

基于光纤传感的入侵检测信号提取与识别算法

付雅丹, 杨 庚

(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 基于分布式光纤传感的地理式入侵检测系统由于其无源、传输距离远、抗电磁干扰等特征, 引起了人们的关注, 并得到初步应用。系统中光纤传感信息的正确提取和事件识别是系统的关键性指标之一。文中提出了一种入侵信号的提取与识别算法。使用基于 Hilbert 变换的信号包络线提取, 结合数学形态学上的腐蚀和膨胀运算思想, 实现入侵信号片段的分割; 采用小波阈值收缩方法, 结合平移时不变算法实现入侵信号片段降噪; 使用基于“小波包-能量”的方法提取信号特征; 分别采用基于 BP 和 RBF 的人工神经网络实现对光纤信号分类。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 分布式光纤入侵检测系统; 小波降噪; 平移时不变算法; 人工神经网络

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)06-0161-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.06.040

An Algorithm of Intrusion Detection Signal Extraction and Classification Based on Fiber Signal

FU Ya-dan, YANG Geng

(College of Computer Science, Nanjing University of Posts & Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: The perimeter intrusion detection system based on distributed fiber sensing has paid more attention to people, and gets preliminary application with its passive, long transmission distance, resistance to electromagnetic interference and so on. The correct extraction and events recognition of optical fiber sensing information is one of the key indicators. In this paper, an intrusion signal extraction and identification algorithm is proposed. Extract intrusion fiber optical signal by using signal envelope extraction based on Hilbert transformation, which is combined with erosion and expansion operation in mathematical morphology. Denoise signal by using wavelet shrinkage and translation-invariant algorithm. Extract features of intrusion signal based on "wavelet packet-energy" signal feature extraction strategy. Classify the intrusion signal by using ANN based on BP and RBF separately. The simulation results shows the effectiveness of this algorithm.

Key words: distributed fiber optical perimeter intrusion detection system; wavelet denoising; translation-invariant algorithm; ANN

0 引言

地理式分布式光纤入侵检测系统, 又称为宽域全光纤安防预警系统, 是一种基于光纤传感器的新型分布式安全防范系统。基于光纤传感器的安防系统具有无源、传输距离远、本质安全、抗电磁干扰和耐高温高压等恶劣环境的特点^[1-2], 很适合应用于长距离油气管道防盗防损检测, 山坡、水坝、机场等异常场景的检测等场景中, 因而近年来, 基于光纤的分布式入侵检测系统的开发和研究成为全球众多企业和研究机构的研

究热点。系统能在不影响灵敏度的情况下区分入侵和正常事件是其一项关键性的性能指标。而入侵事件和正常事件在信号表示上相似, 因此需要用到模式识别的方法对信号进行区分。

目前, 欧美、澳大利亚等发达国家在这个领域的研究开始得比较早, 相应地已经研发出一系列的基于光纤传感的入侵信号识别算法。Vires 提出了基于信号频域的特征值提取算法^[3], 同时结合人工神经网络对信号进行分类, 进而实现周界入侵预警系统。但是仅

收稿日期: 2013-08-07

修回日期: 2013-11-12

网络出版时间: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272084); 江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA520002); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20113223110003, 20093223120001)

作者简介: 付雅丹(1992-), 女, 硕士研究生, CCF 会员, 研究方向为信息安全、传感网技术; 杨 庚, 博士, 教授, 研究方向为网络安全、分布与并行计算、传感器网络和移动计算等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140224.0902.019.html>

仅从频域上提取特征值用来对信号进行分类有些不够有说服力。Min 等人采用非线性规模滤波器组的方法、倒频谱平均消去法以及由高斯混合模型和多层感知器结合起来实现的分类器对信号进行频域上的特征值的提取^[4],从而实现基于埋入式汽油管道的入侵事件的实时监测系统。Seedahmed 等在文献[5]中提出了一套鲁棒性较高的光纤入侵信号识别方法。该方法从信号的时域特征中提取出了一部分能够唯一标识信号类型的特征作为信号的特征向量,并把这些特征向量输入人工神经网络进行训练和判别。Seedahmed 等在文献[6]中提出了一种区分大降雨事件和其他入侵事件的方法。

