

一种低误报率的新型光纤分布式振动传感系统

林文台¹, 梁生², 娄淑琴¹, 盛新志¹, 王鹏¹, 张颜¹

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;
2. 北京交通大学 理学院 教育部发光与光信息技术重点实验室, 北京 100044)

摘要: 针对目前 φ -OTDR 光纤分布式振动传感器由于散射光波光强不稳定造成误报率较高的问题, 文中提出一种 φ -OTDR 和 Mach-Zehnder 干涉仪相结合的光纤分布式振动传感新系统, φ -OTDR 和 Mach-Zehnder 干涉仪分别对外界振动进行探测, 从而降低单一 φ -OTDR 探测的误报率。实验研究了 φ -OTDR 和提出的新的复合结构系统对外界振动探测的误报率, 实验结果表明: 在复杂环境下, 与现有 φ -OTDR 方案相比, 提出的基于 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪复合结构的方案可以有效降低系统的误报率, 使系统的误报率由单一 φ -OTDR 的 25% 降至 2%。

关键词: 光纤分布式振动传感器; φ -OTDR; Mach-Zehnder 干涉仪; 误报率

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1845-04

A novel fiber-optic distributed disturbance sensor system with low false alarm rate

Lin Wentai¹, Liang Sheng², Lou Shuqin¹, Sheng Xinzhi¹, Wang Peng¹, Zhang Yan¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A phase-sensitive optical time domain reflectometer (φ -OTDR) and Mach-Zehnder interferometer based fiber-optic distributed disturbance sensor was proposed in this paper. The aim is to obtain a low false alarm rate compared with current single φ -OTDR, which suffers from the high false rate due to the instability of scattering light intensity fluctuation in φ -OTDR. In the proposed sensor, φ -OTDR and Mach-Zehnder interferometer were multiplexed together. So, the φ -OTDR was used to detect and locate the disturbance, and the Mach-Zehnder interferometer was utilized to detect the disturbance, respectively. Then, the disturbance detected by φ -OTDR can be confirmed by the M-Z interferometer to realize a low false alarm rate due to the instability of φ -OTDR. The feasibility and effectivity of the proposed method by multiplexed φ -OTDR and Mach-Zehnder interferometer were validated in experiment, by comparing with current single φ -OTDR. It is found that the false alarm rate can be

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61205074); 教育部博士点基金(20120009120041);
轨道交通控制与安全国家重点实验室项目(RCS2012K007)

作者简介: 林文台(1983-), 男, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: wtlin@bjtu.edu.cn

reduced to 2% from 25% by the single φ -OTDR.

Key words: fiber-optic distributed disturbance sensor; φ -OTDR; Mach-Zehnder interferometer; false alarm rate

0 引言

光纤分布式振动传感系统,能够对传感光纤上的振动进行探测和定位,凭借其监测距离长、可连续定位以及无需外场供电等重要优势,广泛应用于大型结构监测^[1]、周界安防^[2-5]、油气管线预警^[6-10]、以及通信线路监测^[1-2]。

在光纤分布式振动传感系统的多种实现方案中,基于相位敏感光时域反射计(Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer, φ -OTDR)方案具有结构简单,定位精度高的优势^[4-8]。但由于 φ -OTDR 振动传感系统基于光纤中的瑞利背向散射光工作,稳定性不够理想,误报率较高^[9-10]。

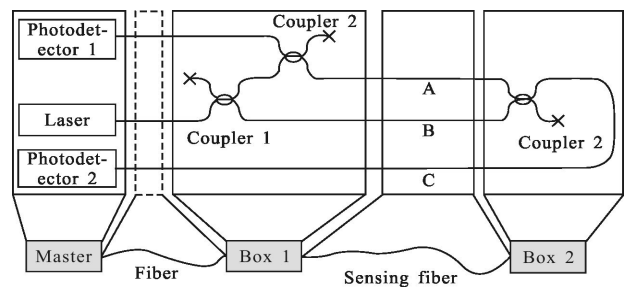
为解决 φ -OTDR 振动传感系统误报率较高的问题,文中在 φ -OTDR 振动传感系统中增加 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪,以复合结构的形式提高光纤分布式振动传感系统的对外界振动信号探测灵敏度和空间定位精度,有效降低了系统的误报率。

