

doi: 10.3788/gzxb20144304.0428001

# 基于时间序列奇异谱特征的 $\Phi$ -OTDR 扰动检测方法

李小玉, 吴慧娟, 彭正谱, 饶云江

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 611731)

**摘 要:** 相敏光时域反射系统异常灵敏, 对环境中的声波、空气流动及瞬时高频噪音等干扰源同时敏感, 环境干扰与入侵非线性混叠时, 实际入侵检测与识别困难, 容易频繁误报. 本文提出一种基于时间序列奇异谱特征的扰动检测方法, 对每个滑动时间窗内空间各点的纵向时间序列信号进行相空间重构, 对重构后的相空间状态矩阵进行奇异值分解得到信号能量的奇异谱分布, 然后将奇异谱特征向量输入后向传播神经网络进行扰动事件检测. 实验结果表明, 该方法能够有效排除声波及瞬时高频噪音等干扰信号的影响, 在微风等有干扰的环境下, 在 14 km 处正确检测率为 90%, 误警率低于 2%.

**关键词:** 相敏光时域反射计; 扰动检测; 纵向时间序列; 奇异谱分布; 前向反馈神经网络; 分布式光纤围栏; 误报率

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0428001-5

## A Novel Time Sequence Singular Spectrum Analysis Method for $\Phi$ -OTDR Disturbance Detection System

LI Xiao-yu, WU Hui-juan, PENG Zheng-pu, RAO Yun-jiang

(School of Communication & Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The phase-sensitive optical time-domain reflectometer system is sensitive to ambient environments such as sound waves, air flow and transient high-frequency noise. Thus the practical signal-to-noise-ratio is always low, the real intrusion signals are always severely obscured and difficult to be detected, as a consequence, false alarm occurs frequently. To solve the problem, a signal processing scheme using feed-forward neural network together with singular spectrum feature extraction algorithm was presented for disturbance detection. The main points of the method were mapping the sliding longitudinal time series to a sequence of multi-dimensional lagged vectors which form trajectory matrix and computing the singular value decomposition of the trajectory matrix. This method can effectively eliminate sound waves and transient high-frequency acoustic noise, etc. Performance results show that with breeze interference, the correct detection rate is 90% and false alarm rate is less than 2% at a range of 14 km.

**Key words:** Phase-sensitive OTDR; Disturbance detection; Longitudinal time series; Singular spectrum distribution; Feed-forward neural network; Distributed fiber-optic perimeter sensor; False alarm rate

**OCIS Codes:** 120.0120; 120.0280; 120.1880; 120.4825

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61290312)和中央高校基本科研业务费专项基金(No. ZYGX2011J010)资助

第一作者: 李小玉(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感信息提取与处理. Email: lxy\_2920@163.com

通讯作者: 吴慧娟(1980-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为传感信息获取与处理. Email: hjwu@uestc.edu.cn

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

收稿日期: 2013-06-17; 录用日期: 2013-09-03

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

相位敏感光时域反射仪(Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer,  $\Phi$ -OTDR)技术在提高信噪比,延长传感距离方面有很大的优势,但系统基于相位敏感机理,对周围环境的任何扰动,包括机械振动、声音信号、人为破坏等都能感知,极易引起频繁误报,影响系统的整体检测性能.同时探测光纤中相位、偏振态的随机变化引起干涉结果及探测光的相应变化,也可能被当作入侵者扰动引起的信号变化形成假信号,因此真实入侵检测是急需解决的重要问题.

目前对于相敏光时域反射系统信号处理研究仍主要针对某一时空分布信号的处理,如采用小波去噪<sup>[1]</sup>和短时傅里叶变换<sup>[2]</sup>等基于时频特性分析方法滤除光纤中偏振态随机变化引入的相位噪音和背景噪音等,在分组平均基础上的滑动平均和滑动差分<sup>[3]</sup>方法在实现滤除噪音的同时可以检测较高频率的振动等.文献[1-3]都是关于滤除系统噪音,提高信噪比的方法,但并未考虑周围环境如微风、声音、暴风雨等干扰源可能引起的误报.基于多个小波分解结果进行综合判决<sup>[4]</sup>以及 $\Phi$ -OTDR和偏振敏感光时域反射仪(Polarization-sensitive Optical Time Domain Reflectometer, P-OTDR)结合的分布式光纤微扰传感系统<sup>[5]</sup>可以在一定程度上降低系统误报率,但是仍是对空间分布信号进行分析. C. K. Madsen<sup>[6]</sup>等曾提到人为走动与车辆碾压信号分离与特征分析,但具体提取的特征与识别方法仍未涉及.分布式光纤围栏中常用的M-Z干涉仪系统采用了互相关技术<sup>[7-8]</sup>以及频谱特征<sup>[9]</sup>实现入侵检测定位.