在国内,相关的研究才开始。Jiang 等人在文献[7]中提出了一种基于马赫曾德干涉技术的光纤传感器的信号识别算法。其中使用小波包变换对信号进行除噪和特征值的提取,使用神经网络作为入侵事件的分类器;文献[8]提出了一种利用小波分析的方法对信号进行除噪和分割;文献[9]提出了一种分析信号特征向量的方法;文献[10]提出了基于小波包变换-能量谱的特征提取算法,都取得了较好的效果。

文中提出了新的光纤入侵信号的提取和识别算法。算法使用了 Hilbert 变换并结合数学形态上的腐蚀和膨胀运算思想对信号进行入侵信号的预分割,采用数字 FIR 滤波器和小波阈值收缩与平移不变算法相结合的除噪方法进行信号的滤波和除噪。然后使用小波包分析算法对信号进行特征提取,最后分别使用了基于 BP 人工神经网络和基于径向基的神经网络作为分类器对信号进行分类。

1 基础理论

1.1 小波阈值收缩

小波阈值收缩法(Wavelet Shrinkage)是专门用于处理信号中的高斯白噪声的一种除噪算法^[11]。其理论依据是由于小波变换具有很强的去数据相关性,能够使信号的能量在小波域内集中在一些大的小波系数中,而噪声的能量则分布在整个小波域内,得到较小的小波系数。于是,就存在一个阈值,使得噪声的小波系数都要小于这个阈值。这样,可以通过设置此阈值,将噪声的小波系数除掉,最后再将干净的小波系数进行小波重构,从而得到去除噪声后干净的信号片段^[12]。

已经证明,基于离散小波变换的阈值收缩法由于在均方误差意义上得到原始信号的近似最优估计,因此在信号除噪上取得了良好的效果。然而,本身也存在一些缺陷。由于经阈值处理后的估计小波系数在阈值处是不连续的,这可能会使重构的信号产生振荡。因此对于快速变化的信号用基于离散小波分析的阈值

收缩法除噪时,在信号的奇异点附近产生伪吉布斯(Pseudo Gibbs)振荡。

平稳小波变换是一种非正交的小波变换,其中用到的滤波器是对离散小波滤波器进行插值补零操作得到的。G. P. Nason 和 B. W. Silverman 在文献[13]中指出平稳小波变换(Stationary Wavelet Transform)在除噪方面很好地抑制了伪 Gibbs 现象,优于离散小波分析的性能。

1.2 人工神经网络

文中提出分别使用 BP 和 RBF 人工神经网络作为分类器实现信号的分类。

BP 网络是一种多层前馈神经网络,广泛应用于函数逼近、模式识别、数据压缩等。BP 网络由三层构成:输入层、单隐层和输出层。从输入层到隐含层和隐含层到输出层的转移函数均采用 log-sigmoid 函数 $S(x)$: $S(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 。

RBF 神经网络与 BP 人工神经网络的模型结构相类似,它同样由输入层、隐含层和输出层三层构成。输入层的节点所起的作用只是将输入数据 x_1, x_2, \dots, x_n 传递到隐含层的节点上,隐层节点由高斯函数构成,隐层到输出层是简单的线性关系。与传统 BP 网络相比,RBF 神经网络结构更加简单,学习的速度也更快,同时还克服了 BP 网络对初始值和网络结构敏感且易陷入局部极小点等缺陷^[14]。

2 光纤入侵信号的提取与识别算法

本节针对光纤信号的特点提出了一套入侵信号的提取与识别算法,其算法流程如图 1 所示。从图 1 中可以看出该算法按照流程顺序可以分为入侵信号分割、除噪、特征提取以及分类四个部分。算法对应的实际流程图如图 2 所示。光纤入侵信号提取算法采用基于 Hilbert 变换的信号包络线提取方法,结合数学形态学上的腐蚀和膨胀运算,得到准确分割的入侵信号振动片段;采用基于平稳小波分析的软阈值收缩除噪法,结合平移时不变算法对入侵信号进行除噪。光纤入侵信号识别算法使用基于小波包能量的信号特征提取方法,采用“小波包-能量”策略选取信号的特征空间,最后分别使用了基于 BP 和 RBF 人工神经网络实现对入侵信号的分类。

