

doi:10.3788/gzxb20154401.0106004

相位敏感光时域反射计识别入侵事件算法

郑印¹, 段发阶¹, 涂勤昌², 韦波²

(1 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2 浙江中欣动力测控技术有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要:在相位敏感光时域反射计识别入侵事件中,基于传统算法研究了时间域单点振动判断、空间域相邻点振动判断、特征量峰值比例判断相互结合的算法,并从算法的识别准确率、实时性、复杂性、定位稳定性等角度,衡量算法的优劣.实验验证发现,时间域单点振动判断、空间域相邻点振动判断结合的算法识别入侵事件准确率最高,达100%,且实时性满足性能要求,算法简单,定位稳定性好.该算法在不同频率下振动事件中适用性较强,可为相位敏感光时域反射计应用于安防监测领域的信号处理部分提供参考.

关键词:光纤传感器;相位敏感光时域反射计;入侵监测;信号处理;识别准确率

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)01-0106004-8

Signal Processing of Intrusion Monitoring Based on φ -OTDR

ZHENG Yin¹, DUAN Fa-jie¹, TU Qin-chang², WEI Bo²

(1 State Key Lab of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 Zhejiang Sinobloom Controls Co., Ltd, Ningbo, Zhejiang 315010, China)

Abstract: In monitoring intrusion incidents based on phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer (φ -OTDR), the methods of combining elements, which are the past records of a single point, the data of neighboring points, and the ratios of peak values, were introduced. The advantages and disadvantages of those methods by accuracy of identification, time consumption, complexity and stability were measured. The experimental results demonstrate the method combining the past records of a single point, and the data of neighboring points achieve the best performance, the identification accuracy rate can be as high as 100%, this method has a good adaptation in different frequencies. The research will contribute to the signal processing part of applying φ -OTDR to security system.

Key words: Fiber optic sensors; Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer (φ -OTDR); Intrusion monitoring; Signal processing; Identification accuracy rate

OCIS Codes: 060.2370; 120.4825; 290.5870; 070.4340

0 引言

分布式光纤振动传感系统具有抗电磁干扰、电绝缘性好、耐腐蚀、灵敏度高以及可实现大范围监测等优点.由于传感光纤可埋藏于地下,具有很好的隐蔽性^[1],因此成为研究的热点,被用于监测和保护国境、军事基地、发电厂、石油管道、核设施及监狱等重要区域和场所^[2-3].分布式光纤振动传感系统是基于相位敏

感光时域反射(Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer, φ -OTDR)原理的新型传感器,可实现不同位置多振动事件的探测与定位,最大监测距离长达50 km.

φ -OTDR技术主要检测后向瑞利散射光的干涉效果,避免光功率发生较快变化,保证探测到光功率并保证干涉效果,被用于窄线宽、大功率、频率稳定性好的光纤激光器中^[4]. φ -OTDR利用相干探测原理^[5-6],外

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2013AA102402)和国家自然科学基金(No. 51275349)资助

第一作者:郑印(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式光纤传感、信号处理、模式识别. Email: zyinter2008@163.com

导师(通讯作者):段发阶(1968—),男,教授,博导,主要研究方向为测试计量技术与仪器、激光及光电测试技术、光纤传感技术、在线检测技术及自动控制技术等. Email: fjduan@tju.edu.cn

收稿日期:2014-05-21; **录用日期:**2014-08-06

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

界的轻微扰动即会引起探测光功率的剧烈变化. 因此, φ -OTDR 对周围环境的扰动非常敏感, 极易引起频繁误报; 同时, 光纤中偏振衰落引起探测结果的随机变化, 也可能被当作入侵信号误报. 因此, 识别真实入侵, 提高检测性能是 φ -OTDR 工程应用急需解决的问题. 在 φ -OTDR 应用于工程监测中, 设计算法主要考虑算法识别准确率、算法的实时性、算法的复杂性、算法定位的稳定性等因素. 传统的识别入侵事件算法是通过将当前时刻中 φ -OTDR 后向瑞利散射信号与其前一刻的后向瑞利散射信号连续相减来检测由入侵者产生的光强差异, 定位入侵位置^[2,7], 这种算法简单, 实时性好, 但误报率高; 基于 φ -OTDR 和 POTDR 结合的分布式光纤微扰传感系统可以在一定程度上降低系统误报率^[8]; 小波降噪法可以滤除部分系统噪音和背景噪音^[9-11], 但提高识别入侵事件准确率有限; 基于多个小波分解结果进行综合判决法通过多个小波检测突变点^[12], 减少了误报, 却也增加了漏报; 滑动平均和滑动差分法是以提高系统响应频率范围为出发点^[13]; 基于时间序列奇异谱特征的检测方法可以一定程度提高识别入侵事件的准确率^[14], 但仅是从时间域上去分析信号变化特征, 且算法复杂. 此外, 这几种算法的设计, 均以减少误报为出发点, 没有考虑对增加漏报的影响, 同时也没有考虑算法复杂性和实时性是否满足 φ -OTDR 工程应用中实时监测报警的要求.

