与入侵信号的短时能量和短时平均过零率比较来识别入侵信号,但对截取信号长度的选取与待识别信号之间的关系并未论述,难以在实际中应用。文献[5]采用指定分帧长度来截取待识别信号,并使每帧间有 99% 的重叠,以保证入侵振动信号不被遗漏,然而该方法在降低漏报识率的同时也增加了信号处理过程计算的复杂度。文献[6]运用小波多尺度边缘检测方法,将原始信号小波降噪后,根据小波系数的标准差估计出用于对入侵信号报警的最佳边界,但该方法的信号模型还需要进一步地完善。在确定入侵点位置研究方面,文献[7]采用基于布里渊光时域反射原理的边缘滤波解调技术,确定光纤周界安防系统入侵点的位置,但该系统野外环境的适应能力不强,易受周围环境噪声的影响^[8]。文献[9]提出了一种基于通用阈值的小波去噪方法,该方法对所有的小波系数选用统一阈值滤波,实验结果表明,去噪后信号过于平滑,对细节信息保留不够,去噪效果不理想^[10]。

针对上述问题,本文提出了一种时域与频域特征相结合的光纤周界安防系统入侵振动信号识别与定位方法。通过计算测量信号的饱和嵌入维数,将时域信号分帧,计算每帧信号的短时能量和短时平均过零率,通过与先验得到的振动信号短时能量和短时平均过零率比较,从而判断当前帧是否为振动信号;对确定的振动信号作小波变换,将信号在各尺度上的小波系数的能量分布特征与先验入侵振动信号小波系数的能量分布特征比较,识别其是否为入侵振动信号;对入侵振动信号小波系数作贝叶斯自适应阈值滤波处理并重构信号,将重构信号作傅里叶变换,在信号的频谱曲线上找出零值点并确定入侵点位置。仿真实验结果表明,该方法不仅识别率高,而且受系统与外界噪声影响较小,定位准确。

2 单 Sagnac 环光纤周界安防系统的结构原理

采用单 Sagnac 环作为光纤周界安防系统的传感器。Sagnac 环内存在光强相等但传播方向相反的两束光,当光纤环受到外界入侵而产生振动时,两束光的相位差将发生改变,从而改变耦合器的输出干涉光强,且输出光强信号中包含振动信号的位置信息,因此,可采用信号处理技术从输出光强信号中识别出入侵振动信号并确定其入侵位置^[11]。由于 Sagnac 光纤环内两束光的传播路径相同,系统对光源相干度的要求较低^[12-14],因而其被广泛应用于周界安防系统中。单个 Sagnac 环光纤周界安防系统由光源、耦合器、传感光纤、延迟环和光强探测器等组成,其结构如图 1 所示。

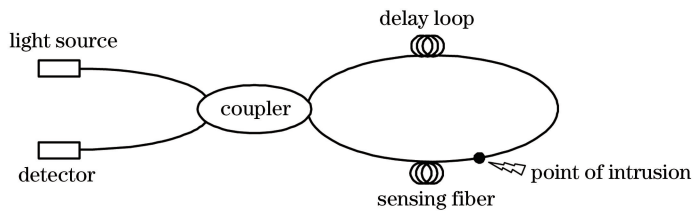


图 1 Sagnac 光纤传感系统结构图

Fig. 1 Structure of Sagnac optical fiber sensing system

Sagnac 光纤环内两束光干涉输出光强可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi), \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 分别为两束光的光强, $\Delta\varphi$ 表示两束光的相位差,那么

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2, \quad (2)$$

其中 $\Delta\varphi_0$ 表示初始相位差, $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 表示光纤受到外界入侵产生振动后环内两束光相位的变化量。设光束相位变化量为

$$\Delta\varphi_i = \Phi_0 \sin(\omega t), \quad (3)$$

式中 Φ_0 表示相位变化幅值, ω 表示振动频率。则两束光的相位差 $\Delta\varphi$ 表示为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \Phi_0 \sin(\omega t_1) - \Phi_0 \sin(\omega t_2), \quad (4)$$

式中 t_1 和 t_2 分别表示两束光到达入侵位置的时间。令 $t_1 = t_2 + \Delta t$, 代入(4)式整理后得

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + 2\Phi_0 \sin \frac{\omega \Delta t}{2} \cos \left[\omega \left(t_1 - \frac{\Delta t}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

