

文章编号:1004-4213(2011)11-1692-5

# 基于多种小波分解方法综合判决的低误报率 分布式光纤围栏入侵监测系统

吴麻伟,吴慧娟,饶云江,吴宇,赵天

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室,成都 611731)

**摘 要:**针对相位敏感光时域反射计型分布式光纤围栏入侵监测系统对外界干扰敏感、误报率高的问题进行了深入研究,比较了多种小波提取入侵信号突变特征方法,并提出一种基于多个小波分解结果进行综合判决来降低分布式光纤围栏误报率的方法.实验结果表明,多种小波分解可以分别提取不同层次的突变细节信息,为综合决策提供更完备的信息和条件,比单一判决能更有效降低系统误报率,室外长期测试可达到 0-1 次/24h,大大提高了分布式光纤围栏报警系统的稳定性和置信度水平.

**关键词:**光纤传感器;相位敏感光时域反射计;小波分解;误报率

**中图分类号:**TP212.14

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114011.1692

## 0 引言

基于相位敏感光时域反射计(Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometer,  $\Phi$ -OTDR)技术的分布式光纤围栏入侵监测系统<sup>[1-7]</sup>,在安防应用中具有全分布式入侵监测,灵敏度高,监测距离范围广,长距离定位能力强,系统性价比低等多种突出优点,因此在国境线、军事基地、长输油管道、长输电线、长距离通信光缆等重要应用领域的入侵监测与安全防范中扮演重要角色.

在已完成的研究中,由自制光纤激光器与电光调制器组成的  $\Phi$ -OTDR 系统,采用两级放大,在现场试验中,定位准确度为 1 km,定位范围为 12 km,信噪比约为 5.6 dB<sup>[8]</sup>.大功率超窄线宽单模光纤激光器和电光调制器的  $\Phi$ -OTDR 可实现定位准确度 50 m,定位范围达到 14 km<sup>[9]</sup>.采用光纤饱和体吸收法压榨激光器线宽的窄线宽分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB)激光器和一种基于纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastics, FRP)传感光纤的  $\Phi$ -OTDR 系统,经过离散小波降噪处理之后,检测范围达到了 8 km,定位准确度为 100 m<sup>[9]</sup>.

本文提出一种基于多种小波分解方法综合判决的低误报率分布式光纤围栏入侵监测系统.利用哈尔(Haar),Daubechies 等多种小波分解方法分别提

取出入侵信号在不同层次的突变细节信息,作为判决的不同因素进行综合考虑和决策.大量实验结果验证并说明了所提方案的有效性,可以显著降低系统误报率,使得基于  $\Phi$ -OTDR 的分布式光纤围栏入侵监测系统能够适应实际复杂环境.在长期的室外全天候不间断监测实验中,该系统的实际误报率为 0-1 次/24h,远低于目前分布式光纤围栏入侵监测系统的实际误报率,为  $\Phi$ -OTDR 技术的实际产业化应用奠定坚实基础.

## 1 基于 $\Phi$ -OTDR 的分布式安防系统

$\Phi$ -OTDR 分布式安防系统结构见图 1,窄线宽 DFB 激光器发出的连续光,首先经过光隔离器,防止有光反射回激光器从而影响激光器的稳定,然后通过光纤饱和吸收体先进行线宽压窄,压窄后的窄线宽激光由声光调制器调制后产生光脉冲,光脉冲被掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier, EDFA)放大,通过一个 3dB 的耦合器进入传感光纤,传感光纤部分先从耦合器处接 7.9 km 的普通光纤,将其密封保护好,然后接 100m 的 FRP 封装的光缆作为传感部分进行实验,光缆后端再接 4 km 的普通光纤,同样也密封保护好.用带有前放和滤波功能的光电探测器探测后向瑞利散射光,用采样率为 50MS/s 的数据采集卡采集数据,并用 Matlab 软件处理得到的实验数据.

