

分布式光纤周界警戒系统技术研究

余明慧¹, 吴晗平^{1,2,3}, 吕照顺^{1,2}, 王华泽¹, 李军雨^{1,3}

(1. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205;

2. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033;

3. 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:针对传统周界警戒系统中存在的问题和不足,分析了光纤周界警戒系统的基本原理组成和特点,探讨了基于振动感应的光纤光缆传感单元,微应变检测和定位,信号采集与处理,系统信号解调等主要关键技术。并研究了国内外光纤周界警戒技术发展现状,提出了周界警戒产品未来的发展方向。

关键词:光纤传感;定位;信号解调;周界警戒系统

中图分类号:TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.08.001

Research on distributed optical fiber perimeter alarm system

YU Ming-hui¹, WU Han-ping^{1,2,3}, LÜ Zhao-shun^{1,2}, WANG Hua-ze¹, LI Jun-yu^{1,3}

(1. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan institute of technology, Wuhan 430205, China;

2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

3. Faculty of Material and Photo-electronic Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Aiming at the problems and deficiencies in the traditional perimeter alarm system of distributed optical fiber, the basic principles and characteristics of distributed optical fiber perimeter alarm system were analyzed, and its key technologies were discussed, such as optical fiber cable sensing unit based on vibration, micro strain detection and positioning, signal acquisition and processing, signal demodulation etc. The development status of optical fiber perimeter alarm system at home and abroad is also summarized, and the future research direction of perimeter alarm products is pointed out.

Key words: optical fiber sensing; positioning; signal demodulation; perimeter alarm system

1 引言

周界警戒系统是安全报警系统的第一道防线。随着社会的发展,科学技术的进步,军事要地、重要的设施、电站、易燃易爆物资仓库等都需要用周界入侵警戒系统进行有效的防范,确保其安全。因此,周界入侵警戒系统越来越受到各方面的重视,用户需求迫切。

传统的周界安防警戒系统采用主动红外线对

射、微波主动对射、振动电缆、电子围栏和电网等,虽然它们达到了一定的安全防御效果,但是还存在一些技术缺陷。例如主动红外线对射的围栏警戒系统的防护等级较低,容易跨越,受地形条件限制及恶劣气候变化影响,误报率高。微波主动对射围栏警戒系统,微波产生的电磁辐射对人体有伤害,系统易受周围建筑物强电磁干扰的影响,误报率高。振动电缆、电子围栏和电网等围栏警戒系统,传感部分都是

作者简介:余明慧(1990-),女,硕士研究生,目前研究方向为光纤传感监测系统技术。E-mail:593678587@qq.com

通讯作者:吴晗平(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。

E-mail:wuhanping601@sina.com

收稿日期:2015-01-09

有源,系统功耗很大,同时它们又易受电磁辐射和噪声干扰等影响,使得灵敏度下降,误报率、漏报率提高,且感应范围小、目标识别能力弱。传统的周界安防围栏警戒系统存在探测距离短、误报率高、容易遭受雷击等诸多不足,导致在实际应用中存在一定的局限性^[1]。因此,数字化、集成化、网络化、智能化的光纤周界安防系统必将成为未来周界安防产业的发展趋势。

2 系统组成、工作原理及技术分类

光纤具有非常优异的应力敏感特性,能够实时监测作用于光纤上的压力或光纤附近的振动,具有极高的传感灵敏度。分布式光纤振动传感器利用特殊光纤作为传感元件,将“传”和“感”合为一体,传感光纤在外界因素(如温度、压力和振动)的作用下,改变光纤中的光纤相位,从而对外界参数进行检测。

2.1 系统组成与工作原理

光纤周界警戒系统是利用激光、光纤传感和光通信等技术构建的安全警戒系统。一套完整的基于分布式光纤传感的监控预警安防系统由以下几个主

要模块组成:光源发射模块、传感光路模块、信号检测模块、信号采集模块、信号传输模块及信号处理模块。如图 1 所示。

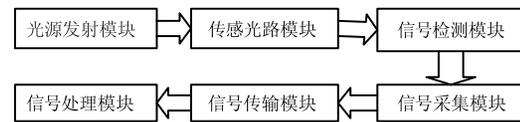


图 1 系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of the system

系统在区域四周安装探测光缆,通过铺设传感光缆,实时感应周围压力、振动等情况,根据信号特征值对入侵源进行识别并对人员非法入侵进行报警,并与视频监控系统及报警器联动。