假设 Sagnac 光纤环内两束光的初始相位差为 $\pi/2$, 当外界入侵信号作用在 Sagnac 光纤环上时, 耦合器输出的干涉光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left\{ \frac{\pi}{2} + 2\Phi_0 \sin \left(\frac{\omega \Delta t}{2} \right) \cos \left[\omega \left(t_1 - \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 Δt 为两束光到达入侵位置的时间差, 可表示为

$$\Delta t = \frac{n(L - 2D)}{c}, \quad (7)$$

式中 n 为光纤内芯折射率, L 为传感光纤总长度, D 为入侵点到耦合器的距离, c 为光速。

3 光纤周界安防入侵信号的识别

光纤周界安防系统采集到的是一组具有间歇性与非线性等特征的时间序列信号, 将此序列信号合理分帧能有效地降低计算的复杂度。

3.1 光纤周界安防信号分帧方法

由于固定长度分帧方法不适合处理具有间歇性与非线性等特性的振动信号, 因此提出采用饱和和嵌入维数^[15]来确定分帧长度的方法, 以确保信号的内在动力学特性保持完整不变。

计算光纤周界振动信号时间序列的容积维数, 得到饱和和嵌入维数 d 。以饱和和嵌入维数作为最小分帧长度, 将原始信号分割成长度为 d 的分帧信号序列, 以便作后续的处理。

3.2 入侵振动信号的识别

光纤周界安防系统是否发生入侵与所检测信号的短时能量和短时平均过零率的大小密切相关, 然而, 自然环境等因素引起的非入侵振动也会使检测信号的短时能量和短时平均过零率数值出现异常。为提高识别入侵振动信号的正确性, 研究了入侵振动信号两级识别方法。1) 利用短时能量和短时平均过零率来判断当前帧是否为振动信号; 2) 将已判定为振动的信号分解到小波域, 通过比较振动信号与先验得到的入侵信号在各层小波系数的能量分布特征, 来进一步识别入侵振动信号。

3.2.1 振动信号的判别

帧信号的短时能量 E_k 的表达式为

$$E_k = \frac{1}{d} \sum_{n=1}^d x_{[d \times (k-1) + n]}^2, \quad (8)$$

式中 $\{x_i\}$ 为光纤周界安防系统采集信号时间序列, $x_{[d \times (k-1) + n]}$ 表示第 k 帧的第 n 个值, d 为截取每帧信号的长度, $k=1, 2, 3, \dots, m$ 。帧信号的短时平均过零率 Z_k 的表达式为

$$Z_k = \frac{1}{d} \sum_{n=1}^d \left| \operatorname{sgn}(x_{[d \times (k-1) + n]}) - \operatorname{sgn}(x_{[d \times (k-1) + n-1]}) \right|, \quad (9)$$

式中 $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}, k=1, 2, 3, \dots, m$ 。

设由先验得到振动信号短时能量和短时平均过零率阈值分别为 \bar{E} 和 \bar{Z} , 若满足 $E_k < \bar{E}$ 且 $Z_k < \bar{Z}$, 则判定该帧为正常信号, 否则, 该帧为振动信号。

3.2.2 入侵振动信号的识别

1) 信号的小波分解与小波系数能量分布计算

将判别出的振动信号作小波分解, 并计算在不同尺度上的能量分布情况。图 2 为振动信号小波分解与重构示意图。 $x(n)$ 为原始信号, H_0 和 H_1 为由小波函数 $\varphi(t)$ 确定的分解滤波器, 小波系数经处理后由滤波

器 F_0 和 F_1 重构信号。其中 H_0 和 F_0 为低通滤波器, H_1 和 F_1 为高通滤波器, F_0 与 F_1 中的信号分别为 H_0 与 H_1 中信号的逆序, v_1 为第一层小波系数, $\hat{x}(n)$ 为重构信号。

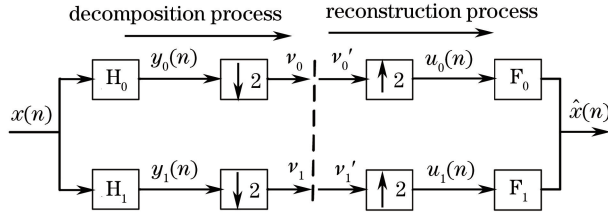


图 2 一层小波分解与重构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavelet decomposition and reconstruction