第一作者:吴麻伟(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式光纤传感系统和信号处理. Email: wuxiuwei1987@163.com

导师(通讯作者):饶云江(1962-),男,教授,主要研究方向为光纤传感. Email: yjrao@uestc.edu.cn

收稿日期:2011-05-26;修回日期:2011-07-18

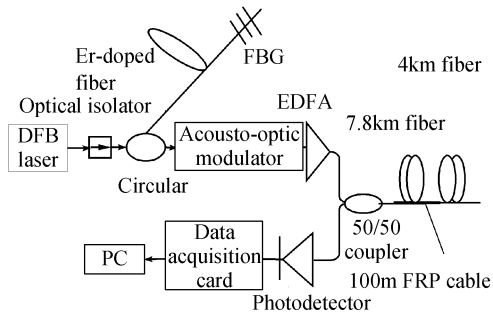


图1 系统结构

Fig.1 System structure diagram

由于系统的分辨率由光源的相干长度和采集卡的采样率决定,故本文采用波形发生卡产生 5 kHz 占空比为 0.2% 的 TTL 波,即  $T_p = 0.4 \mu\text{s}$ ,  $\Delta z = cT_p/2\eta_g$ ,所以分辨率为 20 m 左右,对本系统中 12 km 的光缆一次需采样 6 000 个点以上,系统中采样点设为 6 000,即每个点代表 2 m 距离。

## 2 基于小波基提取突变信号特征方法比较

$\Phi$ -OTDR 信号噪音主要有两种类型:一种可看作为白噪音:包括 EDFA 引入的自发辐射噪音,环境噪音,光源的相位噪音,还有探测器引入的温度噪音等;一种是光源频率漂移引入的噪音.小波分析能同时在时域和频域对信号进行分析,在时域分辨率高时,在频域分辨率低,在频域分辨率高时,在时域分辨率就低,具有自动变焦的功能,所以它能有效地区分信号中的突变部分和噪音,从而能在滤去噪音的同时保留信号的锐变尖峰部分。

常用的小波分解算法有三种,基于离散小波变换的分解方法,基于小波包变换的分解方法和基于平稳小波变换的分解方法.其中离散小波变换只是小波包变化左边的一个子树,小波包变换提供了更多的小波包基的选择,不同的小波包基能够反映信号的不同特征,能够最好地表现分析信号特征的那个小波基就是最优小波包基<sup>[11]</sup>.然而,与基于离散小波变换的降噪方法相比,基于小波包变换的降噪方法需要更多的运算量,其中包括计算最优小波包基,阈值的计算,还有通过每个修改过的节点重构信号等。

而离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 中采用了降采样,虽然可以清除冗余的信息,减少运算量,但是离散小波变换是一个时变变换,对输入信号进行时间上的平移,这样得到的离散小波变换的信号的波形发生了改变.1996 年 Pesquet, Krim 和 Carfantan 证明小波变换的正交性和时不变特性是可以同时得到的<sup>[12]</sup>,在此基础

上,提出来了一种扩展的标准离散小波变换,称为平稳小波变换<sup>[13]</sup>。

在平稳小波变换中,信号直接通过两个滤波器而不需要降采样,在分解的过程中保留所有的元素,这样,平稳小波变换成为一个时不变的变换.同时由于平稳小波变换没有进行抽样,相比离散小波变换来说运算增加了.正是由于离散小波变换不是一个时不变的变换,所以在对波形形状敏感的情况下,平稳小波变换成为一个很好的选择.因为本文中重点不是考虑运算量问题,故采用这种时不变的变换。

在选定了平稳小波变换算法之后,应该马上选取适当的小波基对信号进行分解.与标准的傅里叶变换相比,小波分析中所用到的小波函数具有不唯一性,即小波函数  $\psi(t)$  具有多样性.小波分析在工程应用中,一个十分重要的问题就是最优小波的选择问题,因为用不同的小波分析同一个问题会产生不同的结果.目前主要通过用小波分析方法处理信号的结果与理论结果的误差来判定小波的好坏,由此决定选取何种小波。

### 2.1 Haar 小波

Haar 小波是小波分析中发展最早的小波,也是最简单的小波.实际上它是阶跃函数.直接利用 MATLAB 里的 wavedec 和 wrcoef 函数即获得经过 Haar 小波分解后的各层系数如图 2。

