

基于空间域差分的 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器定位方法研究

梁生¹, 刘腾飞¹, 盛新志¹, 娄淑琴², 张克³

- (1. 北京交通大学理学院物理系教育部发光与光信息技术重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 3. 北京市计量检测科学研究院, 北京 100029)

摘要: 针对 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器偏振衰落导致漏报的问题, 提出了一种基于空间域差分的定位方法。在不增加光路器件的情况下, 在空间域对探测光强进行差分处理, 与现有时域定位方法相结合, 通过在时域和空间域分别设置报警阈值, 可以有效抑制偏振衰落导致的漏报。对提出的定位方法进行了实验验证, 在空间分辨率为 50 m、光纤长度为 25.05 km 的条件下进行多次实验测试, 与现有单一时域定位方法相比, 漏报率从 18.5% 降低到 2%, 报警准确率从 76% 提高至 89%。该研究工作可以为优化和提高 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器在实际应用中的技术性能提供理论指导和技术参考。

关键词: φ -OTDR; 光纤分布式扰动传感器; 空间域差分; 漏报率; 阈值

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0622005

Investigation on space-domain difference based location method for φ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor

Liang Sheng¹, Liu Tengfei¹, Sheng Xinzhi¹, Lou Shuqin², Zhang Ke³

- (1. Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Beijing Institute of Metrology and Testing, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to solve the problem of missing alarm due to the polarization induced fading (PIF) in φ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor, a space-domain difference based location method was proposed and investigated. By determining the time-domain and space-domain thresholds, respectively, the detected optical intensity was processed by both of current time-domain and our proposed space-domain difference methods. Then, the missing alarm rate induced by PIF can be effectively reduced. The proposed location method was verified by experiment. By a long-term test in the case of space resolution of 50 m and fiber length of 25.05 km, compared with current single time-domain location method, the missing alarm rate is reduced to be 2% from 18.5%, and the accurate alarm rate is improved to be 89% from 76%. The proposed work in this paper can be the theoretical direction and technical reference for optimization and improving performances of φ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor in

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2015-11-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2014JBM124)

作者简介: 梁生(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光纤传感和光纤通信研究。Email: shliang@bjtu.edu.cn

practical applications.

Key words: φ -OTDR; fiber-optic distributed disturbance sensor; space-domain difference; missing alarm rate; threshold

0 引言

光纤分布式扰动传感器能够对传感光纤上任意一点扰动进行探测和定位,凭借其监测距离长、可连续定位以及无需外场供电等重要技术优势,广泛应用于周界安防、油气管线预警、通信线路监测以及大型结构监测^[1-3]。光纤分布式扰动传感器主要技术方案包括 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪方案^[4-5]和相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)方案^[6]。

M-Z 干涉仪方案具有定位算法简单和硬件成本低等技术优势,但在实际应用中只能对同一时刻单点扰动准确定位,不能对多点同时扰动进行准确定位,限制了其进一步推广和应用^[7]。 φ -OTDR 方案与 M-Z 干涉仪方案相比,具有定位稳定、结构简单、施工便利(仅用一根光纤)、能够对同时多点扰动进行准确定位的技术优势,是目前光纤分布式扰动传感器的发展趋势^[6,8]。

φ -OTDR 方案基于光纤中后向瑞利散射光波之间的干涉,在脉冲宽度范围内,传感光纤中散射点后向瑞利散射光之间发生干涉,由于偏振衰落将引起探测光强的随机变化^[9],影响对扰动报警的正确判断。Z. Qin 等利用小波去噪方法抑制噪声影响,在一定程度上提高了系统识别扰动事件的准确率^[10];周俊等研究干涉衰落问题时,发现同频率脉冲扫描出相似的衰落波形,而不同光频有不同的衰落波形,由此提出了一种基于多频率综合判决的方法,能够排除一些误报,但算法过于复杂,实时性弱,同时,硬件成本较高,限制了其进一步应用^[11];郑印等从扰动位置前后时刻光强变化幅度提取特征量,再进行区域扰动群判断,算法较为简便,但当单点后向瑞利散射光受偏振态衰落影响时,区域扰动群判断失效^[12]。

综上所述, φ -OTDR 的现有研究主要以减少误报率为出发点,目前缺乏针对 φ -OTDR 中偏振衰落导致漏报问题的深入研究。文中在不增加光路器件的情况下,在空间域对探测光强进行差分处理,与现有时域定位方法相结合,通过分别在时域和空间域设置报警阈值和进行差分处理,实现扰动判断,有效