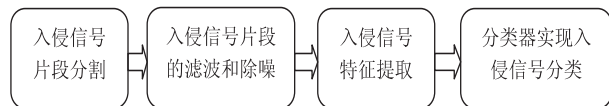


图 1 光纤入侵信号的提取与识别算法流程图

2.1 入侵信号片段分割

由于实际应用中各种入侵事件的发生只会集中在某个时间段内,或者单独发生,或者交替出现,但不会

持续不断的一直出现。因此,为了更好地识别入侵事件所属的类别,防止信号在识别上的处理延迟积累,必须分割出独立的入侵信号片段进行分析,对每一段入侵信号片段识别其入侵类型。

由于破坏性行为造成的入侵信号与背景噪声信号在信号的包络线上有所不同,于是,使用基于 Hilbert 变换的信号包络线提取,同时结合图形处理中的数学形态学的腐蚀运算和膨胀运算思想,基于窗口能量阈值的方法分割收集上来的信号,这样可以在保持较好的分割效果的同时,尽量保持参数对环境的自适应性。综上,可以得到入侵信号预分割的具体算法流程,如图 2 中的左半部分的虚线方框所示。从图中可以看出信号的预分割过程仅需要一个傅里叶变换和逆傅里叶变换,前者用于设计基于频域滤波的滤波器,后者用于求出信号的解析信号。因此入侵信号片段的分割的时间复杂度为 $O(N \log_2 N)$ 。使用设计的算法对信号进行预分割,其结果如图 3 所示。左上角的图表示的是原始信号,右上角为原始信号的 Hilbert 变换后的结果表示,左下角为使用原始信号的 Hilbert 变换抑制原始信号后的信号波形,类似于做了数学形态上的腐蚀运算,右下角为最终分割结果,其中虚线围住的区域为分割出来的入侵信号片段。

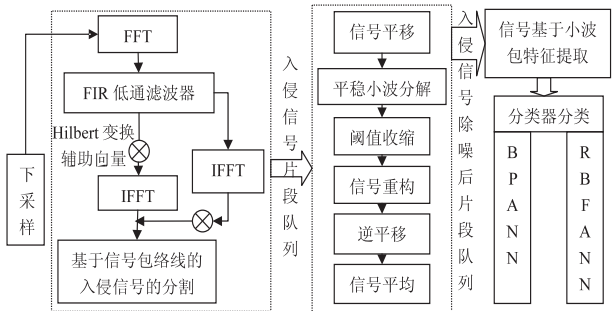


图 2 光纤入侵信号的提取与识别算法

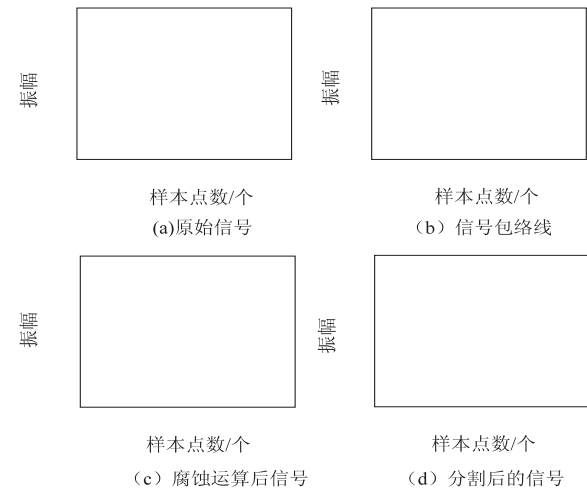


图 3 入侵信号分割示意图

2.2 入侵信号片段除噪

信号的背景噪声主要包括大量的高频噪声、交流

电频率噪声、高斯白噪声以及未知模型的非白噪声。文中下面提到的信号除噪是基于滤波器滤波后的信号除噪。尽管基于平稳小波变换的阈值收缩方法能较有效地抑制离散小波分析算法中在信号奇异点产生的伪 Gibbs 现象。因此,本节提出采用小波阈值收缩法与平移时不变算法思想相结合的除噪方法对光纤信号进行除噪,具体流程如图 2 中部的虚线方框所示。