本文提出一种基于时间序列奇异谱特征的分布式光纤围栏扰动检测方法.以空间各点的纵向时间序列信号作为处理对象,对每个滑动时间窗内的信号进行相空间重构,对重构后的相空间状态矩阵进行奇异值分解得到信号能量在状态空间中的分布情况,根据奇异谱理论,该分布可以作为 $\Phi$ -OTDR系统后向瑞利散射信号的特征参量.然后将奇异谱特征向量输入后向传播(Back Propagation, BP)神经网络进行识别,根据识别结果判断是否为真实扰动.实验结果表明,该方法能够有效排除声波、空气流动、瞬时噪音等干扰信号,在14 km处正确检测率为90%,误警率低于2%.

## 1 奇异谱特征提取法

1986年, Broomhead和King最先将奇异谱分析法引入非线性动力学领域<sup>[10]</sup>,此后, Vautar等<sup>[11]</sup>,将奇异谱分析方法引入到混沌序列的噪音滤除分析中. Shin<sup>[12]</sup>利用改进后的迭代奇异谱分析法对低维混沌序列进行去噪处理.目前,奇异谱分析方法在图像处理方

面的主要应用是去噪,在机械故障检测方面,可以利用奇异谱分布特征分析机械振动信号.

在物理意义上,相空间状态矩阵的奇异谱表示各个状态变量在非线性动力系统中所占能量的相对关系,奇异谱值的大小代表相对应的状态变量所占能量比.从信号处理角度来看,奇异谱分解可以把时间序列分解成一系列确定性成分例如信号的变化趋势、周期性的振荡和噪音等.对于 $\Phi$ -OTDR系统扰动信号来说,通过观察重构信号可以发现其相空间的奇异谱中,较大的奇异谱对应后向瑞利散射光的缓慢相位变化轨迹,较小的奇异谱对应快速的相位变化,奇异谱分布真实体现了不同类型振动信号的差异.因此,本文利用该点,通过奇异谱的分布规律判断不同的扰动类型,主要步骤为:

### 1.1 相空间重构

假设观测得到的时间序列为 $\{x_i\}$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $N$ 为序列长度,利用Takens嵌入定理的方法重构相空间矩阵 $\mathbf{X}$ .首先确定重构相空间列向量的维数 $L$ ,则构成相空间的矢量个数为 $K=N-L+1$ ,重构后的相空间矢量: $\mathbf{X}_i=(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+L-1})^T$ ,  $1 \leq i \leq K$ ,由相空间矢量得到状态矩阵为 $\mathbf{X}=[\mathbf{X}_1; \dots; \mathbf{X}_K]$ .式中, $L$ 值的选取对于奇异谱分析非常重要, $L$ 值的大小决定奇异谱分析方法的分辨率,随着 $L$ 值增大,可以把原始时间序列更精确地划分为一系列基本分量,具有更好的分离度,但计算量相对增大.

### 1.2 奇异值分解

任意 $m \times n$ 阶矩阵 $\mathbf{A}$ 的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)可表示为

$$\mathbf{A}=\mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T=\sum_{i=1}^p\mathbf{A}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_i=\sigma_i\mathbf{U}_i\mathbf{V}_i^T \quad (2)$$

式(1)中, $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别是 $m \times m$ 阶和 $n \times n$ 阶正交矩阵; $\mathbf{\Lambda}=\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p)$ 是对角矩阵, $\sigma_i$ 为矩阵 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的特征值的平方根;式(2)中, $\mathbf{A}_i$ 是相互独立的状态分量, $\mathbf{V}_i=\mathbf{A}^T\mathbf{U}_i/\sigma_i$ ,  $p=\min(m, n)$ .