本文以提高识别入侵事件的准确率为研究重点, 在传统算法, 即前后时刻数据差值判断算法的基础上, 研究时间域单点振动判断、空间域相邻点振动判断、特征量峰值比例判断相互结合的算法, 并从算法的识别准确率、算法实时性、算法复杂性、算法定位稳定性等角度, 衡量算法的优劣. 实验验证表明, 时间域单点振动判断和空间域相邻点振动判断结合的算法识别入侵事件准确率最高, 且实时性满足性能要求, 算法简单, 定位稳定性好, 并能适用于不同频率下的振动事件.

1 算法设计

1.1 振动特征分析

入侵事件引起周围环境的振动, 图 1(a)、(b) 分别是 φ -OTDR 检测到的振动区域和非振动区域连续 100 帧典型数据, 横坐标为光纤上空间采样点, 对应光纤上的位置, 纵坐标为 φ -OTDR 检测到的反射回的光功率相对值. 如图 1(a) 椭圆虚线所示区域, 由于振动引起光纤折射率的变化, 返回的光功率发生变化, 而且振动位置光功率的变化要比非振动位置的变化剧烈得多. 图 1(b) 可看出非振动位置光功率按照一定趋势缓慢变化. 本文将振动位置光功率的剧烈变化作为振动事件的特征, 为设计算法提取振动特征量提供依据.

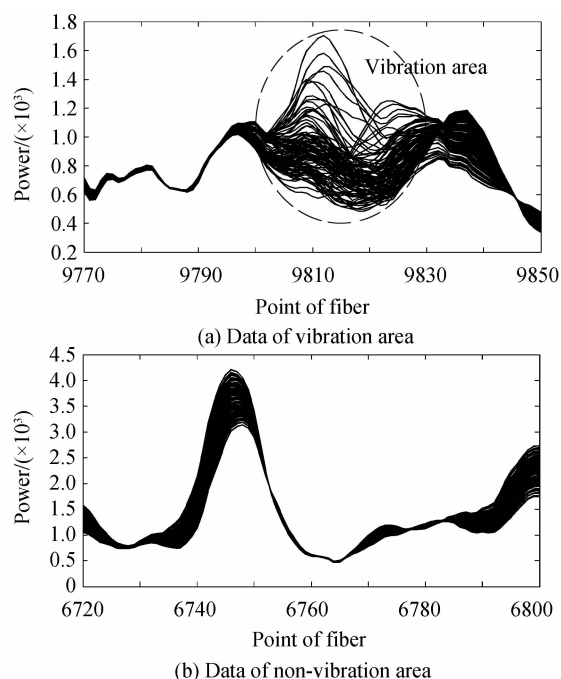


图 1 φ -OTDR 检测到的振动区域与非振动区域数据曲线
Fig. 1 Data of vibration area and non-vibration area monitored by φ -OTDR

1.2 算法设计

1.2.1 前后时刻数据差值判断

振动位置比非振动位置光功率的变化剧烈, 因此, 后一时刻检测到的光功率数据与前一时刻相比变化量大. 通过前后时刻数据差值判断 (Subtracting Present Data from Earlier Data, SPDED), 如图 2, 能够看到采样位置点 9 810 附近明显的峰值出现, 对应于图 1(a) 椭圆虚线所示区域.

$$g(i, k) = \text{abs}[x(i, j+1) - x(i, j)] \quad (1)$$

式(1)中, i 为空间采样点, 对应光纤上不同位置, j 为采样的数据帧序号, 对应不同时刻, $x(i, j)$ 为 φ -OTDR 采集的空间位置点 i 处在时刻 j 的数据, $g(i, k)$ 为经过前后时刻数据差值判断算法处理后的数据, 记采集的数据空间位置点数为 S , 总帧数为 N , $i=1, 2, \dots, S$, $j=1, 2, \dots, N$, $k=1, 2, \dots, N-1$, 根据实际监测的情况调整阈值和阈值系数, 通过自适应均值去阈值的方法, 如式(2), 即可提取出振动特征量组成的矩阵 $\mathbf{G}_{S \times (N-1)}$.