降低 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器中偏振衰落导致的漏报率。

1 φ -OTDR 及其定位方法

1.1 φ -OTDR 原理

φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器原理如图 1 所示。激光器输出的连续激光光波经声光调制器(AOM)转换成脉冲光,通过掺铒光纤放大器(EDFA)对脉冲光强进行放大,通过环形器注入到传感光纤中。传感光纤产生的后向瑞利散射光经环形器被光电探测器(PD)接收后,由采集卡采集光强信号,交由计算机处理。 φ -OTDR 使用窄线宽激光器以实现脉宽范围内后向瑞利散射光之间发生干涉,提高灵敏度,使之能够响应扰动引起的光相位变化。

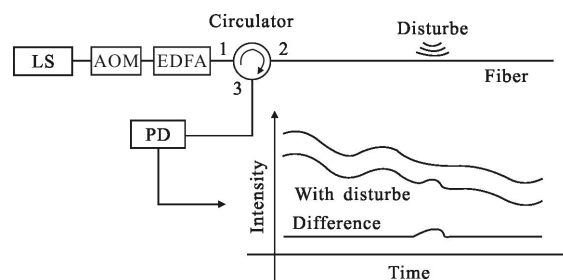


图 1 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器原理示意图

Fig.1 Schematic of φ -OTDR based FDDS

φ -OTDR 的空间分辨率由注入脉冲的宽度 T_p 决定,有:

$$\Delta z = cT_p / 2n \quad (1)$$

式中: n 为光纤群折射率; c 为真空中的光速。以空间分辨率 Δz 为单位长度,将长度为 L 的传感光纤在长度上划分为 N 个防区,如图 2 所示。其中:

$$N = [L / \Delta z] + 1 \quad (2)$$

式中: $[\sim]$ 为取整数运算。

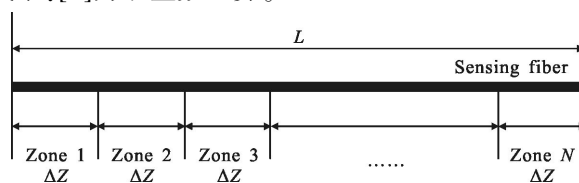


图 2 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器防区示意图

Fig.2 Zones of φ -OTDR based FDDS

外界扰动作用于传感光纤, 光纤的群折射率和长度将发生改变, 从而导致后向瑞利散射光的相位发生变化。可以得到 φ -OTDR 散射光强与防区(距离)之间的关系。由光的波动方程, 距离传感光纤首端 l 处后向散射的光脉冲复振幅可以表示为^[13]:

$$\tilde{E}=A\exp(i2\pi n l/\lambda) \quad (3)$$

式中: A 为后向瑞利散射光复振幅; l 为散射光距离传感光纤首端长度; λ 为真空中光波长。则由光的复振幅叠加原理可以得到光脉冲宽度范围内光脉冲的合扰动复振幅为:

$$\tilde{E}=\int_0^{L_0} A\exp(i2\pi n l/\lambda)dl=\frac{A\lambda}{i2\pi n}[\exp(i2\pi n L_0/\lambda)-1] \quad (4)$$

式中: L_0 为脉冲宽度。因此, 可以得到合光强:

$$I=\tilde{E}*\tilde{E}^*=\frac{A^2\lambda^2}{2\pi^2 n^2}[1-\cos(2\pi n L_0/\lambda)] \quad (5)$$

由公式(5)可知, 当脉冲在群折射率为常数的理想光纤中渡越时, 返回的光强信号只与真空中波长和脉冲宽度有关, 当波长和脉冲宽度恒定时, 各处返回的信号光强保持不变。但光纤在实际制作和应用中, 由于生产工艺的限制以及各处光纤弯折扭曲情况不尽相同, 使得光纤各处群折射率不同, 各处后向瑞利散射光干涉光强会呈现出起伏状态, 因此, 散射光强与防区之间的关系呈现出光强随距离的增加而强弱变化的锯齿状波形, 如图 3(a)所示。静态时(外界无扰动), 锯齿状波形保持相对稳定。当外界有扰动发生时, 会引起相应位置处光纤群折射率和长度的变化, 从而导致该处散射光强也将随之发生变化, 如图3(b)所示。扰动会导致散射光强发生变化, 通过设计定位方法可以做出报警判断并给出扰动发生的位置。