式(1)、(2)是矩阵奇异值分解的数学定义,如果序列不含噪音或者是信噪比很高,则状态矩阵 $\mathbf{X}$ 是奇异的;反之 $\mathbf{X}$ 是非奇异的.在实际应用中,由于硬件因素和空气流动的影响, $\Phi$ -OTDR系统信号序列一定包含噪音,因此矩阵 $\mathbf{X}$ 为非奇异矩阵.对 $\mathbf{X}$ 进行奇异值分解,可以得到由大到小排列的 $m$ 个奇异值:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m, \quad m = \min(L, K).$$

记

$$S_i = \log(\lambda_i / \sum_{j=1}^m \lambda_j), \quad \text{则}$$

$S_i (i=0, 1, \dots, m)$ 为系统的奇异谱,它表示各个状态参量所占能量的比例.

## 2 构建 BP 神经网络

BP 神经网络是人工神经网络中最重要的网络模型之一,一般由输入层、隐含层、输出层组成,每层由许多具有非线性映射能力的神经元(节点)组成.输入层节点数由特征向量维数决定,输出层节点数由扰动类型模式数目决定,隐含层的节点数目不定,但数目越多神经网络的非线性越显著,从而神经网络更稳健<sup>[13]</sup>.

BP 学习算法由信号的正向传播和误差的反向传播组成,正向传播中,输入信号从输入层经隐含层传向输出层,若输出层得到了期望的输出,学习算法结束;否则转至反向传播,反向传播是将误差信号(样本输出与网络输出之差)以某种形式通过隐含层向输入层逐层反传,采用梯度下降 BP 训练函数调整各层神经元的权值与阈值减小误差,以使网络的输出不断地接近期望的输出.本文选择 BP 神经网络识别方法,首先进行网络训练,网络训练的的目的是使神经网络在外界输入训练样本的刺激下不断改变网络本身的连接权值和阈值达到网络性能最优化,训练结束后,保存相应 BP 网络参量进行测试,最后将检验样本特征矢量输入训练好的神经网络可以对其进行自动分类和识别.

## 3 实验装置

相位敏感光时域反射系统基本原理<sup>[14]</sup>与传统光时域反射计一样,将一系列光脉冲注入探测光纤中,用光探测器探测后向瑞利散射光.不同的是相位敏感光时域反射系统是相干检测,要求注入光纤中的光是高度相干的,当光纤线路上由于入侵而发生扰动时,由于弹光效应,光纤相应位置的折射率将发生变化,这将导致该处光相位发生变化,由于干涉作用,相位的变化将引起后向散射光光强发生变化.

实验装置如图 1,从窄线宽分布式反馈激光器发出的 1 550 nm 的连续光经过声光调制器调制为 1 kHz 占空比 0.02% 的脉冲光,脉冲光被掺铒光纤放大器放大,经过隔离器防止反射光过强损坏激光器,通过环形器 1、2 端口进入传感光纤,从传感光纤中向后传播的

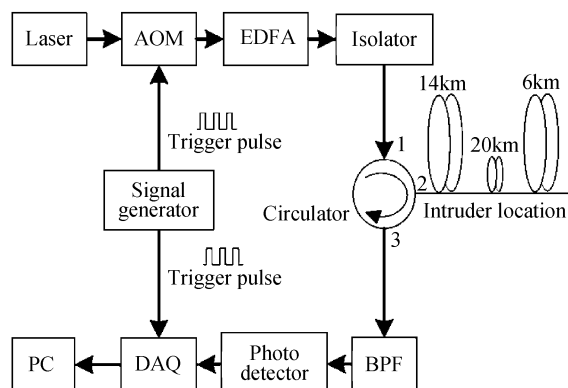


图 1  $\Phi$ -OTDR 系统结构

Fig. 1 Structure diagram of  $\Phi$ -OTDR system

后向瑞利散射光经过滤波器滤除噪音,滤波后经环形器 2、3 端口送入光电探测器,50 MS/s 的数据采集卡同步采集电信号.实验以 14 km 附近 20 m 的普通单模裸纤为测试段,为了进一步验证本文方法,又采用纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)封装的光缆替换裸纤重复进行实验,FRP 封装的光缆拥有比普通通信光缆高得多的应力敏感性<sup>[15]</sup>.