$$\text{thr}(i, k) = \eta \left[1 + \alpha \left(\frac{S}{2} - i \right) \right] \frac{\sum_{i=1}^S g(i, k)}{S} \quad (2)$$

式中, α 为根据光纤衰减率计算的采样点之间衰减系数, η 为去阈值的系数, 一般取 10 左右. 这种去阈值的方法结合了全程光纤经过算法处理后的数据, 同时考虑了光纤中的光功率衰减因素, 适应性非常好.

前后时刻数据差值算法是识别入侵事件的传统算法, 这种算法只需要前后两帧数据即可判断振动, 处理简单、实时效果好, 能够准确识别一部分振动事件. 然

而当振动强度不大时,振动区域峰值不明显,难以从噪声影响中提取出振动特征量.图2是300帧数据处理后的结果,实际中由于实时性的要求不可能取300帧数据来处理;另一方面,选取的两帧数据时间间隔直接影响对不同频率振动事件的识别效果,而采样得到的数据帧间隔又受限于传感光纤的长度和系统采样率.因此这种算法,虽然处理简单、实时效果好,但仅仅依据这种算法识别振动事件准确率有限,还需要综合其他算法提高识别振动事件准确率.

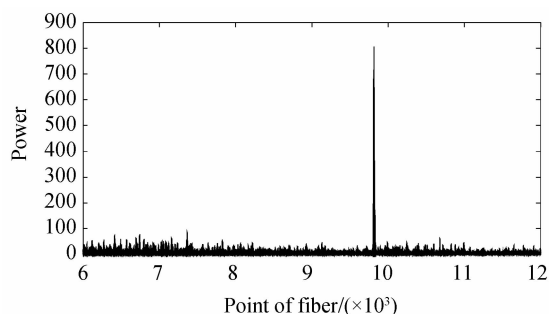


图2 前后时刻数据差值曲线

Fig. 2 Data after subtracting a present φ -OTDR trace signal from an earlier one

1.2.2 时间域单点振动判断

由于光纤本身有一定的刚性,当光纤产生振动后,不会马上停止,而是会稍微持续振动,而后停止,恢复平静.振动位置光功率变化比非振动位置要剧烈得多.时间域上,振动位置某一点不同时刻的光功率变化幅度大、变化速度快,如图3(a),而非振动位置光功率变

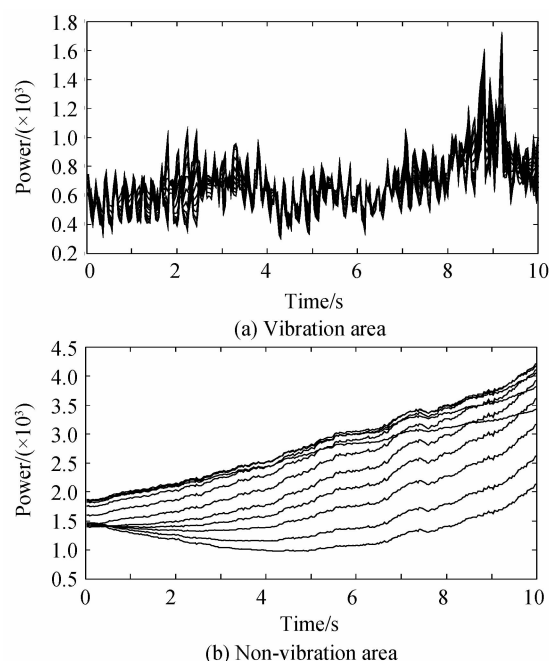


图3 振动区域与非振动区域单点历史曲线

Fig. 3 Past records of single points in vibration area and non-vibration area

化则平缓得多,如图3(b).其中,图3横坐标为时间,纵坐标为光功率相对值,图3(a)是光纤空间采样点9 810~9 820处共11个单点的历史曲线,图3(b)为光纤空间采样点6 740~6 750处共11个单点的历史曲线.通过时间域单点振动判断(Past Records of Single Point, PRSP),可以将振动位置光功率变化幅度大、变化速度快作为判断依据.

