

文章编号: 1001-3806(2013)03-0334-04

基于 Mach-Zehnder 干涉的全光纤防区型周界系统

张睿^{1,2} 江山^{2*} 闫奇众² 印新达² 刘军荣² 熊岩²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉理工光科股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 为了对各种防区进行实时监测, 准确分辨入侵行为, 提出了一种基于非平衡马赫-曾德尔结构干涉原理的全光纤防区型周界报警系统。对这种干涉结构进行了理论分析和实验验证, 并在 LabVIEW 平台上开发了基于此传感结构的防区报警软件。在运行 10d 内, 此系统准确报警率达 95.1%。结果表明, 此系统对突发事件有较好的模式识别能力, 该结构在防区报警系统方面具有较好的效果。

关键词: 传感器技术; 报警系统; LabVIEW; 全光纤防区

中图分类号: TP212.1⁺4 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.015

All-fiber perimeter alarm system based on Mach-Zehnder interference

ZHANG Rui^{1,2}, JIANG Shan², YAN Qi-zhong², YIN Xin-da², LIU Jun-rong², XIONG Yan²

(1. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074, China; 2. WUTOS Technology Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to monitor all kinds of regional perimeter and identify the intrusion accurately, an all-fiber regional perimeter alarm system was presented based on the non-equilibrium Mach-Zehnder interference. Theoretical analysis and experiments were carried out. The alarm software was developed on the LabVIEW platform. The alarm rate of the system reached 95.1% in ten days so that it could distinguish emergencies efficiently and could be used in perimeter alarm system.

Key words: sensor technique; alarm system; LabVIEW; all-fiber perimeter

引言

光纤工艺的提高以及数据处理手段的不断增强, 促进了光纤通信的不断进步。在实时监控领域中, 光纤传感技术也伴随着光纤工艺及信号处理手段的不断提高而成为高新技术。由于光纤具有防电磁干扰、可靠性高、耐腐蚀、体积小、适用于恶劣环境以及价格低廉等等优势, 更是让光纤传感技术具备广泛的应用空间。

分布式光纤传感技术是以光波为信息载体, 以光纤为传输介质, 通过外界信号对光信号的调制及数据处理系统中进行信号解调, 可以达到任意点物理量的测量而没有盲区。目前已经新兴起来的光纤传感技术有: 基于光纤光栅的点式测量技术、基于波分/时分复用的光纤光栅准分布式传感网络、基于白

光干涉原理的多种物理量的绝对测量技术^[1], 以及基于窄线宽光源干涉原理的分布式光纤传感技术。其中利用窄线宽光源干涉原理通过合理搭配器件可以构架出超长距离的相位敏感的分布式周界传感网络。分布式光纤传感技术由于对外界环境扰动相当敏感, 可应用于通信光缆查找、高压电网防卫、输油输气管道保护、国防周界安全、油罐以及隧道报警等等场合, 而目前应用于这些环境中的检测技术成本太高, 并且对事件的判断时间较长以及误报较多等等原因, 不能做到实时监测, 为了能更好地给出制止破坏时间和空间, 需要一种更加灵敏和实时的监测系统^[2]。

因此, 本文中提出了一种基于非平衡马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)结构干涉原理的防区报警系统, 利用外界扰动在光纤上产生的应变效应、弹光效应、泊松效应^[3], 实现对风吹、人为入侵、断纤等波形进行辨别, 从而分辨出真正的入侵行为。基于此原理, 作者根据硬件实验平台制作了一款基于 LabVIEW 的报警系统, 由于外界环境改变的是光信号的相位信息, 因此系统对外界干扰十分灵敏。

作者简介: 张睿(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感系统技术、虚拟仪器测试技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jshan@wri.com.cn

收稿日期: 2012-07-25; 收到修改稿日期: 2012-08-16

1 系统结构及原理

M-Z 干涉仪属于相位调制型光纤干涉传感器中的一种,按其测量物理量的不同,可以将其分为 M-Z 光纤温度传感器、M-Z 光纤压力传感器以及 M-Z 光纤加速度传感器^[4],本系统结构实际上是属于压力传感器中的一种。

1.1 系统结构

整个系统如图 1 所示。A 为仪表内部光学结构及信号采集部分,实现光电转换以及信号采集;B 为由特种光纤制作的振动不敏感光缆,作为控制中心与传感区域的衔接部分;C 为传感防区;D 为数据处理模块及上位机报警软件。