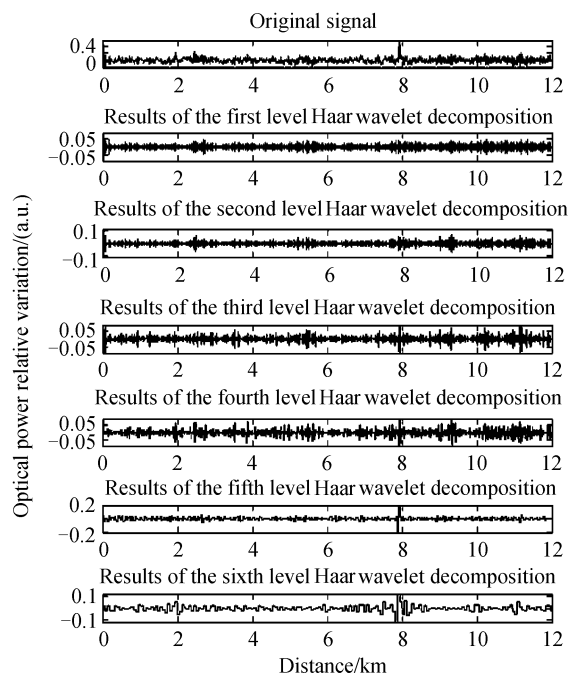


图2 利用 Haar 小波分解结果

Fig.2 Results using Haar wavelet decomposition

### 2.2 Daubechies 小波

Daubechies 小波是小波领域的里程碑,使小波的研究由理论转到可行. Daubechies 小波系列的小波简称为 db N,其中 N 表示阶数,db 是小波名字的

前缀. 除 db(等同于 Haar 小波)外,其余的 db 系列小波函数都没有解析的表达式,小波函数与尺度函数的有效支撑长度为  $2N-1$ ,小波函数的消失矩为  $N$ . 对于  $\Phi$ -OTDR 信号,经过大量的实验发现, $N$  选 5 时效果比较好. 利用 MATLAB 里的 wavedec 和 wrcoef 函数获得经过 db 小波分解后的各层系数如图 3.