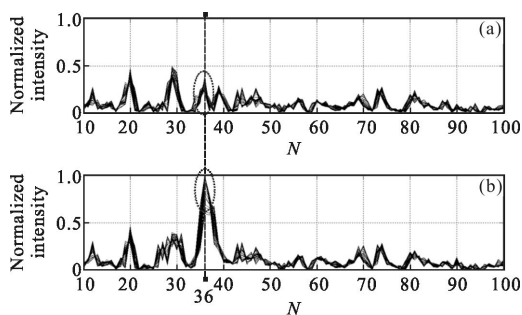


图 3 静态(a)和扰动(b)情况下光强随防区分布(数据采集次数:33)
Fig.3 Intensity vs zones without (a) and with (b) disturbance (Sampling times: 33)

1.2 时域差分定位方法

当外界没有发生扰动时, φ -OTDR 输出光强稳定不变。当传感光纤上有扰动时, 对应防区光强发生突变。通过探测时刻 t_2 平均光强 I_2 与前一时刻 t_1 平均光强 I_1 , 相减得到光强差分值:

$$\Delta I=I_2-I_1 \quad (6)$$

然后与预先设定的时域报警阈值 I_{th} 相比较判断是否有扰动事件发生, 从而能够实现对扰动事件进行报警和定位。光强变化的时刻与扰动的位置相对应, 从而可以准确得到扰动发生的位置。通过计算扰动事件发生前后时刻散射光强之间的差值即可检测外界扰动引起的光强差异, 如图 1 所示, 光强差分值的峰值点位置对应的时延 τ 与扰动事件发生点到传感光纤前端的距离 L' 有如下关系:

$$\tau=2nL'/c \quad (7)$$

关于时域阈值 I_{th} 设定, 在无扰动情况下采集 2 min 各防区后向瑞利散射光光强, 在时域进行叠加平均处理。为在识别外界扰动信号前提下尽可能降低系统运算量, 设置各防区阈值系数为 γ_1 , 有:

$$I_{th}=\gamma_1 \times \text{ave}(I_n) \quad (8)$$

式中: I_n 为第 n 个防区的光强。

经过多次试验验证, 阈值系数最终取值为 $\gamma_1=2$, 因此可得时域各防区阈值。图 4 为各防区时域归一化阈值随防区的分布。

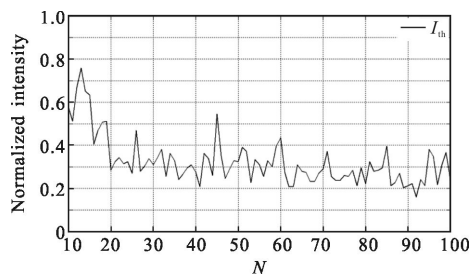


图 4 时域归一化阈值随防区变化

Fig.4 Normalized threshold vs zones in time-domain

1.3 空间域差分定位方法

现有时域定位差分方法受到偏振衰落影响, 导致漏报, 为了解决这一问题, 文中提出空间域差分定位方法。设 t_1 时刻第 n 和 $n+1$ 防区平均光强分别为 $I_n^{t_1}$ 和 $I_{n+1}^{t_1}$, t_2 时刻第 n 和 $n+1$ 防区平均光强分别为 $I_n^{t_2}$ 和 $I_{n+1}^{t_2}$, 则空间域光强差分为:

$$\Delta I'=\|I_{n+1}^{t_2}-I_n^{t_2}\|-\|I_{n+1}^{t_1}-I_n^{t_1}\| \quad (9)$$

将 $\Delta I'$ 与预先设定的空间域阈值 I_{th}' 相比较判断是否有扰动事件发生。

关于空间域阈值 I_{th}' 的设定, 在无扰动情况下采集 2 min 各防区后向瑞利散射光光强, 在空间域进行叠加平均处理。设置各防区阈值系数 γ_2 , 经过多次试验验证, 阈值系数最终取值为 $\gamma_2=1.5$, 因此可得空间域各防区阈值:

$$I_{th}' = \gamma_2 \times \text{ave} \| |I_{n+1}^{t_2} - I_n^{t_2}| - |I_{n+1}^{t_1} - I_n^{t_1}| \| \quad (10)$$