1 系统装置及其原理

提出的新型光纤分布式振动传感系统的结构示意图如图 1(a)所示,系统采用 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪相结合的复合结构。光路可以分为 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪两部分,分别如图 1(b)和(c)所示。

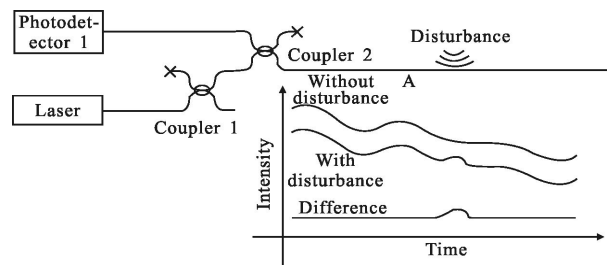
在 φ -OTDR 中,激光光源输出的光经过光纤耦合器 1 和 2 后入射到光纤 A 中,光纤 A 中的背向瑞利散射光经过耦合器 2,传送到光电探测器 1。 φ -OTDR 中采用窄线宽脉冲激光器作为传感器光源,光源相干时间大于输出光脉冲宽度。在光源脉冲宽度范围内,不同散射光波的相干作用导致探测到的后向瑞利散射波形具有类似散斑的形状,通过检测振动引起后向瑞利散射光波干涉光强在振动作用下的突变,可以实现振动的探测和定位。当外界没有发生入侵行为时, φ -OTDR 曲线稳定不变。当敏感光纤上有入侵事件发生时, φ -OTDR 曲线在对应位置将

发生剧烈波动,通过与入侵事件发生前的曲线相减,能够对入侵事件进行准确定位,如图 1(b)所示。



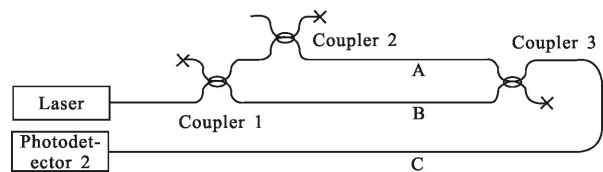
(a) 系统

(a) Whole system



(b) φ -OTDR

(b) φ -OTDR



(c) Mach-Zehnder 干涉仪

(c) Mach-Zehnder interferometer

图 1 φ -OTDR 和 Mach-Zehnder 干涉仪结构光纤分布式振动传感器原理示意图

Fig.1 Schematic illustration of the φ -OTDR & Mach-Zehnder interferometer based on FDDS

当振动作用在传感光纤上时,由于弹光效应,光纤上相应位置的折射率将发生变化,并导致光波的相位被调制。由于干涉作用,相位的变化将导致后向散射相干光强的变化。光强变化的时刻与振动的位

置相对应,从而可以得到振动发生的位置信息。

差分曲线的峰值点对应时延 τ 与入侵事件发生点到敏感光纤前端的距离 L 有如下关系:

$$\tau=2nL/c \tag{1}$$

式中: n 为光纤折射率; c 为真空中的光速。而差分曲线的波峰宽度 Δz ,即系统的空间分辨率取决于注入脉冲的宽度 T_p ,有 $\Delta z=cT_p/2n$ 。

M-Z 干涉仪中,激光光源输出的光通过光纤耦合器 1 分为两路光;一路通过光纤耦合器 2 和光纤 A,传送到耦合器 3,另一路通过光纤 B,传送到耦合器 3;在光纤耦合器 3 处两路光汇合产生干涉,经过光纤 C 传输到光电探测器 2。M-Z 干涉仪的输出光强可以表示为:

$$I_2(t)=\text{rect}(t)I_0\{1+\cos[\Delta\varphi(t)]\} \tag{2}$$

式中: $\Delta\varphi(t)$ 为外界振动导致的相位调制; $I_0\text{rect}(t)$ 为光脉冲光强。外界振动发生时,M-Z 干涉仪输出光强的峰峰值会显著增加,根据峰峰值确定振动判断阈值,输出光强峰峰值超过阈值时,认为外界振动发生^[1-2]。