设对振动信号作 J 层小波分解, 分别计算各层小波系数能量 E_j 和尺度系数能量 E_φ 为

$$E_j = \sum_{i=1}^{N_j} |v(j, i)|^2, \quad (10)$$

$$E_\varphi = \sum_{i=1}^{N_{J+1}} |v(J+1, i)|^2, \quad (11)$$

式中 N_j 表示第 j 层小波系数长度, N_{J+1} 表示尺度系数长度, $v(J+1, i)$ 表示第 i 个尺度系数, $j=1, 2, 3, \dots, J$ 。各层系数总能量为

$$E_\Lambda = \sum_{j=1}^J E_j + E_\varphi. \quad (12)$$

用表示尺度系数能量分布, 则各层系数能量分布计算式为

$$\sigma_j = E_j / E_\Lambda, \quad (13)$$

式中 $j=1, 2, 3, \dots, J+1$ 。

2) 入侵振动信号的识别

由 Parseval 定理可知, 小波系数能量分布与原始信号特性之间存在对应关系。由(13)式计算各层小波系数能量分布特征, 并与先验得到的入侵振动信号各层小波系数能量分布特征进行比较, 以识别振动信号是否为入侵信号。振动信号的能量分布与先验值的偏差为

$$\epsilon = \sum_{j=1}^{J+1} |\sigma_j - M_j|, \quad (14)$$

式中 σ_j 示振动信号第 j 层小波系数能量分布, M_j 为先验得到的入侵振动信号第 j 层小波系数能量分布。若 $\epsilon \leq \epsilon$ ($0 < \epsilon < 0.5$ 由实验确定), 则该信号被识别为入侵振动信号; 否则为环境因素引起的非入侵振动信号。

3.2.3 入侵信号识别算法

入侵信号识别算法的步骤如下:

1) 对采集到的信号 $\{x_i\}$ 进行分帧处理, 分帧长度为信号的饱和嵌入维数 d ;

2) 计算每帧信号的短时能量 E_k 和短时平均过零率 Z_k , 并与先验值 \bar{E} 、 \bar{Z} 比较, 若满足正常状态条件则判定该帧信号为正常信号, 否则判定为振动信号;

3) 计算振动信号各层小波系数能量分布 σ_j , 与先验的入侵振动信号各层小波系数能量分布比较得到 ϵ , 若 ϵ 满足入侵振动信号判定条件, 则振动信号被识别为入侵振动信号, 否则振动信号为非入侵振动信号。

4 入侵振动信号的定位

采用频率法确定入侵信号的位置。对于一个实际的周界安防系统, 由于入侵振动信号中难免会包含系统及环境噪声, 其在频域上具有较大的带宽, 因此, 如何滤除噪声将影响到定位的准确性。小波降噪具有消除噪声同时保留尖锐变化信号和一些微弱小信号的优点。在小波变换基础上, 一种简单的滤波方法是取固定阈值对小波系数进行处理, 但难免会出现过扼杀或过保留现象。本文利用贝叶斯自适应阈值来处理小波系数, 既适应不同层小波系数的特性, 又能很好地滤除多种噪声。

4.1 贝叶斯自适应阈值去噪

4.1.1 贝叶斯自适应阈值选取

依据贝叶斯最小风险理论^[16],寻找一个阈值 T ,使得处理后的入侵振动信号小波系数 \hat{X} 接近真实入侵振动信号小波系数 X_0 ,即(15)式取最小值。

$$R_{\text{Bayes}}(T) = E(X_0 - \hat{X})^2 = E_{X_0} E_{X|X_0}(X_0 - \hat{X})^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [\eta_T(X) - X_0]^2 \times P(X|X_0)P(X)dXdX_0, \quad (15)$$