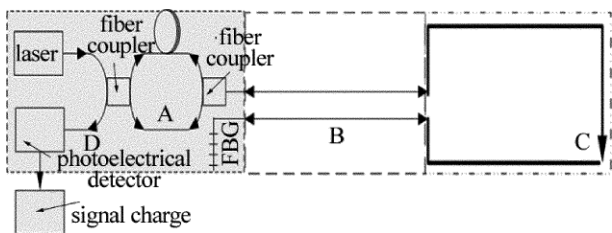


Fig. 1 Structure diagram of system

从光源发出的光信号经非平衡 M-Z 干涉仪两臂经传感盲区,到达传感区域,在采集到外界扰动信息以后,返回并由光电探测器 (photodetector, PD) 进行光电转换,转换以后的电信号送至上位机报警软件进行数据处理,判断出当前防区状态。此系统采用单端方式,满足了大多数应用环境及大部分铺设方式的要求,光纤末端采用特定反射波长的光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 增强反射,降低了光源成本,减小光功率损耗。

1.2 传感原理分析

一般来说,通常外界温度变化与应力应变的改变都将导致光纤物理量的变化,如光纤长度的变化即光纤的应变效应,光纤折射率的变化即光纤的弹光效应,光纤直径的变化即光纤的泊松效应。光纤中这 3 种物理量的变化都将导致光在光纤中传输时的光程发生变化,光波光程变化进而导致光波的相位变化。在某时刻,光纤受到外界扰动,产生的相位变化用下式表示:

$$\Delta\varphi = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L} \right) + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial n} \right) \Delta n + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial a} \right) \Delta a \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为光纤上产生的相位差, β 为光波在光纤中的传播常数, L 为光纤长度, n 为光纤折射率, a 为光纤半径, ΔL , Δn 和 Δa 分别表示差值。其中光纤

长度与折射率的变化较强,其它导致光波相位变化的物理量可以忽略不计^[5-6]。

为便于分析光学原理,将图 1 简化为图 2。其中虚线代表由特种光纤组成的控制中心与防区之间的衔接地带,此区域对外界扰动不敏感。在实际应用中,考虑到激光器光功率较低以及整个系统损耗较大,一方面利用均匀布喇格光栅对特定波长的光可以进行反射的特性^[7],在传感尾端连接光纤光栅以提高反射率;另一方面设计合理的延时光纤长度,以提高系统信噪比^[8]。

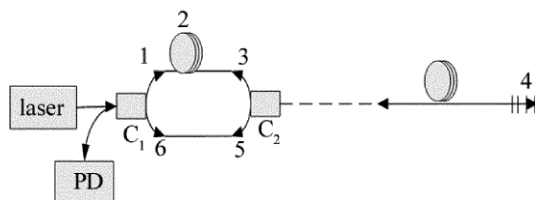


Fig. 2 Principle diagram of optical structure

由光源发出的光经 3dB 耦合器后分为两束光,经光纤光栅反射以后,回到探测器,在此过程中光程有以下 4 种情况: (1) 光源 $\rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$, 探测器; (2) 光源 $\rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$, 探测器; (3) 光源 $\rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$, 探测器; (4) 光源 $\rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$, 探测器。

以上 4 种情况中,光程 (1) 和光程 (4)、光程 (1) 和光程 (2) 以及光程 (3) 和光程 (4) 由于光程不匹配无法发生干涉,只有光程 (2) 和光程 (3) 能发生干涉,光纤延迟线结构起到了光路去相干作用。

在外界干扰过程中,在防区内其光的传输过程可以如图 3 所示。

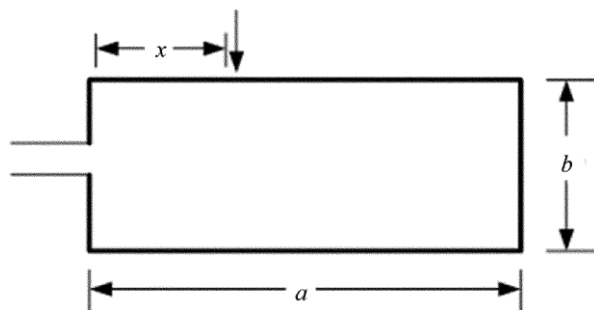


Fig. 3 Principle diagram of external phase modulation

假设外界的调制信号是一个余弦信号:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中, φ_0 为最大振幅, ω 为外界振动信号角频率, t 为某一瞬时时刻。假设防区是一个 $a \times b$ 的矩形,在 x 处发生了扰动,在振动位置与光纤光栅反射回的时间为:

$$T = \frac{2n_{\text{eff}}(2b + a - x)}{c} \quad (3)$$

式中 n_{eff} 为光纤的有效折射率 c 为光在真空中的光速。

光程(2)和光程(3)都将受到两次相位调制,假设光纤延迟线的延时时间为 τ ,光程(3)受到两次调制的时间分别为 t 和 $t+T$,光程(2)受到两次调制的时间分别为 $t+\tau$ 和 $t+\tau+T$ 。此时两束光在耦合器 C_1 发生干涉时,两光束相位差为:

$$\Delta\varphi(\omega, t) = [\cos\omega(t+\tau) + \cos\omega(t+\tau+T) - \cos\omega(t) - \cos\omega(t+T)]\varphi_0 \quad (4)$$

上式经三角函数变换并取绝对值有:

$$\Delta\varphi(\omega, t) = 4\varphi_0 \cos\left(\frac{\omega T}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega T}{2}\right) \times \cos\left[\omega\left(t + \frac{\tau+T}{2}\right)\right] \quad (5)$$

由双光束干涉原理可知,光电探测器接收到的光功率为^[9]:

$$P = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos[\Delta\varphi(\omega, t) + \psi] \quad (6)$$

式中 ψ 为两光束的初始相位差, P_1 和 P_2 为两路信号的光功率。在两束光光强相同的情况下,有:

$$P = 2P_0\{1 + \cos[\Delta\varphi(\omega, t) + \psi]\} \quad (7)$$

式中 P_0 为入射光功率。则探测器光电转化以后的电流值为:

$$I = RP = 2RP_0\{1 + \cos[\Delta\varphi(\omega, t) + \psi]\} \quad (8)$$

式中 R 为探测器的响应度。

由(8)式可知,最终得到的信号分为直流分量及交流分量,外界扰动所引起的相位变化将使探测器接收到的交流分量发生变化。

2 实验研究及数据处理

根据以上原理,在厂区根据实际情况铺设实验光缆,利用 LabVIEW 平台^[10]开发防区报警软件。其中,防区环长 1.3km,光纤延长线采用 200m 的 G.652D 单模裸纤并置于样机内,光源中心波长为 1550nm,出光功率为 10mW, A/D 采集卡选择台湾凌华科技的 PCI-9846,其具有 16 位分辨率,最高采集速率为 40MHz,光电探测器采用昱升光电的 YSPD718,其响应度为 0.96。

在 4 种环境下进行实验,即分别是人为敲击实验、风机模拟刮风实验、人为攀爬实验以及断纤实验,实时记录及处理实验数据,处理多次实验数据,得出系统预警阈值和报警阈值,完成不同环境下模

式识别,其波形如图 4 所示。

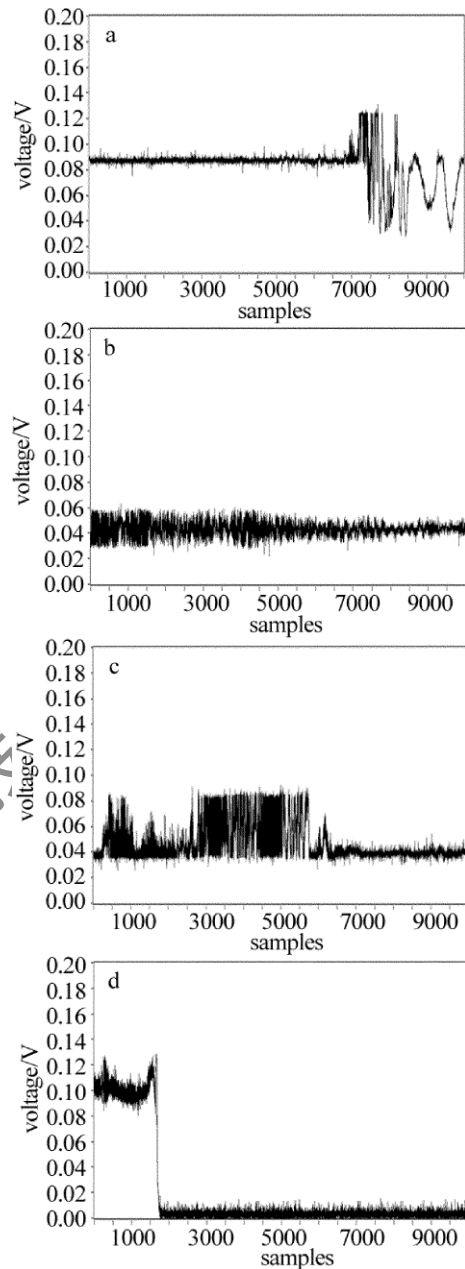


Fig. 4 Experimental waveform

a—artificial beat b—simulating wind with fan c—artificial climb
d—breaking optic fiber