2.2 技术分类

近年来,光纤传感周界入侵警戒系统得到了快速地发展,当前技术主要有以下几大类^[2]:①基于干涉原理的分布式光纤传感入侵系统;②基于光时域反射定位(OTDR)技术的光纤周界警戒系统;③基于多模光纤相干技术的光纤周界警戒系统;④基于光纤光栅传感技术的光纤周界警戒系统。表 1 是对主要光纤周界系统的技术分类及分析。

表 1 光纤周界警戒系统的技术分类及分析

Tab. 1 Technical classify and analysis of fiber perimeter system

技术类型	主要技术分类	原理	优点	缺点
基于光纤干涉	Mach-Zehnder Sagnac Michelson Fabry-perot	光纤相位调制机理	1) 探测距离远、成本低; 2) 灵敏度根据实际情况可调; 3) 安装方便、易于维护。	1) 易受温度和偏振态变化影响; 2) 多点扰动的定位能力差。
基于光时域反射定位技术(OTDR)	B-OTDR Φ-OTDR P-OTDR	背向散射光干涉效应	1) 只需采用单根光纤; 2) 监测距离长,可达几十公里; 3) 实现入侵源位置定位。	1) 对光源和探测器要求高; 2) 对于多点扰动识别比较困难。
基于多模光纤相干技术	Multimode-fiber	多模光纤中传播光相干	1) 使用多模技术,成本较低; 2) 探测光相干引起的扰动即可获得入侵信息。	1) 探测距离短; 2) 不具有分布式功能。
基于光纤光栅传感技术	FBGS	光纤光栅传感原理	1) 可精确定位; 2) 抗干扰能力强; 3) 传感单元独立。	1) 必须采用宽带大功率光源; 2) 系统成本较高。

3 系统主要关键技术

光纤传感周界安防系统,是利用激光、光纤传感和光通信等高科技技术构建的智能警戒网络和安全警戒系统。系统关键技术主要有:基于振动感应的光纤光缆传感单元,微应变检测和定位,光纤入侵信号采集与处理,系统信号解调技术,系统作用距离,恶劣环境影响及其对策等。本文主要对前面四种关键技术进行研究。

3.1 振动传感单元

分布式光纤传感器技术利用光波在光纤传输中可沿光纤的几何分布的特性,完成对待测物理量(如温度、压力、应力和应变等)的实时动态监测。分布式光纤传感器除了具有抗电磁干扰、绝缘性好、耐腐蚀、带宽大、损耗低、灵敏度高和易于长距离传输等优点外,其最显著的特点就是能够进行连续分布式长距离测量,数据处理简单,实时性强。分布式

光纤传感器的工作原理主要基于光的反射和干涉,在光纤干涉传感技术中,目前已经研制成功并应用于光纤传感器的光学干涉仪包括马赫-曾德(Mach-Zehnder)干涉仪、萨格奈克(Sagnac)干涉仪、迈克尔逊(Michelson)干涉仪、法布里-珀罗腔(Fabry-perot)干涉仪等^[3]。表2对几种干涉型光纤振动传感器性能进行了比较。

表2 干涉型光纤振动传感器性能比较

Tab. 2 Performance comparison of interferometric fiber optic vibration sensors

方法	灵敏度	抗干扰能力	优点	缺点
Mach-Zehnder	较高	较强	1) 光路结构简单,对光源要求不高; 2) 解调技术简单,具有较好的振动特性。	1) 使用光纤较多,安装使用麻烦; 2) 两臂难以满足对称的要求。
Sagnac	高	强	1) 信噪比和准确率相对较高; 2) 能制成高性能低成本器件。	1) 定位算法复杂; 2) 不适于高频信号传感。
Michelson	高	强	1) 光信号损耗小; 2) 结构简单,只需一个3dB耦合器;	1) 部分光会反馈进入光源; 2) 难保证两束光的强度相等。
Fabry-perot	高	一般	1) 结构简单,体积小; 2) 响应,可靠性高。	1) 制作工艺难度较大; 2) 元件的非线性,使信号失真。

光纤 M-Z 干涉仪具有灵敏度高且光路结构简单,对光源的相干度要求不高,解调技术相对简单,具有较好的振动传感特性。图2是它的原理图。其基本原理是:发射激光器发出直流单色光波,经第一个3 dB耦合器后进入两根长度基本相同的传感光纤,一根作为信号臂,另一根则为参考比。光纤受到外界振动干扰后,引起光波相位变化,形成相位调制传感信号,传送至光电探测器,检测干涉光信号的光强变化,经过信号处理后实现报警。