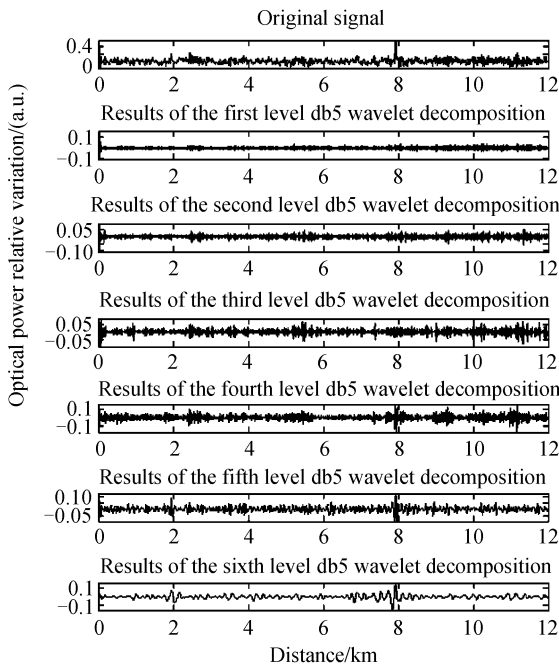


图 3 利用 daubechies 小波分解结果

Fig. 3 Results using daubechies wavelet decomposition

### 2.3 Symlets 小波

Symlets 小波的构造类似于 db 小波族,两者的差别在于 sym 小波有更好的对称性,更适合于图像

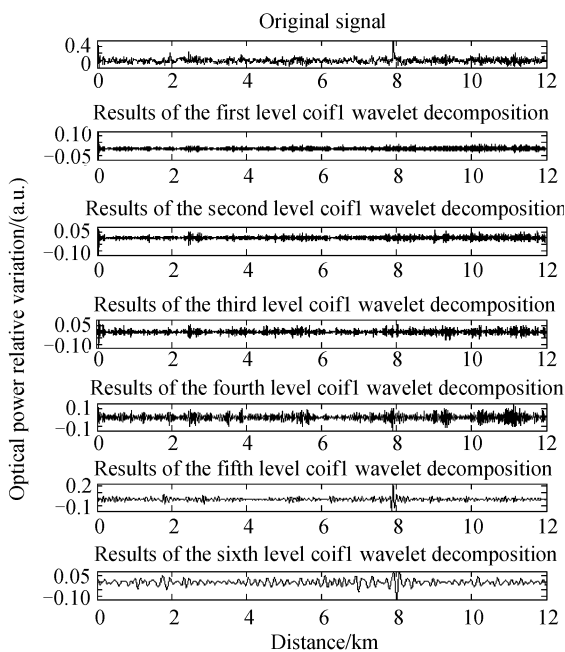


图 4 利用 symlets 小波分解结果

Fig. 4 Results using symlets wavelet decomposition

处理,减少重构时的相移,简写 sym  $N(N=2,3,4)$ . 该小波的支撑长度为  $2N-1$ ,滤波器的长度为  $2N$ ,消失矩为  $N$ ,具有近似的对称性. 对于我们的  $\Phi$ -OTDR 信号,经过大量的实验发现, $N$  选 8 效果比较好. 利用 MATLAB 里的 wavedec 和 wrcoef 函数获得经过 db 小波分解后的各层系数如图 4,从图中也可以看出经过 Symlets 小波分解到第五层可以提取出有用的突变信号.

### 2.4 Coiflet 小波

Daubechies 提出的另一个小波系,有更长的支集长度( $6N-1$ )和更大的消失矩( $2N$ ),对称性比较好,其简写 coif  $N(N=1,2\cdots)$ . 我们的  $\Phi$ -OTDR 信号,经过大量的实验发现, $N$  选 1 比较好. 利用 MATLAB 里的 wavedec 和 wrcoef 函数获得经过 Coiflet 小波分解后的各层系数如图 5,从图中可看出对明显的突变信号,经过 Coiflet 小波分解到第五层可以提取出有用的突变信号.

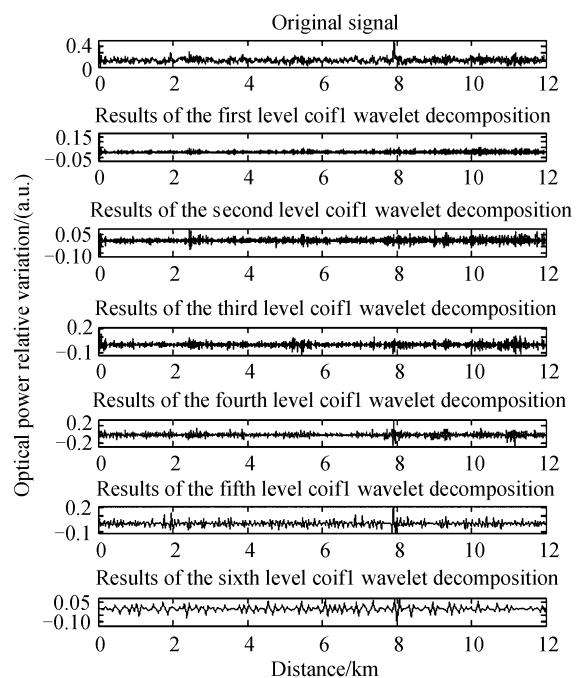


图 5 利用 coiflet 小波分解结果

Fig. 5 Results using coiflet wavelet decomposition

## 3 入侵检测及报警的综合判决方法

对于图 2~图 5 中信噪比较高的  $\Phi$ -OTDR 信号,采用四种不同的小波基均可提取出突变信号,但是当光源漂移,外界环境不稳定时, $\Phi$ -OTDR 信噪比会很低,就会出现有的小波基分解不能准确提取出突变信号(漏报)和把噪音提取为突变信号(虚报)的情况.