式中 X 为原含噪入侵振动信号小波系数集, T 为希望阈值。经过阈值处理后的入侵振动信号小波系数 \hat{X} 为

$$\hat{X} = \eta_T(X) = \text{sgn}(X) \max[|X| - T, 0], \quad (16)$$

希望阈值 T 为

$$T = \text{argmin}[R_{\text{Bayes}}(T)], \quad (17)$$

(17)式无封闭解,在实验基础上求出 T 的最优值估计为

$$\hat{T} = \frac{\sigma_{\hat{X}_n}^2}{\sigma_{X_0}}, \quad (18)$$

$$\sigma_{\hat{X}_0}^2 = \sigma_{\hat{X}}^2 - \sigma_{\hat{X}_n}^2, \quad (19)$$

$$\sigma_{\hat{X}_n} = \frac{\text{mid}[\text{Re}(X)]}{0.6754}, \quad (20)$$

式中 $\sigma_{\hat{X}_n}^2$ 为含噪信号小波系数方差, σ_{X_0} 、 σ_X 分别表示真实入侵振动信号小波系数和含噪信号小波系数标准差。

4.1.2 贝叶斯自适应阈值滤波算法

贝叶斯自适应阈值滤波算法的步骤如下:

- 1) 将含噪入侵振动信号进行小波变换,得到各层小波系数 X ;
- 2) 由(20)式估计含噪信号小波系数方差 $\sigma_{\hat{X}_n}^2$, (19)式计算真实信号小波系数方差 $\sigma_{\hat{X}_0}^2$;
- 3) 由(18)式计算各层小波系数自适应阈值 \hat{T} ,由(16)式得到经自适应阈值处理后的入侵振动信号小波系数 \hat{X} ;
- 4) 用处理后的小波系数 \hat{X} 重构入侵振动信号。

4.2 入侵振动信号位置的确定

由(6)式可得,入侵振动信号去除直流分量后为

$$i = 2\sqrt{I_1 I_2} \sin\left[2\Phi_0 \sin\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right) \cos \omega\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)\right], \quad (21)$$

当 ω 取值满足 $\frac{\omega \Delta t}{2} = k\pi$, $k = 0, \pm 1, \dots$ 时,有 $\sin\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right) = 0$,可以得到(21)式的值为零,入侵振动信号在频域上会出现若干零值点。将入侵振动信号作傅里叶变换,在信号的频谱曲线上找出第一个零值点所对应的频率 ω_0 ,有 $\omega_0 \Delta t = 2\pi$,据此求得光纤传感器两束光到达入侵振动点的时间差为 $\Delta t = \frac{2\pi}{\omega_0}$,由(7)式可得出入侵点到耦合器距离为

$$D = \frac{nL - c \Delta t}{2n}. \quad (22)$$

为验证入侵振动信号识别与定位方法的有效性,分别定义了入侵振动信号的识别率和定位准确度。识别率为

$$\lambda = \frac{I}{N} \times 100\%, \quad (23)$$

式中 I 和 N 分别为入侵振动信号识别个数和入侵振动信号总个数。定位准确度为

$$\eta = \left(1 - \frac{|D_0 - D_1|}{D_0}\right) \times 100\%, \quad (24)$$

式中 D_1 为本文定位方法确定的入侵点距离, D_0 为实测入侵点距离值。 λ 和 η 的值越接近 1, 表明识别率越高、定位越准确。

5 实验结果与对比分析

采用传感光纤的长度为 2000 m 的 Sagnac 型光纤环布设挂网式周界安防系统, 传感光纤为康宁单模光纤, 光纤内芯折射率为 1.45, 光电转换器为 New Focus 公司的 1811 型光电转换器, 数据采集卡为 MCC 公司的 PCI-DAS08 模拟量输入板卡, 利用 LabVIEW 软件采集检测信号, 实验系统结构如图 3 所示。选取敲击栏杆、人员攀爬、大风、暴雨、飞鸟降落等典型振动信号作用于实验系统, 其中敲击栏杆和人员攀爬属于入侵振动信号, 而大风、暴雨等为非入侵振动信号。在传感光纤不同位置进行多次反复实验测试。下面以敲击栏杆为例介绍实验测试过程。

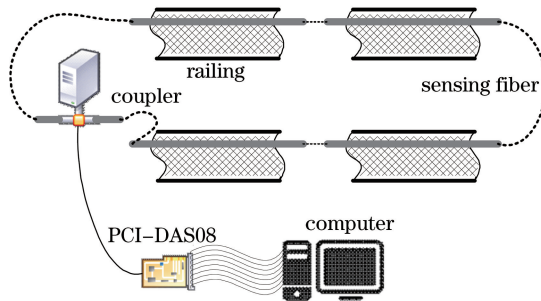


图 3 光纤周界安防系统实验结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental structure of fiber optic security system