平移不变去噪 (Translation-Invariant) 是指对给定的信号在一定平移范围内做循环平移,从而获得一个在时域上与给定信号具有一定差值的新信号,对这个新信号进行去噪处理,再将去噪后的新信号作相反的循环平移,从而得到与给定信号同相位的去噪信号。然后改变平移量,重复这一过程,对所获结果求平均值。基于平稳小波阈值法的平移不变信号去噪方法具体流程描述如下:

- (1) 对带噪声的入侵信号 x_i 在一定平移范围内作平移,得到一个新信号 x_i' ;
- (2) 对这个新信号 x_i' 进行平稳小波分析,得到各尺度上的小波分解系数 $d_{j,k}$;
- (3) 使用该尺度下平稳小波分解系数 $d_{j,k}$ 估计噪声信号的均方差 σ_j ;
- (4) 使用软阈值的方法处理平稳小波变换分解系数 $d_{j,k}$,得到小波系数的估计值 $d_{j,k}'$;
- (5) 用小波系数的估计值 $d_{j,k}'$ 做逆平稳小波变换,重构后得到去噪后的信号 x_i' ;
- (6) 对该去噪后的信号 x_i' 作相反的平移,从而得到与给定信号相同相位的去噪信号;
- (7) 改变平移量,重复 1 ~ 6 的过程,得到一系列去噪后的信号;
- (8) 对所获得的所有去噪后的信号求均值,最终得到去噪后的信号。

2.3 入侵信号特征提取

对光纤信号而言,正确提取信号特征并从中选出能唯一确定信号类型的特征值组成特征向量对于信号模式分类的有效性具有确定性的影响。文献[10]中提出采用信号的 4 层小波包变换得到的各小波成分的总能量作为信号的特征向量(16 维向量)。由于 16 维的特征向量维数作为分类器的输入过于庞大,因此,需要简化信号特征向量的维数。

设信号的采样频率为 $2f$, 若对信号进行 j 层小波包分解,则可形成 2^j 个等宽频带,每个区间频宽为 $f/2^j$ 。小波包分解后,得到 j 层小波包系数 $C_{j,k}^m$, $k=0,1,\dots,2^j-1$,其中 m 为小波包空间位置的标识。小波包分析算法和傅里叶频谱分析方法一样,小波的频带分析技术也是满足 Parseval 能量积分等式的。信号 $x(t)$ 在

时域上的能量为 $\|x(t)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$, 该公式与信号 $x(t)$ 的小波变换系数 $C_{j,k}$ 由 Parseval 能量积分等式关联起来, 得到如下公式: $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \sum_k |C_{j,k}|^2$, 由此, 小波变换的系数 $C_{j,k}$ 具有能量量纲, 可以用于信号的频带能量分析。

通过上面的分析, 使用选取的信号小波包能量作为入侵信号片的特征参数, 于是, 基于小波包分析的特征向量的选取步骤如下:

(1) 对分割出来且已经除噪处理的入侵信号片段进行 j 层小波包分解;

(2) 选择 n 个对信号能量最为敏感的频带, 求出各频带的能量, 并对其进行归一化处理, 则:

$$TE_{j,k} = \sum_m |C_{j,k}^m|, TE' = \frac{TE_{j,k}}{\sum_i TE_{j,k}}, i \in \{n \text{ 个能量敏}$$

感频带构成的集合}

(3) 将上述归一化后的能量作为振动信号特征向量, 将其作为后续分类器的输入。

通过上面的分析, 结合实验中的实际数据, 由于从光纤传感器中采集起来的信号的频率集中在 100 kHz 以内, 因此对信号采用 4 层小波包分解的方法, 选取第四层的前 10 个对信号能量最为敏感的频带, 求出各频带的能量, 并对能量进行归一化处理, 最后得到能作为后续分类器输入的十维归一化特征向量。

2.4 分类器的设计与实现

在特征值空间已经确定的前提下, 分类器设计问题就是一个选择什么准则、使用什么方法, 将已确定的特征空间划分成决策域的问题。神经网络具有信息的分布存储、并行处理以及自学习能力等优点, 可以实现非线性映射过程, 并且具有大规模计算能力。要对光纤信号进行分类和识别, 就必须选择一组样本进行训练, 以及输入未知样本进行识别。本节使用了基于 BP 和基于 RBF 的人工神经网络作为信号的分类器, 实现了光纤信号的分类。