图2 光纤 M-Z 干涉仪的原理图

Fig. 2 Principle diagram of optical fiber M-Z interferometer

设两束相干光的光强分别为 I_1 和 I_2 ,当信号臂中传输的光受到压力、振动等外界物理量的调制作用时,导致干涉仪中信号臂光纤长度 L 、折射率 n 、芯径的改变,从而使得信号臂中所传输光的相位也随之改变,而此时参考臂中传输的光并未受到外界因

素的影响即相位不发生变化,所以这两束光必然会有相位差的存在,两束光在 3 dB 耦合器处汇合并发生干涉,则干涉场中各点的光强表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (1)$$

其中, $\Delta\phi$ 是由于外界参量调制信号臂中传输的光造成的相位差,由上式可得出干涉光强 I 随 $\Delta\phi$ 的改变而改变。反过来,一旦 I 的变化被检测到,利用式(1)可反得到两束光之间 $\Delta\phi$ 变化的信息。

3.2 微应变检测与定位

如图3所示,系统采用双 M-Z 干涉型分布式光纤传感器。系统包括激光光源、耦合器、传感光纤、引导光纤和探测器。系统工作原理如下:激光光源发出的光经过耦合器1后,以 1:1 的比例分成等功率的两束光分别进入耦合器2和3,同时从正反2个方向通过 M-Z 干涉仪,并从耦合器2和3的另一端拾取两路光信号,并送入光电探测器1和2后,由信号处理模块进行处理。

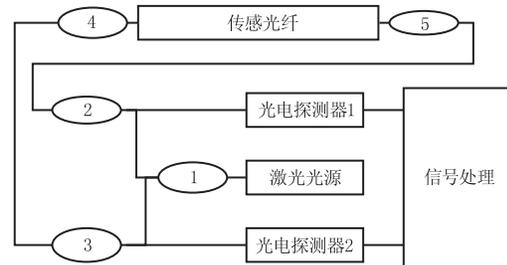


图3 双路 M-Z 干涉仪定位原理图

Fig. 3 Positioning diagram of dual M-Z interferometer

当传感光纤上 P 点发生振动时,MZI 中顺时针方向传播的光和逆时针方向传播的光同时产生相同的相位改变 $\Delta\phi$,但 P 点到达光电探测器 PD2 和 PD1 的距离不同,所以 PD1 和 PD2 接收到的信号之间必定存在时间差 Δt 。设传感光纤长度为 L ,引导光纤长度为 d ,发生振动点 P 的位置离耦合器4的距离为 x ,忽略其他光纤的长度,则时间差:

$$\Delta t = \frac{L + Ld - 2x}{v} \quad (2)$$

$$\text{得出: } x = \frac{1}{2}(L + Ld - \Delta tv) \quad (3)$$

因此,只要测得时间差 Δt 就可以得到发生振动干扰的位置。

时间差 Δt 的测量方法有阈值对比法和信号相关运算法。阈值对比法当两列波分别到达设定的同一个阈值时,其触发时刻的差值就是所求时间差。信号相关运算法是通过计算两个信号的相关函数来确定它们的相似性,在两个信号同源的情况下,相关函数的峰值点所对应的延时就是两个信号的时

差^[4]。相关运算法与阈值对比法相比具有显著的优点:①时间差 Δt 的计算精度高,可达到单位采样时间;②抑制噪声能力较强,无关信号造成的影响可忽略;③不必设置阈值。

3.3 信号采集与处理

分布式光纤振动传感器的信号采集与处理是关键技术之一。图 4 是信号采集与处理框图,数据采集与处理系统主要由传感器、信号调理、数据采集设备及计算机组成。

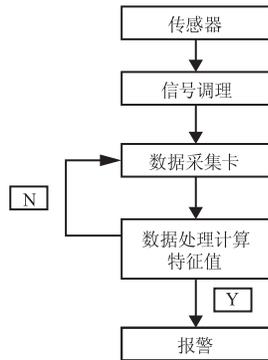


图 4 数据采集与处理系统组成

Fig. 4 Datas acquisition and processing system

传感器将物理信号转换为数据采集设备可以识别的电压或电流信号。由于某些输入的电信号不便于直接进行测量,因此需要加入信号调理设备对它进行放大、滤波、隔离等处理,使得数据采集设备便于对信号进行准确测量。数据采集设备采集原始输入的模拟电信号并将其转换为数字信号给计算机进行处理。计算机上安装应用软件对接收到的原始数据进行解调得到波长值,并对波长值进行信号处理计算特征值,最后对分析出的报警情况做出相应的处理。