在周界安防系统不同位置敲击栏杆, 采集光纤传感器输出信号, 图 4 为在 500 m 处敲击栏杆检测到的振动信号曲线。

计算图 4 所示时间序列信号各维数的关联积分, 并画出曲线如图 5 所示。通过计算并由图 5 可确定振动信号饱和嵌入维数为 500, 即将原信号按长度 500 分帧。

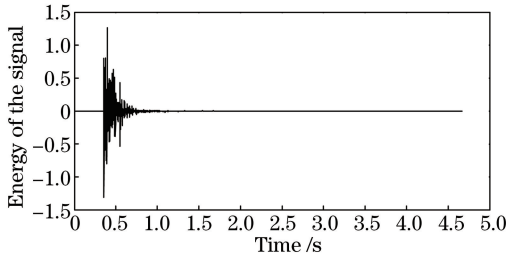


图 4 光纤周界安防系统振动信号

Fig. 4 Fiber optic security system vibration signal

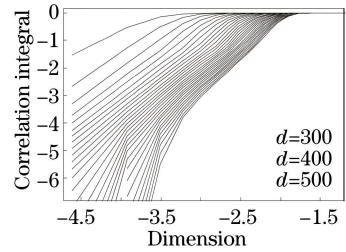


图 5 序列信号维数与相关积分曲线图

Fig. 5 Dimension and correlation integral curve

每帧信号的短时能量及短时平均过零率的计算结果如表 1 所示。由实验获得的振动信号的短时能量和短时平均过零率阈值分别为 0.2×10^{-4} 与 0.5, 用所提的方法得出第 1、2、3 帧为振动信号。振动信号 3 层小波分解后的小波系数如图 6 所示, 图中 d_1, d_2, d_3 代表高频系数, a 代表低频系数。

表 1 短时能量和短时平均过零率数值表

Table 1 Short-time energy and short-time average zero-crossing rate

Feature	1	2	3	4	5	6	7
$E_k/10^{-4}$	0.9766	3.3378	0.6732	0.1045	0.0582	0.0342	0.0207
Z_k	0.5677	0.7322	0.5119	0.4419	0.4503	0.4714	0.4087

通过大量实验得到敲击振动信号小波系数能量分布先验值为

$$[M_1, M_2, M_3, M_4] = [0.6, 0.2, 0.1, 0.1]. \tag{25}$$

计算得到振动信号小波系数能量分布及偏差值如表 2 所示。由实验方法得到 ϵ 为 0.2, 据此识别出第 1

和第 2 帧为入侵振动信号。入侵振动信号小波变换系数经贝叶斯自适应阈值滤波处理,并重构得到的信号如图 7 所示。

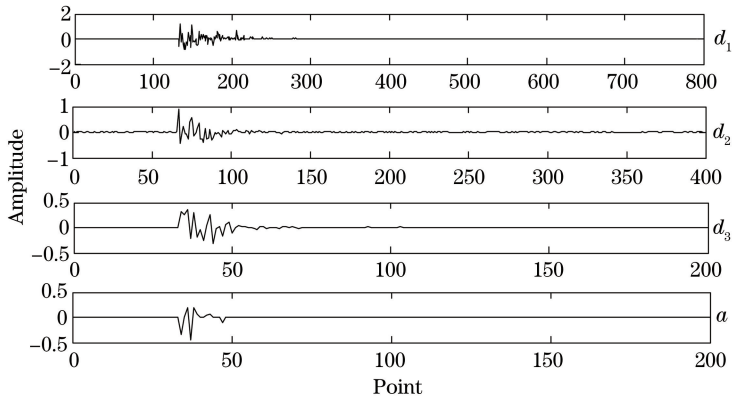


图 6 振动信号 3 层小波分解小波系数

Fig. 6 Three layers wavelet coefficients of vibration signal

表 2 小波系数能量分布表

Table 2 Energy distribution table of scale wavelet coefficient

Feature	1	2	3	4	5
σ_1	0.7176	0.6269	0.3078	0.2393	0.2341
σ_2	0.1790	0.1858	0.1413	0.1314	0.1261
σ_3	0.0542	0.0711	0.0675	0.0887	0.0705
σ_{3+1}	0.0492	0.1161	0.4834	0.5405	0.5693
ϵ	0.1377	0.0449	0.4867	0.5736	0.6004