入侵一:如图 6,当原始信号信噪比很低的时候,只有 coif3 和 db5 能提取突变信号.

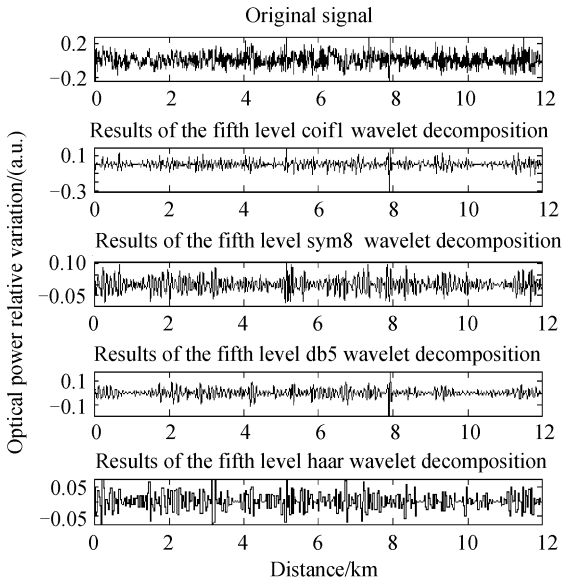


图6 只有 coiflet1 和 db5 小波能提取突变信号的情况  
Fig. 6 Results only coiflet1 and db5 wavelet decomposition can extract signals

入侵二: 信号信噪比低, 入侵发生在横坐标 8 km 位置附近, 原始信号和四个小波分解到第五层的信号如图 7. 只有 Haar 小波和 sym8 小波提取出横坐标在 8 km 位置附近的突变信号. 和图 6 中情况正好相反. 所以单独采用某一种小波分解来提取突变信号, 必然会产生漏报或者虚报.

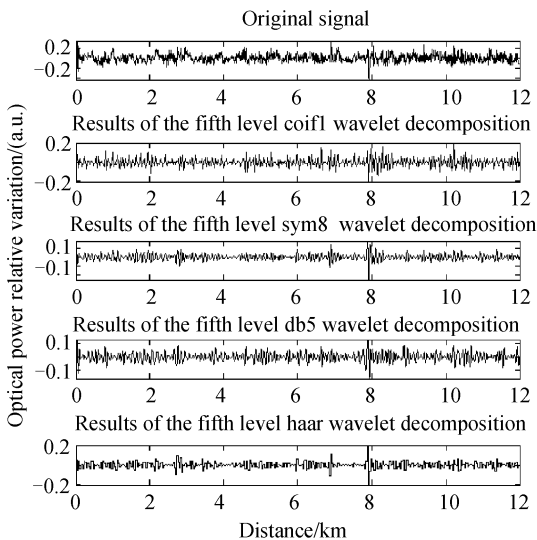


图7 只有 sym8 和 haar 小波能提取突变信号的情况  
Fig. 7 Results only coiflet1 and db5 wavelet decomposition can extract signals

因此, 在大量实验数据分析基础上提出了一种综合判决方法: 将四种小波分解里面有两种或者两种以上的小波分解提取到突变信号且突变信号都在同一个位置附近时才认定的确有突变信号, 即判断的确有入侵发生. 大量实验证明, 采用这一综合判决方法可以把误报率和漏报率降为单一小波分解方法的 1/3 以下, 系统经过长期室外不间断实验中

的误报率为 0~1 次/24 h.

## 4 结论

对于大多数信号来说, 低频部分往往是最重要的, 往往能够给出信号的特征. 而高频部分则与噪音及突变信号联系在一起. 本文提出了一种综合判决 (即四种小波分解中有两种或者两种以上能提取出明显的突变信号说明的确是有人入侵信号) 方法来降低  $\Phi$ -OTDR 系统的误报率. 实验证明, 四种小波分解对提取  $\Phi$ -OTDR 突变信号的最佳层数均为第五层; 小波分析在工程应用中一个十分重要的问题就是最优小波的选择问题, 这种综合判决方法可使系统在监测范围达到 12 km, 检测准确度达到 50 m 的基础上长期室外不间断实验中的误报率为 0~1 次/24 h, 具有很强的实用价值. 大量实验发现, 此方法主要适用于混有随机噪音的信号, 能显著降低误报率, 对于由于光源频率漂移引入噪音的信号效果不是很明显.