$$h(i, k) = \sum_{j=1}^{M-1} \text{abs}[x(i, j+1) - x(i, j)] \quad (3)$$

$$h(i, k) = \sum_{j=1}^{M-1} F\{[x(i, j+1) - \text{std}(i)] \times [x(i, j) - \text{std}(i)] < 0\} \quad (4)$$

$$h(i, k) = \sum_{j=1}^{M-2} F\{[\text{diff}(i, j+1) - H(i)] \times [\text{diff}(i, j) - H(i)] < 0\} \quad (5)$$

式中, i 为空间采样点,对应光纤上不同位置, j 为采样的数据帧序号,对应不同时刻, $x(i, j)$ 为 φ -OTDR采集的空间位置点 i 处在时刻 j 的数据, $\text{std}(i)$ 为采样位置的基准值,可以取滑动均值或者经验值, $\text{diff}(i, j)$ 为前后时刻两帧数据差分值, $H(i)$ 为差分值的阈值,可以取经验值, $F(u)$ 为函数,当 u 为真时, $F(u) = 1$,当 u 为假时, $F(u) = 0$, M 为每一数据段所包含的数据帧数,记采集的数据总帧数为 N , $k = 1, 2, \dots, N - M + 1$.式(3)以变化幅度为依据,式(4)、(5)以变化速度为依据,可根据实际情况选择其一. $h(i, k)$ 为某一采样点处经过时间域单点振动判断算法处理后的数据,全部采样点均采用此算法即得到处理后的一帧数据,对得到的 $N - M + 1$ 帧数据,通过自适应均值去阈值的方法,如式(2),只需将 $g(i, k)$ 改为 $h(i, k)$ 即可提取出振动特征量^[15]组成的矩阵 $\mathbf{H}_{S \times (N-M+1)}$.

对于幅度大频率低的振动,适合从变化幅度去衡量;对于幅度不大但频率高的振动适合从变化速度去衡量.这种算法考虑某一位置的历史数据,能够很大程度提高识别入侵事件的准确率.由于需要从历史数据判断振动,必然需要消耗数据积累的时间,因此为了在提高识别振动事件准确率的同时不过分影响实时性,以1s内的历史数据判断为宜,即限定 M 为1s内的采样帧数.

1.2.3 空间域相邻点振动判断

光纤某一位置产生振动后,实际受干扰也包括周围区域,此区域内各点都表现出了振动状态,如图1(a)振动事件在空间上影响采样点9 810~9 820周围的区域.图3(a)、(b)分别为空间上连续11个单点的历史数据;而其它原因造成的干涉,一般不会形成有一定幅度且有一定持续性的振动区域.因此通过空间域相邻点振动(The Data of Neighboring Points, DNP)作为另一个判断依据,用于更进一步判断是否产生了振动.

对前后时刻数据差值或时间域单点振动判断算法处理后提取出的特征量,在某一位置周围的采样点,特

征量连续出现的点数超过某一阈值则认为算法提取出的为振动特征量,没有达到阈值则认为是干扰,阈值的选取基准参考激光光源脉宽内对应的数据采集系统的采样点数,可以根据实际情况调整。

将前后时刻数据差值判断或时间域单点振动判断算法处理后得到 $G_{S \times (N-1)}$ 或 $H_{S \times (N-M+1)}$, 每一列中元素全部大于零的数组组成新矩阵 $\{D_1; D_2; \dots; D_u\}_k, k = N-1$ 或 $N-M+1, u$ 为对应列大于零的数组总数目, 分别计算 D_1, D_2, \dots, D_u 数组的长度, 剔除长度小于阈值的数组, 最后得到新的处理后的特征量矩阵 $\{ND_1; ND_2; \dots; ND_v\}_k, k = N-1$ 或 $N-M+1, v$ 为处理后对应列数组总数目, $v \leq u$ 。

这种算法是在前后时刻数据差值判断算法和时间域单点振动判断算法的基础上判断, 对原算法的实时性、算法复杂性没有影响, 但对提高识别入侵事件的准确率作用很大。

1.2.4 特征量峰值比例判断

依据光功率的变化、持续时间和影响区域判断振动, 能大幅提高识别振动事件的准确率, 但不可避免地受到其他幅度相对不大、持续一段时间、且影响一定区域等因素的干扰影响。对于这类干扰, 前后时刻数据差值、时间域单点振动、空间域相邻点振动三种判断算法是无法将其与振动事件区分开。去阈值法可以剔除一部分干扰影响, 但结合特征量峰值比例判断算法(The Ratios of Peak Values, RPV), 将已提取出的特征量相互比较, 剔除特征量峰值相对不明显的干扰, 对振动特征量提取效果更好。