3.4 信号解调技术

该技术是从探测干涉仪中的光强解调出相位信息以实现监测外界环境。从光电探测器输出的光电流中解调出被测振动信号的方法较多,近年来国内外机构进行研究,形成了多种解调方法。主要有零差解调法和外差解调法。表 3 对各种解调方法的主要特性进行了比较^[5-9]。

零差解调法是指信号臂的信号光与参考臂的参考光频率差为零的解调方法。零差解调法又分为主动零差法和被动零差法。主动零差法又称为相位跟踪检测法,包括直流相位跟踪 (PTDC) 和交流相位跟踪 (PTAC)。主动零差法优点是结构简单、成本低、插入损耗小等特点。缺点是光纤传感器的动态范围受到反馈电路的限制,且易受光功率波动的

影响。

表 3 解调方法比较

Tab. 3 Comparison of demodulation methods

解调方法	有无反馈系统	传感器是否有源	系统复杂程度	是否需要特殊干涉仪	信号的失真性
主动零差法	有	无	低	否	好
被动零差法	无	有	低	否	差
经典外差法	无	有	中	否	差
合成外差法	无	无	高	否	差

被动零差法是在干涉仪光路中不加移相器不控制工作点。此时干涉仪因受到外界环境影响,两臂输出的光波相位差将不停的变化,且干涉仪一个臂的输出减弱时,则另一臂的输出增强。使用这两个信号进行解调,可以使系统始终保持最佳的灵敏度。被动零差法解调电路比主动零差法的解调电路复杂得多。

外差解调法是信号光与参考光的频率差不为零的解调方法。外差解调法分为经典外差法和合成外差法。其缺点是功耗大,光学器件插入光纤会带来负面影响。

合成外差检测技术 (SHET) 利用压电陶瓷对干涉仪进行相位调制后经过滤波、混频等一系列信号处理,最后合成一个与经典外差法中类似的输出信号,再利用 FM 解调技术把信号解调出来。

4 光纤周界警戒系统国内外研究现状

20 世纪 90 年代中期,发达国家已经将光纤传感技术用于周界警戒系统中。国外研究比较多的是基于 Sagnac 的干涉型光纤周界警戒系统和将两种不同的干涉仪结构结合在一起的传感结构,如 Mach-Zehnder 和 Sagnac 相结合、Michelson 和 Sagnac 相结合使用、两个 Sagnac 结构相结合。目前能掌握该技术的主要有澳大利亚、美国、以色列等。

处于世界领先地位的澳大利亚的 FFT (Future Fiber Technolog) 公司拥有先进的入侵检测和定位系统^[10]。系统是基于 M-Z 干涉技术的分布式光相位传感系统,主要由微应变传感器和定位装置组成,其研制的光纤周界警戒系统 Secure Fence 每个控制单元的光纤链路长可达 80 km,能够实现较长距离的周界监测,定位精度达到 25 m,报警概率可大于 95%,误报率小于 3%^[11]。但是,相位解调技术复杂,无法实现更高的定位精度。

美国 Fiber Sensys 公司研发生产的光纤安全防护网络 (FSN) 是由主机模块和最多 127 个报警处理

单元及输入/输出模块组成。通讯光纤作为数据传输通路,把所有的模块连接起来。该产品是美国唯一通过军标认证的产品,美国空军基地 90% 以上的周界使用该系统维护。系统防区数目为 90,防区长度最长可达 5 km,反应时间最长为 2 s。但是系统成本高,维护难。

以色列 Magel 有限公司开发的 Intelli-FIBER 振动传感光缆探测系统防区数目为 64,单防区最长 1000 m,响应时间最短可达 0.5 s,可以独立布防也可以联合组网^[10]。

国内光纤周界系统的研究主要集中在院校,如复旦大学研究了基于 Sagnac 和 M-Z 干涉技术的定位技术^[12]、华中科技大学研究了一种混合波分/时分复用的传感无源光网络概念,并实现了长距离大容量的周界警戒系统^[13]、南开大学对 M-Z 干涉原理的分布式光纤传感系统中微振动信号进行了时频分析,将振动信号进行模式识别从而实现智能环境感知^[14]、北京交通大学研究了一种适用于通信与传感领域的单光纤与单光栅光缆安防系统,实现了单根光纤构成干涉场用来探测入侵与定位^[15]。在当前国内周界警戒领域中,分布式光纤周界警戒系统已经得到了广泛的应用,如:金融机构、军事基地、重要港口、核电站、边境等军事和民事领域。