## 4 实验结果与分析

由于扰动源不同,各种扰动信号表现出不同特征.机械振动、声音信号、人为破坏等信号在频率特征、能量分布等方面都各有特点.实验以无扰动信号、人为扰动信号和声音信号为例进行奇异谱特征提取.

### 4.1 累积纵向时间信号

设采集的原始纵向沿光缆分布信号序列  $X_k = \{x_i, i=1, 2, \dots, N\}_k (k=1, 2, \dots)$ ,  $k$  表示光脉冲序号,  $i$  表示采样点序号,采样点数为  $N$ ,  $X_k$  表示  $k$  时刻或第  $k$  个光脉冲周期内接收到的后向瑞利散射光沿光纤线路的光强分布情况.对信号序列  $X_k, (k=1, 2, \Delta)$  进行滑动时间片划分或分组,即相邻多个光脉冲发射周期作为一个时间片,得到每个滑动时间窗内空间上各点的纵向时间序列信号,如图 2.滑动窗口长度  $WinLen$  与滑动窗口时间  $T_{win}$  的关系为:  $T_{win} = WinLen \cdot AverTimes / f_m$ , 其中,  $f_m$  是脉冲光频率,  $AverTimes$  是系统硬累加次数.本文实验中  $f_m = 1000$ ,  $AverTimes = 10$ ,  $WinLen = 200$  则一个滑动窗口时间  $T_{win}$  为 2s.

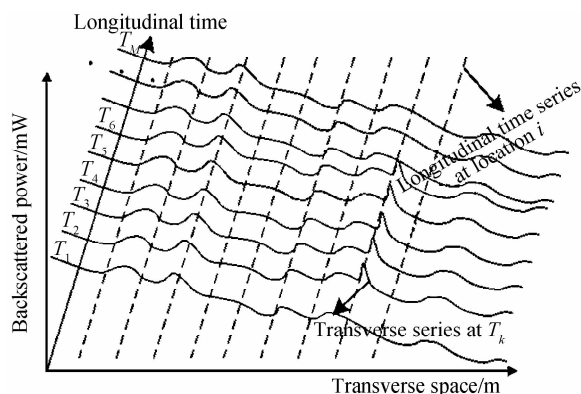


图 2 空间和时间信号关系图

Fig. 2 Space-time diagram

### 4.2 奇异谱特征提取结果

对无扰动信号、人为扰动信号、声音信号,分别选取了 35 个滑动时间窗内信号进行分析,经过反复试验发现,状态矩阵维数只要满足  $L \geq 3$  均可有效识别这三种信号,图 3~5 分别给出  $L=3$  时所得到的奇异谱  $S(\lambda_i), (\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3)$  分布图.

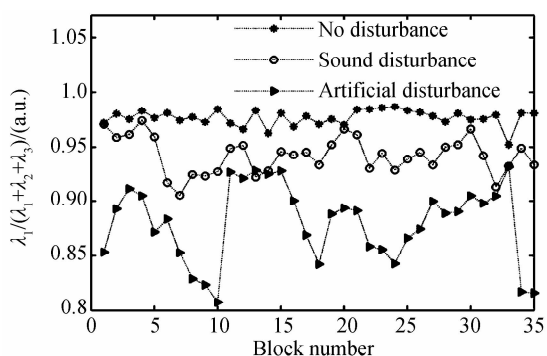


图3 无扰信号、声音扰动信号、人为扰动信号的奇异谱特征参量  $1S(\lambda_1)$  随时间变化特征

Fig. 3 The first singular spectrum parameter  $S(\lambda_1)$  of the undisturbed signal, artificial signal and sound signal

由图3可以看出,无扰动信号有95%的信号能量分布在最大奇异值  $\lambda_1$  所对应的状态分量上,相对地人为扰动信号明显低于95%,而声音扰动信号介于两者之间。