对经过上述算法提取出的特征量矩阵, 计算每一列中元素大于零数组的峰值。以空间域相邻点振动判断算法处理后的矩阵为例, 得到 $\{Peak_1; Peak_2; \dots; Peak_v\}_k, k = N-1$ 或 $N-M+1$, 其中 $\{Peak_n\}_k = \{\max(ND_n)\}_k, n = 1, 2, \dots, v$ 。

$$R_n = \frac{Peak_n}{\sum_{n=1}^v Peak_n} \quad (5)$$

由式(5)得到新的特征量矩阵 $\{R_1; R_2; \dots; R_v\}_k, k = N-1$ 或 $N-M+1$, 对于新矩阵, 设定阈值系数, 剔除峰值比例小的特征量, 最后得到新矩阵 $\{NR_1; NR_2; \dots; NR_w\}_k, k = N-1$ 或 $N-M+1, w$ 为处理后峰值比例大于阈值的数组总数目, $w \leq v$ 。

这种判断算法是在原算法的基础上判断, 同时对原算法的实时性、算法复杂性几乎没有影响, 该判断算法对特征量的峰值比例作一定要求, 对振动事件的判断更为严苛, 合理调整比例系数可以基本消除误报, 但也使漏报现象更为严重。因为 φ -OTDR 是持续采集实时数据持续判断, 对于偶尔产生的漏报可以结合下一时间段的数据, 基本可以消除。

2 实验验证

2.1 实验准备

实验在 32 km 长的单模光纤上进行测试, 同时在 20 km 和 25 km 左右 20 m 的光纤圈模拟入侵行为产生的振动。采用中心波长为 1 550 nm 的 DFB 激光器, 线宽 4 kHz, 脉宽 200 ns。数据采集系统采样率为 50 M, 采集传感光纤上 15 500 个点的数据, 即 $S = 15 500$, 然后将采集的连续 100 组数据累加输出得到一帧数据, 根据光纤长度调整激光脉冲周期约为 0.33 ms, 每秒共采集 30 帧数据。取 10 s 内共 300 帧数据作为分析样本, 即 $N = 300$ 。在分析出识别准确率最高的算法后, 为了更进一步验证该算法的适用性, 利用振动台产生 12 组不同频率、强度随机的振动, 振动频率分别为 1、2、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90 Hz。

2.2 实验数据处理算法

1) 前后时刻数据差值判断(SPDED)

图 4 为采集到的一帧数据, 通过前后时刻数据差值并通过自适应均值去阈值算法, 激光中心波长 1 550 nm 时单模光纤衰减率为 0.2 dB/km, 取 $\alpha = 0.000 1, \eta = 10$, 图 5 是处理后的结果。前后两帧数据采集时间为 0.067 s, 加上很短的程序运行时间, 实时效果非常好。通过这种方法处理 300 帧数据, 得到 299 组处理结果, 完全准确识别的有 153 组, 准确识别率 51.17%, 漏报的有 44 组, 漏报率 14.72%, 误报的有 120 组, 误报率 40.13%, 其中有 18 组同时存在漏报和误报。仅依据这种判断, 漏报误报的现象非常严重。

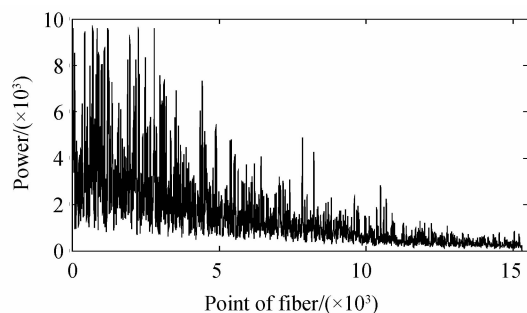


图 4 φ -OTDR 采集的一帧数据

Fig. 4 A set of data monitored by φ -OTDR

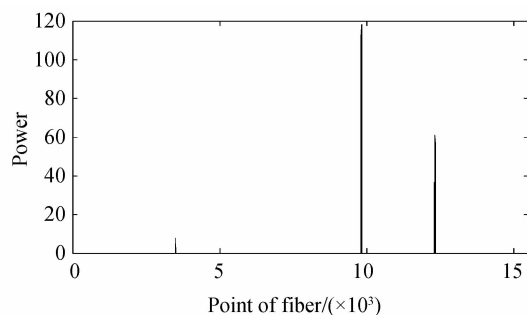


图 5 前后时刻数据差值和去阈值处理后

Fig. 5 Data after subtracting a present φ -OTDR trace signal from an earlier one and then subtracting threshold