图 5 为各防区空间域归一化阈值随防区的分布。

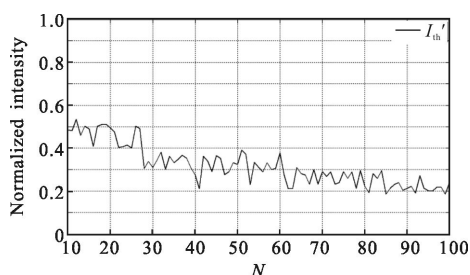


图 5 空间域归一化阈值随防区变化

Fig.5 Normalized threshold vs zones in space-domain

1.4 时域差分 and 空间域差分相结合定位方法

为了减少环境噪声的影响, 降低误报率, 时域差分定位方法通常设定较高阈值抑制误报。由于偏振衰落, 光强差分值 ΔI 可能低于报警阈值 I_{th} , 导致漏报。为了抑制漏报, 文中采用时域差分定位(判断 A)和防区空间域差分定位(判断 B)相结合的方法, 其流程示意图如图 6 所示。

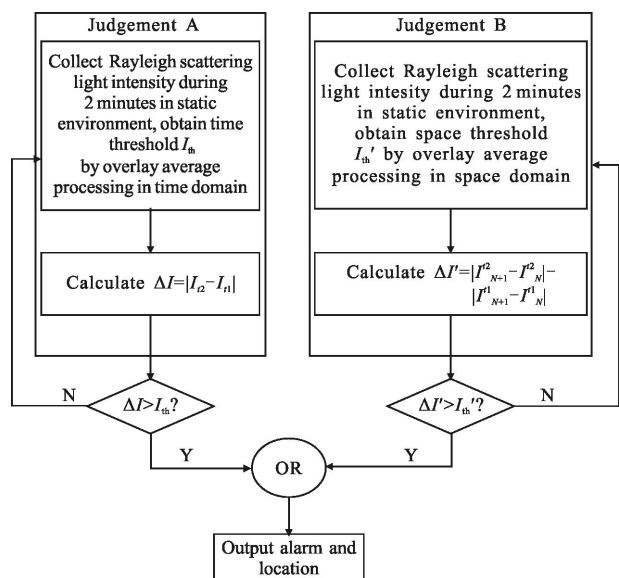


图 6 定位算法流程示意图

Fig.6 Flowchart of the location method

2 实验结果及讨论

为了对文中提出的定位方法的可行性和有效性进行验证, 通过 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器系统进行实验研究。系统激光光源采用窄线宽半导体激光器, 输出中心波长为 1 550 nm, 线宽为 10 kHz, 经 AOM 调制为脉冲光, 空间分辨率 $\Delta z=50$ m, 光纤长度 25.05 km, 共 501 个防区, 采集卡采样频率 4 MHz。在实验室环境下, 在第 36 防区 1.790 km 处进行人为扰动。

φ -OTDR 系统输出信号采用直接平均进行处理, 将采集的连续 33 组数据累积平均输出得到一组数据。首先, 采用时域差分定位方法(判断 A), 报警判断结果如图 7 所示, 由于偏振态衰落的影响, 扰动发生位置 $N=36$ 处光强差分值低于时域阈值, 导致漏报。

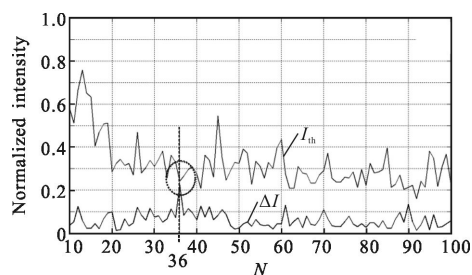


图 7 时域差分定位方法处理结果, $I_{36} < I_{th}$, 漏报

Fig.7 Results by time-domain difference method, $I_{36} < I_{th}$, missing alarm

采用文中提出的空间域差分定位方法(判断 B), 报警判断结果如图 8 所示, 扰动发生位置 $N=36$ 处光强差分值高于空间域阈值, 正确报警。

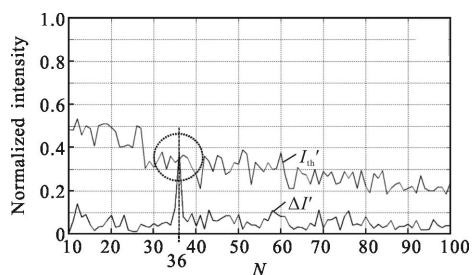


图 8 空间域差分定位方法处理结果, $I_{36} > I_{th}'$, 正确报警

Fig. 8 Results by space-domain difference method, $I_{36} > I_{th}'$, accurate alarm