实验中 BP 网络的结构为: 输入层 10 个神经元, 单隐层 16 个神经元, 输出层 1 个神经元, 从输入层到隐含层和从隐含层到输出层的转移函数均采用 log-sigmoid 函数, 采用 Levenberg-Marquardt Optimization 算法使用 10 组样本数据对 BP 网络进行训练。在 RBF 神经网络中, 采用输入层 10 个神经元, 输出层 1 个神经元, 采用扩展因子 1.5 构建网络, 同时采用 10 组样本数据对网络进行训练。最后使用 10 组测试数据(与样本不同的数据)对训练好的两个网络进行测试。

结果如图 4 所示, 从图中可以看出 BP 神经网络在编号为 5, 6, 10 的样本处出现了错误, 其分类的正确率

为 $\varphi = (7/10) \cdot 100\% = 70\%$, 系统性能在能接受的误差范围内。从 RBF 神经网络对 10 组测试信号的识别结果来看, 总体上误差不大, 均在 0 和 1 周围小幅度的变化。鉴于样本库中只建立了一种入侵事件, 即人员行动的样本, 因此, 使用 RBF 神经网络基本上对识别人员行动和非人员行动事件的正确率能达到 100%。笔者使用的个人电脑配置为 CPU 双核, 2 G 内存, 在这样的计算机环境下, BP 神经网络的学习用时为 3.123 s, 使用 10 组测试数据识别人员走动入侵事件总共耗时为 0.114 s。而 RBF 神经网络的学习用时为 0.879 0 s, 使用 10 组测试数据总共仅耗时为 0.074 5 s。可以看出网络的实时性较好, 正确率高, 可以用于实际工程中的人员走动入侵事件的实时识别。

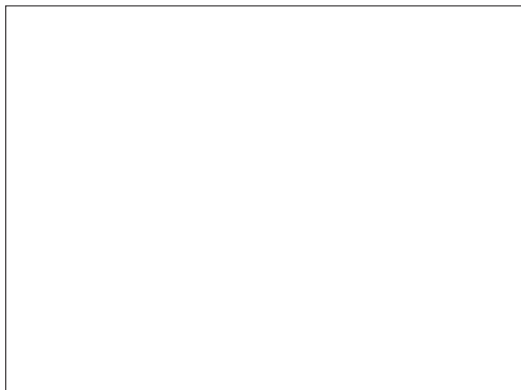


图 4 基于 BP 与 RBF 神经网络的人员走动识别结果

3 结束语

由于破坏性行为造成的入侵信号与背景噪声信号在信号的包络线上有所不同, 且不同类型的入侵信号的能量分布不同, 因此文中提出的光纤信号的提取算法和智能感知模型行之有效。通过基于 Hilbert 变换的信号包络线提取, 结合数学形态学上的腐蚀与膨胀运算思想从光纤信号中分割出入侵信号片段, 在对入侵信号的预分割上取得了很好的效果, 且时间复杂度也不高; 同时使用基于平稳小波的软阈值收缩方法, 结合平移时不变算法对入侵信号片段除噪, 能够得到更干净的信号片段。入侵信号片段的分割和除噪相结合, 最终实现光纤信号的提取算法。使用“小波包-能量”的方法提取信号特征, 使用基于 BP 和径向基的人工神经网络作为光纤信号分类器对信号进行分类, 从模型结构(特别是隐层神经元数目以及输入层到隐层、隐层到输出层的映射函数不同)、训练效率、分类效率以及分类精确度角度比较了两者, 实现了对系统智能感知的研究。

在不同应用环境下, 振动信号的类型与特征都有

较大差异,而且新的破坏事件也会不断涌现。因此文中的分类器无论选择是基于BP还是基于RBF的人工神经网络都没有办法使用样本库以外的信号学习、训练,这个限制抑制了系统的应用区域,因此,需要在进一步的研究中为系统的分类器建立增量学习机制,即将预警信号的校验结果反馈给环境感知机制,自动监督训练信号分类器与事件分析参数。同时由于文中研究得到入侵事件信号的种类有限,在使用人工神经网络中,只建立了人员行动这一入侵事件的样本库,所以现今的系统还只能识别人员行动这一入侵事件。在后续研究中,需要进一步扩展人工神经网络的样本库,使得信号分类能做到更精细和更准确。

参考文献:

[1] Kersey A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology[J]. Optical Fiber Technology,1996,2(3):291-317.