2) 空间域相邻点振动判断(DNP)

在第一步处理的基础上加入空间域相邻点振动判断算法,从空间域上考量某一区域的光功率变化,剔除影响区域小的干扰影响,以连续10个点(脉宽200 ns,采样率50 M,对应10个点左右)的振动为阈值,完全准确识别的有195组,准确识别率65.22%,漏报的有72组,漏报率24.08%,误报的有37组,误报率12.37%,其中有5组同时存在漏报和误报,这种算法在第一步基础上,不影响原算法的实时性和算法复杂性,能够一定程度提升识别振动事件准确率,对减少误报效果显著,却也增加了漏报。

3) 时间域单点振动判断(PRSP)

时间域单点振动判断算法,是从时间域上判断某一点一段时间内的光功率变化,剔除持续时间很短的干扰。考虑到不能影响实时性,分析某一点1 s内的30帧数据,即 $M=30$,共得到271组处理结果,通过变化幅度衡量振动事件与非振动事件,并通过自适应均值去阈值法, $\alpha=0.0001$, $\eta=10$,同时加入以10个点为阈值的空间域相邻点振动判断算法。通过这种算法,完全准确识别的有271组,准确识别率100%,漏报的有0组,漏报率0,误报的有0组,误报率0。这种算法对算法复杂性几乎不影响,但因为分析的是1 s内的数据,对原算法的实时性有一定影响,但实时效果可以满足要求。这种算法判断振动更为严格,因为结合时间域和空间域的振动信息,显著减少了误报和漏报,很大程度提高了识别振动事件的准确率。

4) 特征量峰值比例判断(RPV)

上述算法提取出的特征量,都可以通过加入峰值比例判断,来剔除幅度相对不大、但持续一段时间、影响一定区域的干扰引起的误报。例如在第一步中加入峰值比例判断,系数取0.07,完全准确识别的有188组,准确识别率62.88%,漏报的有72组,漏报率24.08%,误报的有55组,误报率18.39%,其中有16组同时存在漏报和误报;第二步中加入峰值比例判断,系数取0.07,完全准确识别的有201组,准确识别率67.22%,漏报的有89组,漏报率29.77%,误报的有12组,误报率4.01%,其中有3组同时存在漏报和误报。因此,可以根据实际工作环境下的干扰情况,来选择是否在算法中加入这一判断算法。

5) 综合判断

在实际工作环境下,可以在软件上调整各步算法的系数和阈值来综合判断振动事件与非振动事件。表1是上述设计的算法处理实验数据的统计结果,可以看出时间域单点振动判断和空间域相邻点振动判断结合的算法,识别振动事件的准确率远高于另外几种算法,达到准确识别振动事件的目的。取单模光纤折射率为1.46,定位的位置均值分别为20.15 km、25.28 km,

标准差分别为1.67 m、5.55 m,理论空间分辨率约为20 m。由于本文重点研究识别入侵事件的算法,且实验模拟入侵位置20 km、25 km并非精确位置,因此,不过多考究空间分辨率。

表1 不同算法处理后的统计结果

Table 1 The statistical result after signal processing of different methods

| Methods | Accuracy rate | Missing rate | False rate | Time consumption |
|---------------|---------------|--------------|------------|------------------|
| SPDED | 51.17% | 14.72% | 40.13% | 0.067 s |
| SPDED+RPV | 62.88% | 24.08% | 18.39% | 0.067 s |
| SPDED+DNP | 65.22% | 24.08% | 12.37% | 0.067 s |
| SPDED+DNP+RPV | 67.22% | 29.77% | 4.01% | 0.067 s |
| PRSP+DNP | 100% | 0 | 0 | 1 s |