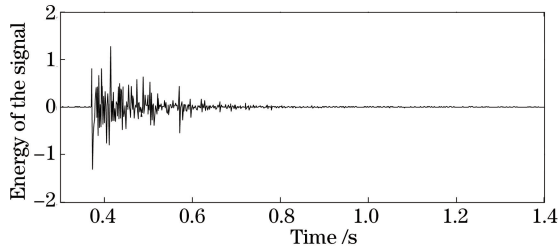


图 7 滤波后重构信号

Fig. 7 Reconstruction of signal after filtering wave

重构信号经傅里叶变换得到其频谱曲线如图 8 所示。确定零值点对应的角频率约为 $1246.2 \times 10^3 \text{ rad/s}$, 计算出两束光到达入侵点的时间差为 $5.0419 \mu\text{s}$, 据 (22) 式计算得入侵点到耦合器的距离约为 478.4 m, 定位准确度为 95.68%。

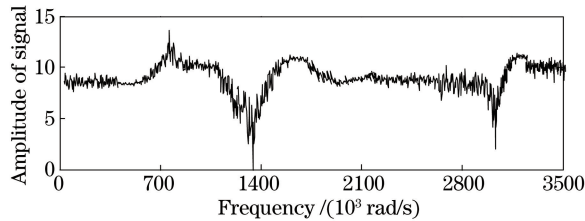


图 8 入侵振动信号频谱曲线图

Fig. 8 Curve of intrusion vibration signal spectrum

运用本文两级识别方法与单一的时域或频域识别方法, 分别对光纤周界安防实验系统作入侵振动信号识别率对比分析, 不同识别方法对入侵振动信号识别结果如表 3 所示。由表 3 可见, 单一的时域或频域识别方法对入侵振动信号的识别率不高, 而将非入侵信号识别为入侵信号的机率明显偏高, 说明这两种方法对非

入侵信号的误识率较高。采用时域和频域相结合的两级入侵振动信号识别方法,即先用时域的短时能量和短时平均过零率特征来判别信号是否为振动信号,再用频域小波系数多尺度能量分布特征进一步识别振动信号是否为入侵信号,提高了对入侵信号的识别率,表明该方法对入侵振动信号的漏识率和对非入侵振动信号的误识率都较低。

表 3 不同特征下光纤信号的识别率

Table 3 Recognition rates of fiber optical signal with different features

Feature	Rate with tap / %	Rate with climb / %	Rate with storm wind / %	Rate with rain storm / %	Rates with birds landing / %
E_k, Z_k	83.2	87.3	20.9	35.8	22.2
ϵ	72.6	69.8	68.5	57.6	60.4
E_k, Z_k, ϵ	98.2	99.3	3.6	5.7	3.2

在周界安防实验系统 500~1500 m 范围内,每间隔 200 m 进行敲击测试,每处重复实验 200 次,共得 1200 个测试信号,用本文和文献[11]的定位方法分别计算 D 及 η, η 的累计分布如图 9 所示。由图 9 可见,由于采用了贝叶斯自适应阈值滤波处理,降低了系统和环境噪声的影响,提高了定位的准确性。

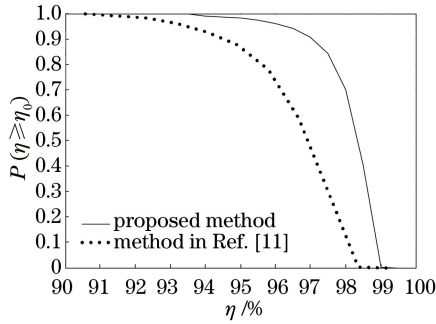


图 9 定位准确度累计分布图

Fig. 9 Cumulative distribution map of positioning accuracy

6 结 论

提出了一种基于时频特征、对光纤周界入侵振动信号识别与定位方法。针对入侵振动信号的间歇性和非线性特点,给出了计算检测信号最佳分帧长度的方法;为降低对入侵振动信号的漏识率和非入侵振动信号的误识率,提出了对入侵振动信号进行两级判定识别方法,利用短时能量和短时平均过零率两个特征来判别信号是否为振动信号,将振动信号各层小波系数能量分布特征与先验的入侵振动信号小波系数能量分布特征作比较,以识别出入侵信号;用频率法确定入侵信号的位置,对入侵振动信号采用小波域贝叶斯自适应阈值进行去噪处理,提高了入侵振动信号定位的准确性。