## 参考文献

- [1] GAO Jian-zhong, JIANG Zhuang-de, ZHAO Yu-long, *et al.* Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, **3** (11): 633-635.
- [2] SONG Mu-ping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (8): 1111-1114.  
宋牟平. 微波光电调制的布里渊散射分布式光纤传感技术 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1111-1114.
- [3] DONG Yu-ming, ZHANG Xu-ping, LU Yuan-gang, *et al.* Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 197-201.  
董玉明, 张旭平, 路元刚, 等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 197-201.
- [4] LU Yue-lan, ZHU Tao, CHEN Liang, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, **28**(22): 3243-3248.
- [5] LI Jian-zhong, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, *et al.* A distributed optical fiber perturbation sensor system base on combination of  $\Phi$ -OTDR and POTDR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1108-1112.  
李建中, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于  $\Phi$ -OTDR 和 POTDR 结合的分分布式光纤微扰传感系统 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1108-1112.
- [6] ZHANG Xiao-jian, ZHANG Guo-xuan, RUAN Hao. Distributed fiber optic sensor for oil pipeline leakage detection based on OTDR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2453-2456.  
张晓建, 张国轩, 阮昊. 基于光时域反射计的全分布式光纤漏油传感器 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2453-2456.
- [7] TAN Jing, CHEN Wei-min, ZHU Yong, *et al.* The monitoring system and the analysis of locating theory for pipeline leakage detection based on single distributed optical fiber sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 228-231.  
谭靖, 陈伟民, 朱永, 等. 单轴分布式光纤传感器管线泄漏探测方法及定位理论分析 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 228-231.

- [8] JUAREZ J C, MAIER E. W, CHOI K N, *et al.* Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, **23**(6): 2081-2087.
- [9] XIE Kong-li, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling. Distributed optical fiber sensing system based of rayleigh scattering light  $\varphi$ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):569-572.  
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的  $\varphi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):569-572.
- [10] LUO Jun, RAO Yun-jiang, YUE Jian-feng, *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检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(6):1123-1128.
- [11] COIFMAN P R, WICKERHAUSER M V. Entropy-based algorithms for best basis selection[J]. *IEEE Trans on Inf Theory*, 1992, **38**(2): 719-746.
- [12] PESQUET J C, KRIM H, CARFATAN H. Time-invariant orthonormal wavelet representations[J]. *IEEE Trans Sign Proc*, 1996, **44**(8): 1964-1970.
- [13] NASON G P, SILVERMAN B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications [M]. *Lecture Notes in Statistics*, 1995, 281-299.

## Low Misstatement Rate Distributed Optical Fiber Fence Intrusion Detection System by Variety of Wavelet Decomposition Method

WU Xiu-wei, WU Hui-juan, RAO Yun-jiang, WU Yu, ZHAO Tian

(Key Lab of Optical Fiber Sensing & Communications (Ministry of Education), University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Because the distributed fiber fence system based on the phase-sensitive optical time-domain reflectometer is very sensitive to its ambient environments, high false alarm rate is a quite normal phenomenon which is very annoying and difficult to avoid. In this paper, different wavelet decomposition methods are compared for extracting the singularity information buried in the noisy intrusion signals. A comprehensive judgment method is proposed which combines several different wavelet decomposition methods to reduce the system's false alarm rate. The experiment results show that different wavelet decomposition methods can extract different detail information at different levels, thus it can provide much more sufficient information and conditions for the decision-making process. The false alarm rate of the new method can be lowered to none or once per 24 hours, which is much lower than the other methods based on a single wavelet analysis way. It can efficiently improve the system's robustness and its decision's confidence level.

**Key words:** Optical fiber sensor; Phase-sensitive optical time-domain reflectometer ( $\Phi$ -OTDR); Wavelet decomposition; False alarm rate