[2] Katsifolis J, McIntosh L. Apparatus and method for using a counter-propagating signal method for locating events;U. S. , 7499177[P]. 2009.

[3] de Vries J. A low cost fence impact classification system with neural networks[C]//Proceedings of 7th AFRICON conference in Africa. Gaborone:[s. n.],2004:131-136.

[4] Min Hwang-Ki, Lee Chung-Yeo, Lee Jong-Seok, et al. Abnormal signal detection in gas pipes using neural networks [C]//Proceeding of 33rd annual conference of the IEEE industrial electronics society. Taipei:IEEE,2007:2503-2508.

[5] Mahmoud S S, Katsifolis J. Robust event classification for a fiber optic perimeter intrusion detection system using level

crossing features and artificial neural networks [C]//Proc of SPIE. [s. l.]:[s. n.],2010.

[6] 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.

[7] Jiang Lihui, Liu Xiangming, Zhang Feng. Multi-target recognition used in airport fiber fence warning system[C]//Proceedings of 2010 international conference on machine learning and cybernetics. Qingdao:[s. n.],2010:1126-1129.

[8] 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):45-49.

[9] 陶沛琳,延凤平,刘鹏,等. 基于Mach-Zehnder干涉仪的光纤入侵行为识别系统[J]. 量子电子学报,2011,28(2):183-190.

[10] 赵杰,丁吉,万遂人,等. 全光纤安防系统模式识别混合编程的实现[J]. 东南大学学报(自然科学版),2011,41(1):41-46.

[11] 王立. 基于分布式光纤传感的智能环境感知技术研究[D]. 天津:南开大学,2008.

[12] Cho D, Bui T D, Chen G. Image denoising based on wavelet shrinkage using neighbor and level dependency[J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing,2009,7(3):299-311.

[13] Nason G P, Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications[M]//Wavelets and Statistics. New York:Springer,1995.

[14] 飞思科技产品研发中心. 人工神经网络理论与MATLAB实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

(上接第160页)

会成为一个越来越重要的研究方向。

参考文献:

[1] Wireless Application Protocol Forum, Ltd. WAP 无线应用协议[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[2] 张慧媛,李晓峰,杨放春. 移动互联网与WAP技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

[3] 胡晓军. WAP网关的研究与实现[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[4] 吴冬梅. WAP中的安全构架模型研究[J]. 电力系统通信,2004(6):50-52.

[5] Wireless Application Protocol Forum, Ltd. Wireless identity module specification[EB/OL]. 2006. <http://technical.openmobilealliance.org/Technical/wapindex.aspx>.

[6] Davies J. Implementing SSL/TLS using cryptography and PKI [M]. USA:Wiley,2011.

[7] 袁志锋,刘广东,朱琦. 基于WTLS的WAP安全实现研究[J]. 信息技术,2004,28(12):62-64.

[8] 赵晓枫. 精通WAP/WML[M]. 北京:科学出版社,2001.

[9] 马建锋,朱建明. 无线局域网安全-方法与技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.


[10] 王建兵. PKI数字证书在WEB系统中的安全应用[J]. 国土资源信息化,2005(1):40-44.

[11] Sun Hung-Min. Cryptanalysis of Aydosetal's ECC-based wireless authentication protocol[C]//Proceedings of the 2004 IEEE international conference on e-technology, e-commerce and e-commerce and e-service. [s. l.]:IEEE Computer Society,2004.

[12] 徐晓宁. WPKI关键技术的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.

[13] 王保明. 证书认证系统设计与实现[D]. 济南:山东大学,2009.

基于光纤传感的入侵检测信号提取与识别算法

作者: [付雅丹](#), [杨庚](#), [FU Ya-dan](#), [YANG Geng](#)
作者单位: [南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京, 210003](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014(6)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201406040.aspx