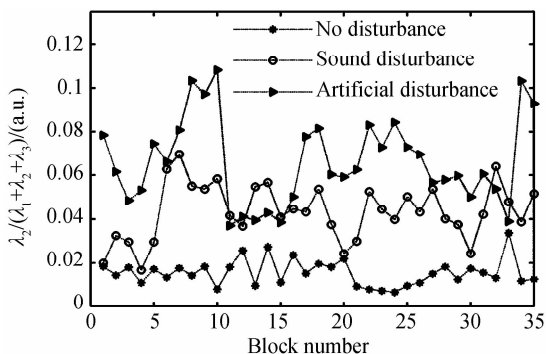


图4 无扰信号、声音扰动信号、人为扰动信号的奇异谱特征参量  $2S(\lambda_2)$  随时间变化特征

Fig. 4 The second singular spectrum parameter  $S(\lambda_2)$  of the undisturbed signal, artificial signal and sound signal

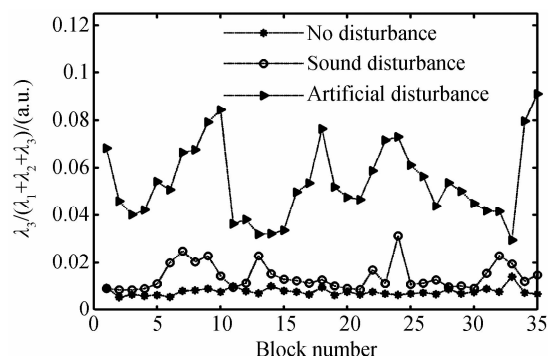


图5 无扰信号、声音扰动信号、人为扰动信号的奇异谱特征参量  $3S(\lambda_3)$  随时间变化特征

Fig. 5 The third singular spectrum parameter  $S(\lambda_3)$  of the undisturbed signal, artificial signal and sound signal

由图3~5可知,起伏波动的背景噪音通常为缓慢变化信号,无扰信号中缓变信号成分较多,主要分布于  $\lambda_1$  对应的振动分量中;声波及空气流动等类型的时变干扰信号主要分布于  $\lambda_2$  对应的振动分量中;而真实扰动信号主要分布于  $\lambda_2, \lambda_3$  对应的振动分量中。

用FRP封装光缆代替测试段裸纤重复实验过程,每种扰动类型分别选取20个滑动时间窗内信号进行分析,实验结果与分析相吻合,如图6,进一步证明了本文提出的扰动检测方法在实用系统中的有效性。

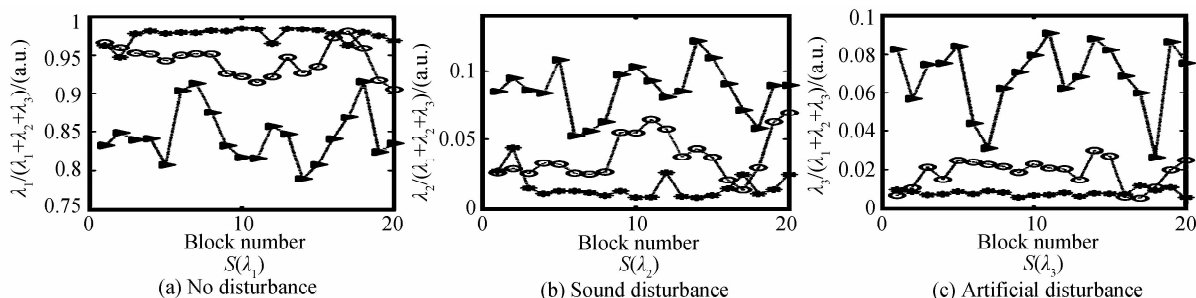


图6 14 Km处FRP封装光缆上无扰信号、声音扰动信号、人为扰动信号的奇异谱特征参量随时间变化特征

Fig. 6 The singular spectrum parameter of the undisturbed signal, artificial signal and sound signal at range of 14 km based on FRP encapsulated fiber cable

### 4.3 扰动检测结果

实验中以裸纤和纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)封装传感光缆分别作为测试段进行实验,因此数据集中包含两个大的部分,每部分数据集又包括三种类型,分别是无扰动事件A、人为扰动事件B和声音扰动事件C,将这些数据集分为2组,每组各165个样本,每组中每种扰动事件各有55个样本(包括35

个裸纤实验样本和20个FRP封装传感光缆实验样本),其中一组作为训练样本,另外一组作为检验样本.使用这些数据训练一个3输入(奇异谱分布特征矢量),2输出(三种扰动类型作两位编码处理)的前向反馈网络,经过反复训练,得到网络各层神经元权值和阈值参量.表1为检验样本的识别结果.  $P_r$  为每种事件正确识别率,  $P_d$  表示系统检测率,  $P_f$  为系统误警率. 将

声音信号和无扰动信号都作为虚假信号,其中  $P_d = P_{B/B} \cdot P_f = \frac{(P_{B/A} \cdot N_A + P_{B/C} \cdot N_C)}{(N_A + N_C)}$ ,  $P_{I/J}$  表示将事件  $J$  识别为事件  $I$  的概率,  $N_I$  为事件  $I$  样本数. 计算结果显示检测率高于 90%, 误警率低于 2%.