由以上实验波形可知,在人为敲击实验情况下,波形幅值变化达到 0.08V,其实验波形符合理论推导,见图 4a;在进行刮风实验中,该结构采集到波形是连续小振幅,幅值变化小于 0.02V,见图 4b;进行攀爬时,其波形也是连续的,其波形幅值 0.04V,见图 4c;在实际应用中,经常出现光缆被破坏的情况,突发断纤故障,由图 4d 可以看出,幅值突然下降到 0 附近,即整个系统处于无光状态。通过多次实验数据分析,对系统报警阈值进行动态跟踪,如果前后

两个数据的差值大于 0.03V,则系统进入预报警状态,如果前后两个数据的差值大于 0.035V,则系统进入报警状态,实时报警选项卡中防区示意图也将变为红色报警状态,并将当前系统信息列于表格内,同时将此数据保存为 EXCEL 文档方便后期查询,实时报警时,系统将会提示是否进行警报处理。在整个实验中,系统采样率设置为 100kHz,设置阈值为 0.035V,此时屏蔽掉刮风的情况,实现对其它 3 种情况的报警。软件界面如图 5 所示。

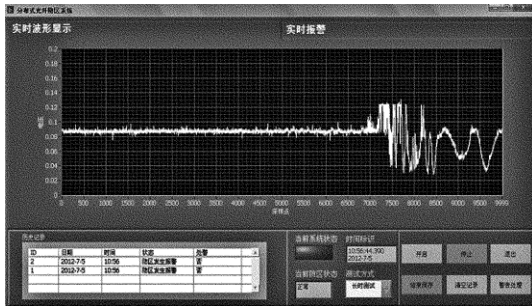


Fig. 5 Alarming interface of beating

3 结束语

经过理论分析和实验验证,系统准确报警率为 95.1%;实验中出现的误报,是由于实验数据中的噪声造成的,建议开发低噪声光电转换电路,在运行 10d 时间内,此系统运行稳定、准确报警率高,说明这种光学结构作为小型的防区周界的可行性高,而

且此系统光学结构简单、反应灵敏、成本较低,可以广泛应用于室内外的小型周界安防。

参 考 文 献

- [1] YUAN L B, YANG J. Optical fiber sensing technology based on white light interferometer[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press 2011: 18-20(in Chinese).
- [2] PENG L, ZOU Q L, ZHANG M *et al.* Developments in and applications of fiber perimeter detection sensors [J]. Laser Journal, 2007, 28(4): 1-3(in Chinese).
- [3] JIANG Y. Advanced optical fiber sensing technology [M]. Beijing: Science Press 2009: 94-95(in Chinese).
- [4] XIAO B. Classification characteristic and application of Mach-Zehnder's optical fiber interferometer [J]. Journal of Changchun University 2005, 15(6): 16-18(in Chinese).
- [5] LIU B, YANG Y F, ZHANG J *et al.* A fiber fence system based on M-Z interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 1013-1017(in Chinese).
- [6] SUN Z F, LIU D M, LIU H R, *et al.* Distributed fiber vibration sensing network perimeter [J]. Study on Optical Communications, 2010, 36(4): 23-24(in Chinese).
- [7] CAI H. spectral simulation of uniform fiber grating based on mode-coupling theory [J]. Journal of Taiyuan Normal University(Natural Science Edition) 2011, 10(1): 120-123(in Chinese).
- [8] HANG L J, HE C F, WU B *et al.* Detection technology of underwater pipeline leakage and its location method [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 376-379(in Chinese).
- [9] JIA B, HUA Zh Y. Beat frequency character and its application for optic-fiber couplers [J]. Chinese Journal of Lasers 2002, 29(7): 605-608(in Chinese).
- [10] LIU Y. Evolving trend and technique of virtual instrument [J]. Instrumentation Technology 2004(5): 61-63(in Chinese).