当 φ -OTDR 输出显示外界振动时,可以同时考察 M-Z 干涉仪输出情况,当 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪输出同时表明有振动发生时,进行报警判断,从而有效抑制 φ -OTDR 系统的误报。

2 实验

系统激光光源采用脉冲激光器,中心波长为 1 550 nm,线宽为 1 kHz,光源输出光脉冲如图 2 所示,脉冲宽度为 0.2 μ s,输出峰值功率为 10 mW,重复频率为 10 kHz。光缆总长约 6.5 km,对振动定位的分辨率为 20 m。

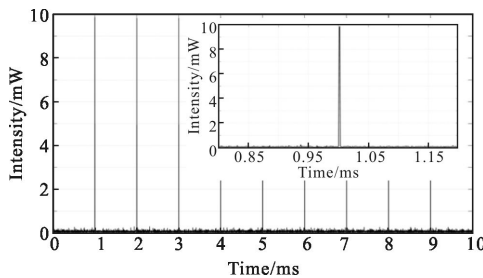


图 2 光源输出脉冲

Fig. 2 Output pulse of the laser

光电探测器 1 和 2 采集光强信号后,通过采集

卡进行 AD 转换,将数字信号输入至计算机进行处理。 φ -OTDR 输出信号采用移动平均与差分进行处理,10 个周期平均后的差值如图 3 所示,其中,振动定位分别为 0.68 km 和 5.85 km。前者为敲击光缆振动信号,而后者为误报。从图 3 所示结果中, φ -OTDR 系统并不能完全有效地区分真实振动和误报。

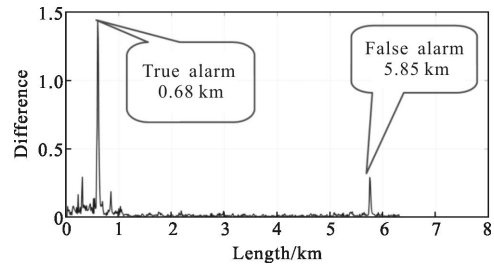


图 3 φ -OTDR 振动定位处理结果

Fig.3 Detection and location of disturbance by φ -OTDR

为了进一步区分外界振动的真实性,应用 M-Z 干涉型分布传感系统对有、无振动条件下定位进行了实验研究,其中,在实验中人为振动通过橡皮锤直接对光缆进行敲击实现。对应的输出信号分别如图 4 和图 5 所示。当有振动发生时,干涉仪输出信号最大值为 0.78 V,最小值为 0.45 V,信号峰峰值差为

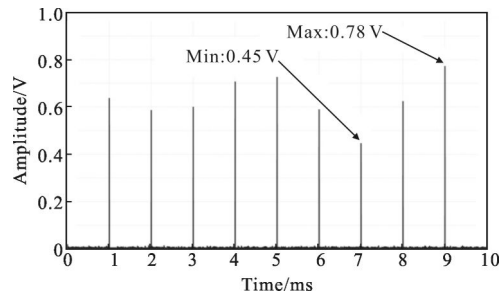


图 4 振动条件下 M-Z 干涉仪输出

Fig.4 Output of M-Z interferometer with disturbance

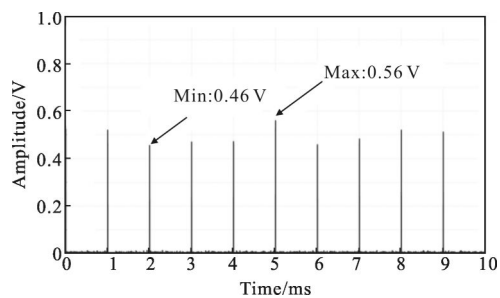


图 5 无振动条件下 M-Z 干涉仪输出

Fig.5 Output of M-Z interferometer without disturbance

0.78-0.45=0.33 V; 而无振动发生时, 信号最大值为 0.56 V, 最小值为 0.46 V, 峰峰值差仅为 0.56-0.46=0.1 V。因此, 可以将 M-Z 干涉仪输出信号峰峰值差作为判断有无振动发生的特征变量。