**表 1  $\Phi$ -OTDR 系统几种扰动事件检测结果**  
**Table 1 The performance on disturbed events detection of  $\Phi$ -OTDR system**

	A	B	C	$P_r$	$P_d$	$P_f$
A	53	1	1	96.36%		
B	3	50	2	90.91%	90.91%	1.82%
C	2	1	52	94.55%		

## 5 结论

基于时间序列奇异谱特征分析提出了一种  $\Phi$ -OTDR 扰动检测方法. 由于相空间奇异谱特征能够准确反映不同类型扰动信号中振动分量特点, 因此可以有效区别声音等干扰信号和人为扰动信号, 降低系统误警率, 提高高灵敏  $\Phi$ -OTDR 系统在实际复杂环境下的检测性能, 进一步推动了  $\Phi$ -OTDR 分布式光纤围栏扰动检测系统在长距离周界、长输油气管道、大型结构等安全监测方面的重要应用.

### 参考文献

[1] QIN Z G, CHEN L, BAO X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(7): 542-544.

[2] WU H J, WANG J, WU X W, et al. Real intrusion detection for distributed fiber fence in practical strong fluctuated noisy backgrounds [J]. *Sensor Letters*, 2012, **10**(7): 1557-1561.

[3] LU Y L, ZHU T, CHEN L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(22): 3243-3248.

[4] WU Xiu-wei, WU Hui-juan, RAO Yun-jiang, et al. Low misstatement rate distributed optical fiber fence intrusion detection system by variety of wavelet decomposition method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1692-1696.

吴麻伟, 吴慧娟, 饶云江, 吴宇, 等. 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 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1692-1696.

[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): 1108-1113.

李建中, 饶云江, 冉曾令等. 基于  $\Phi$ -OTDR 和 POTDR 结合的

分布式光纤微扰传感系统 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1108-1113.

[6] Madsen C K, BAE T, Atkins R A. Long fiber-optic perimeter sensor; signature analysis [C]. In: Proc. of Conference on Laser and Electro-Optics, 2007, IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics: 1

[7] YANG Bo, YANG Yi-fei, ZHANG Jian, et al. A fiber fence system based on M-Z interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1013-1017.

刘波, 杨亦飞, 张键, 等. 基于 M-Z 干涉的光纤围栏系统实验研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1013-1017.

[8] SHAN Chao, FANG Nian, WANG Lu-tang, et al. Chaotic fiber fence system and intrusion location method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 335-339.

单超, 方捻, 王陆唐, 等. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 335-339.

[9] ZHOU Yan, JIN Shi-jiu, ZHANG Yun-chao, et al. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(8): 935-938.

周琰, 靳世久, 张昀超, 等. 管道泄漏检测分布式光纤传感技术研究 [J]. *光电子 · 激光*, 2005, **16**(8): 935-938.

[10] BROOMBEAD D S, KING G P. Extracting qualitative dynamics from experimental data [J]. *Physica D*, 1986, **20**: 217-236.

[11] VAUTARD R, YIOU P, GHIL M. Singular-spectrum analysis: a toolkit for short, noisy chaotic signals [J]. *Physica D*, 1992, **58**: 95-126.

[12] SHIN K, HAMMOND J K, WHITE P R. Iterative SVD method for noise reduction of low-dimensional chaotic time series [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1999, **13**(1): 115-124.

[13] ZEIDENBERG Matthew. Neural networks in artificial intelligence [M]. Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1990.

[14] XIE Kong-li, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling. Distributed optical fiber sensing system based of rayleigh scattering light  $\Phi$ -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  $\Phi$ -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.

[15] 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监测系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(6): 1123-1128.