为了更进一步验证时间域单点振动判断和空间域相邻点振动判断相结合的算法适用性,用该算法处理1~100 Hz之间12组频率不同、幅度随机的振动事件数据, $\alpha=0.0001$, $\eta=10$ 去除阈值,除了40 Hz和80 Hz时准确识别率为89.3%,其他频率下准确识别率均是100%,且40 Hz和80 Hz时调整 $\eta=11$,准确识别率也同样达到100%。虽然真实入侵事件的频率不会是恒定的,但一般集中在低频,且时间域单点振动判断和空间域相邻点振动判断检测的就是一段期间、一定区域内光功率的变化,所以频率变化的振动事件反而更容易探测。通过上述验证可知,时间域单点振动判断算法和空间域相邻点振动判断算法结合,并通过自适应均值去阈值处理,识别真实入侵事件的准确率最高,且实时性满足性能要求,算法简单,定位稳定性好,且适用性很强。

3 结论

基于 φ -OTDR识别入侵事件算法,在传统的前后时刻数据差值判断算法基础上,研究了时间域单点振动判断、空间域相邻点振动判断、特征量峰值比例判断相互结合的算法。并以算法的识别准确率、算法实时性、算法复杂性、算法定位稳定性为准则,评价这几种算法的优劣。通过采集连续时刻共300帧数据,验证发现,时间域单点振动判断和空间域相邻点振动判断结合的算法能够完全识别入侵事件,识别准确率最高,且实时性满足性能要求,算法简单,定位稳定性好,适用性强。该研究对于将基于 φ -OTDR测量原理的分布式光纤振动传感系统应用于安防监测领域具有很高的应用价值。

参考文献

- [1] 谢孔利. 基于 φ -OTDR分布式光纤传感系统[D]. 成都,电子科技大学,2008:9-22.
- [2] XIE Kong-li, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling. Distributed optical fiber sensing system based of rayleigh scattering light φ -

- 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 φ 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.
- [3] 岳剑峰. 分布式光纤 φ -OTDR 安防系统实用化研究[D]. 成都, 电子科技大学, 2009:2-14.
- [4] YI Duo, WANG Zhi, WU Chong-qing, *et al.* Properties of rayleigh backscattering in optical fiber with arbitrary input optical pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4):404-407.
- 易多, 王智, 吴重庆, 等. 任意波形输入脉冲光纤背向瑞利散射的研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(4):404-407.
- [5] QIN Zeng-guang, ZHU Tao, CHEN Liang, *et al.* High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(15):1091-1093.
- [6] BAO Xiao-yi, CHEN Liang. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012(12): 8614-8624.
- [7] JUAREZ J C, MAIER E W, CHOI K N, *et al.* Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(6):2081-2087.
- [8] LI Jian-zhong, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling. A distributed optical fiber perturbation sensor system base on combination of φ -OTDR and POTDR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5):1108-1112.
- 李建中, 饶云江, 冉曾令. 基于 φ -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):1108-1112.
- [9] QIN Zeng-guang, CHEN Liang, BAO Xiao-yi. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(7):542-544.
- [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, 岳剑峰, 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.
- [11] FENG Xin, ZENG Zhou-mo, FENG Hao, *et al.* A method for evaluating the disturbance in distributed vibration sensor based on wavelet information entropy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(13):1106005.
- 冯欣, 曾周末, 封皓, 等. 基于小波信息熵的分布式振动传感系统的扰动评价方法[J]. 光学学报, 2013, **33**(13):1106005.
- [12] 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):1692-1685.
- 吴麻伟, 吴慧娟, 饶云江, 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):1692-1685.
- [13] LU Yue-lan, ZHU Tao, CHEN Liang, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(22):3243-3247.
- [14] LI Xiao-yu, WU Hui-juan, PENG Zheng-pu, *et al.* A novel time sequence singular spectrum analysis method for φ -OTDR disturbance detection system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4):0428001-1-0428001-5.
- 李小玉, 吴慧娟, 彭正谱, 等. 基于时间序列奇异谱特征的 φ -OTDR 扰动检测方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(4):0428001-1-0428001-5.
- [15] XIE Xin, WU Hui-juan, RAO Yun-jiang. A fiber-optical perimeter intrusion detection system based on the fiber bragg grating vibration sensors and its identification method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5):0506005.
- 谢鑫, 吴慧娟, 饶云江. 一种基于光纤布喇格光栅振动传感器的光纤围栏入侵监测系统及其模式识别[J]. 光子学报, 2014, **43**(5):0506005.