为了确定判断振动发生的信号峰峰值差的阈值, 将有无振动发生时的 M-Z 干涉仪输出信号峰峰值差进行统计分析, 对有、无振动条件下 M-Z 干涉仪输出信号峰峰值进行了 100 次采样, 采样结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 有振动时 M-Z 干涉仪输出信号峰峰值差的平均值为 0.348 V, 波动量为 0.018 V; 而无振动时, M-Z 干涉仪输出信号峰峰值的平均值为 0.011 V, 波动量为 0.01 V。因此, 实验选定振动判断阈值为 0.32 V, 即 M-Z 干涉仪输出信号峰峰值差 > 0.32 V 时, 认为有振动发生, 否则, 视为误报。

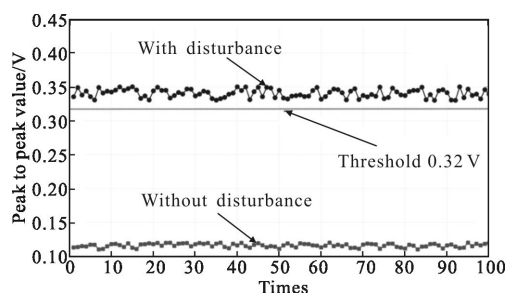


图 6 有无振动条件下 M-Z 干涉仪输出信号峰峰值

Fig.6 Peak to peak value of output of M-Z interferometer with and without disturbance

在实验条件下, 对传统 φ -OTDR 和 φ -OTDR、M-Z 干涉仪复合结构方案分别进行振动和无振动静态测试, 系统运行状态下测试, 分别记录 360 次报警, 单一 φ -OTDR 方案误报率为 90/360=25%; φ -OTDR、M-Z 干涉仪复合结构方案误报率为 7/360 \approx 2%, 通过实验验证了将 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪相结合, 有效地降低了误报率。

3 结论

针对目前 φ -OTDR 光纤分布式振动传感器误报率较高的问题, 文中提出一种基于 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪复合结构方案。 φ -OTDR 用以实现对外界振动的探测和定位, M-Z 干涉仪用以实现对外界振动信号的确认。仅当 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪均探测到振动发生, 系统实施报警。实验结果表明: 在复杂环境下, 与现有 φ -OTDR 方案相比, 提出的基

于 φ -OTDR 和 M-Z 干涉仪复合结构的方案可以有效降低系统的误报率, 使系统的误报率由单一 φ -OTDR 25% 的误报率降至 2%。

参考文献:

- [1] Liang Sheng, Zhang Chunxi, Lin Wentai, et al. Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission Sensor for large structure health monitoring [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(12): 1858-1860. (in Chinese)
- [2] Lin Wentai, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Novel fiber-optic distributed disturbance sensor using a modified phase generation carrier technique [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 282-283: 697-701.
- [3] Liang Sheng, Sheng Xinzhi, Lou Shuqin, et al. Novel extended lissajous figure based location method for fiber optic distributed disturbance sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1897-1901. (in Chinese)
- [4] Zhou Jun, Pan Zhengqing, Ye Qing, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a φ -OTDR with a multi-frequency source [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31 (17): 2947-2954.
- [5] Lu Yuelan, Zhu Tao, Chen Liang, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28 (22): 3243-3249.
- [6] Zhu Tao, Xiao Xianghui, He Qian, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in φ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [7] Qin Zengguang, 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.
- [8] Li Qin, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Localization mechanisms and location methods of the disturbance sensor based on phase-sensitive OTDR [J]. *Optik*, 2014, 125: 2099-2103.
- [9] Li Xiaolei, Sun Qizhen, Wo Jianghai, et al. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30: 1113-11120.
- [10] Zhong Xiang, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4645-4650.