参 考 文 献

- 1 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin, *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 123-127.
杭利军, 何存富, 吴 斌, 等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 123-127.
- 2 Mahmoud S S, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Real-time distributed fiber optic sensor for security systems: Performance, event classification and nuisance mitigation[J]. Photonic Sensors, 2012, 2(3): 225-236.
- 3 Liu Jun, Xiao Cheng, Pan Xin, *et al.*. Research on inhibiting radial magnetic sensitivity of fiber-optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0305005.
刘 军, 肖 程, 潘 欣, 等. 抑制光纤陀螺径向磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0305005.
- 4 Wu Hongyan, Jia Bo, Bian Chong. Study on end point detection technology based on fiber perimeter security system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 743-748.

- 吴红艳, 贾 波, 卞 宠. 光纤周界安防系统端点检测技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 743-748.
- 5 Zhu Chenghui, Qu Yongzhong, Wang Jianping. The vibration signal recognition of optical fiber perimeter based on time-frequency features[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(1): 16-22.
朱程辉, 瞿永中, 王建平. 基于时频特征的光纤周界振动信号识别[J]. 光电工程, 2014, 41(1): 16-22.
- 6 Rao Yunjiang, Wu Min, Ran Zengling, *et al.*. A fiber-optic intrusion alarm system based on quasi-distributed FBG sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(5): 998-1002.
饶云江, 吴 敏, 冉曾令, 等. 基于准分布式 FBG 传感器的光纤入侵报警系统[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 998-1002.
- 7 Luo Jun, Rao Yunjiang, Yue Jianfeng, *et al.*. Highly sensitive distributed optical fiber intrusion monitoring system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1123-1128.
罗 俊, 饶云江, 岳剑锋, 等. 新型高灵敏分布式光纤入侵监测系统[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1123-1128.
- 8 Huang Wenfa, Wang Xiaochao, Wang Jiangfeng, *et al.*. Temperature characteristic of stimulated Brillouin scattering in single-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405001.
黄文发, 汪小超, 王江峰, 等. 单模光纤中受激布里渊散射的温度特性[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405001.
- 9 Prado A. Analysis of non-local image denoising methods[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(16): 2145-2149.
- 10 Montefusco L B, Lazzaro D, Papi S. Fast sparse image reconstruction using adaptive nonlinear filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(2): 534-544.
- 11 Zhang Chunxi, Li Qin, Li Lijing, *et al.*. Fiber-optic distributed disturbance sensor based on merged Sagnac interferometers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3378-3382.
张春熹, 李 勤, 李立京, 等. 基于 Sagnac 组合型干涉仪的光纤分布式扰动传感器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3378-3382.
- 12 Yang Yuanhong, Wang Huan, Yang Fuling, *et al.*. Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806004.
杨远洪, 王 欢, 杨福铃, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806004.
- 13 Lei X, Chen W, Zhang P, *et al.*. One frequency component dependency based distributed vibration sensor applying a modified Sagnac interferometer with a delay fiber loop[J]. Sensor Letters, 2012, 10(7): 1368-1373.
- 14 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yan Su, *et al.*. Precise alignment of separated Sagnac interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0416001.
张学敏, 魏儒义, 闫 肃, 等. 分体型萨格奈克干涉仪的精密装调[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0416001.
- 15 Fu Qiang, Li Chenxi, Zhang Zhaoxi. G-P algorithm for evaluating the correlation dimension in chaos[J]. Journal of PLA University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 15(3): 275-282.
付 强, 李晨溪, 张朝曦. 关于 G-P 算法计算混沌关联维的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(3): 275-282.
- 16 Hashemi M, Beheshti S. Adaptive Bayesian denoising for general Gaussian distributed signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(5): 1147-1156.