表 1 是三种方法处理实验数据的统计结果, 经过实验室 200 组测试实验, 只采用判断 A, 准确报警 152 组, 准确报警率 76%, 漏报 37 组, 漏报率 18.5%;

只采用判断 B, 准确报警 161 组, 准确报警率 80.5%, 漏报 27 组, 漏报率 13.5%; 采用判断 A 和判断 B “或”运算, 准确报警 178 组, 准确报警率 89%, 漏报 4 组, 漏报率 2%。单独采用判断 A 和判断 B 的漏报率分别为 P_{LA} 和 P_{LB} , 则同时采用采用时域 (判断 A) 和空间域 (判断 B) 差分定位方法的漏报率 P_{LAB} 可以表示为:

$$P_{LAB} = P_{LA} \times P_{LB} \quad (11)$$

采用文中提出的时域和空间域差分定位方法抑制偏振衰落影响导致漏报的漏报率改善 ΔP_L 在理论上可以表示为:

$$\Delta P_L = P_{LA} - P_{LAB} = P_{LA} - P_{LA} \times P_{LB} \quad (12)$$

根据表 1 数据, 有: $P_{LAB} = 2\% \approx P_{LA} \times P_{LB} = 18.5\% \times 13.5\% = 2.5\%$, 在样本数有限的情况下, 近似满足公式(11)关系, 漏报率改善为 $\Delta P_L = P_{LA} - P_{LAB} = 18.5\% - 2\% = 16.5\%$ 。实验结果表明: 可以有效提高准确报警率, 抑制漏报率。

表 1 三种方案的准确率和漏报率对比

Tab.1 Accurate and missing alarm rates for three methods

Method	Accurate alarm rate	Missing alarm rate
Judgement A	76%	18.5%
Judgement B	80.5%	13.5%
Judgement A or Judgement B	89%	2%

3 结 论

针对 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器受偏振衰落影响导致漏报的问题, 文中提出了一种基于空间域差分的定位方法, 分别设定时域和空间域差分判断阈值, 通过在空间域对探测光强进行差分, 与空间域阈值进行比较判断, 通过同时采用时域和空间域差分定位方法, 可以有效抑制漏报。在长期测试条件下, 漏报率从 18.5% 降至 2%。

参考文献:

[1] 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.

[2] Juarez J C, Taylor H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 1968-1971.

[3] Qin Z, Zhu T, Chen L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2011, 23(15): 1091-1093.

[4] Naghski D H, Boyd J T, Jackson H E, et al. An integrated photonic Mach-Zehnder interferometer with no electrodes for sensing electric fields[J]. *Lightwave Technology, Journal of*, 1994, 12(6): 1092-1098.

[5] Wu S Y, Ho H P, Law W C, et al. Highly sensitive differential phase-sensitive surface plasmon resonance biosensor based on the Mach-Zehnder configuration [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2378-2380.

[6] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: U.S. 5, 194, 847[P]. 1993-03-16.

[7] Wang Siyuan, Lou Shuqin, Liang Sheng, et al. Pattern recognition method of fiber distributed disturbance sensing system based on M-Z interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2613-2618. (in Chinese)

[8] Zhang Chunxi, Zhong Xiang, Li Lijing, et al. Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 742-746. (in Chinese)

[9] Juarez J C, Taylor H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3284-3286.

[10] Zengguang Qin, Liang Chen, Xiaoyi Bao. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 542-544.

[11] Zhou Jun, Pan Zhengqing, Ye Qing, et al. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (9): 114 -119. (in Chinese)

[12] Zheng Yin, Duan Fajie, Tu Qinchang, et al. Research on signal processing of intrusion monitoring based on φ -OTDR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 44(1): 0106004. (in Chinese)

[13] An Yang, Jin Shijiu, Feng Xin, et al. Optical fiber pipeline security pre-warning system based on coherent Rayleigh scattering [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(1):70-75. (in Chinese)