近年来,我国光纤周界警戒产品虽然在短期内取得了较好的成绩,但是在迅速发展的同时,也存在诸多的不足之处。主要表现为以下几个方面:①科研投入不足,自主创新能力薄弱;②易产生误报且价格偏高;③产品环境适应性差。

5 光纤周界警戒技术发展趋势

最近几年来,随着国内安防市场需求的不断增长以及相关技术的快速发展,国内安防行业的总体发展趋势可以总结为数字化、智能化、网络化等等。

(1) 数字化

安防监控产品采用的模拟摄像机其功能、图像分辨率都很单一,无法满足现代安防系统对图像质量、图像清晰度、安防特色功能的需求。随着信号采集、处理、分析、传输和显示技术的成熟,模拟摄像机将会逐步被全数字化的 IP 摄像机取代,IP 摄像机更高的图像质量和图像分辨率,视音频不再采用模拟同轴电缆输入,而是通过各种 IP 网络,从而完成安防产业技术的数字化进程。

(2) 智能化

智能安防为安防行业带来一系列的变革,打破了安防系统的传统思维,拓宽了周界警戒产品的应

用领域。现今智能安防已经在网络视频监控系统、门禁系统、防盗警戒系统得到了应用。随着物联网的不断发展,未来的安防必将整合在物联网的大平台下。通过智慧传感芯片,将信息进行及时感知,实时传送,让人与物能够实时的智慧互动,为我们带来一个安全和智慧的新安防时代。

(3) 网络化

周界警戒产品的网络化可以分为两个层面,一是安全防范技术的网络化,主要表现是安防系统的结构由集总式向分布式过渡,分布式的设计有利于合理的设备配置和充分的资源共享,它将导致安防系统实现各种子系统真正意义上的集成。另一个是安全行业服务的网络化,随着网络技术的飞跃发展,网络的信息服务功能也在不断的增强,奠定了安防行业服务网络化的基础。

6 结 语

光纤周界警戒系统作为新一代安防监测系统将以高可靠性、高灵敏度、高性价比等优点获得了广泛的市场认可,成为了周界安防领域的新产品类型。但是目前还有许多技术问题有待解决,比如在各种复杂环境下如何保证系统可靠性等。如果将这些问题解决了,光纤周界警戒产品将会创造更大的经济效益及社会价值。

参 考 文 献:

- [1] XING Dongsheng. Detector selection principles and discusses the development trend of Perimeter alarm[J]. China's security, 2008, (3): 67 - 70. (in Chinese)
幸东升. 周界报警探测器选择原则与技术发展趋势探讨[J]. 中国安防, 2008, (3): 67 - 70.
- [2] XIANG Bayi, XU Fangchen. Technology present situation and market prospect analysis of optical fiber perimeter security system[J]. China's Security, 2014, (1): 85 - 89. (in Chinese)
邢八一, 徐方辰. 光纤周界安防系统技术现状及市场前景分析[J]. 中国安防, 2014, (1): 85 - 89.
- [3] CHEN Yi. Real-time signal processing of optical fiber vibration sensing system[D]. Chengdu: electronic science and technology university, 2013. (in Chinese)
陈怡. 光纤振动传感系统的实时信号处理[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [4] JIANG Changdong. Localization algorithm research of continuous distributed optical fiber sensing security system [D]. Dalian: Maritime University of Dalian, 2013. (in Chinese)
姜长冬. 连续分布式光纤传感安防系统定位算法的研

- 究[D].大连:大连海事大学,2013.
- [5] LI Binxiang, DAI Wenrui, LI Jie. All fiber and zero differential mathematical model of the Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensor Technology*, 1994, (5): 18 - 21. (in Chinese)
李斌祥, 戴文瑞, 李杰, 等. 全光纤零差式 Mach-Zehnder 干涉仪的数学模型[J]. *传感器技术*, 1994, (5): 18 - 21.
- [6] Charles B C, Robert M K, Steven L G. A symmetric analogue demodulator for optical fiber interferometric sensors [C]. *Proceeding of the 34th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1991, 2: 666 - 671.
- [7] ZHAO Yucheng, WANG Hu, JIAN Shuisheng. Mach-Zehnder optical fiber interferometer zero-detection scheme [J]. *Communication Technology*, 1994, 18 (3): 186 - 191. (in Chinese)
赵玉成, 王琥, 简水生. Mach-Zehnder 光纤干涉仪零检测方案[J]. *光通信技术*, 1994, 18(3): 186 - 191.
- [8] TANG Xiaoqi, TANG Ji. Research for Mach-Zehnder optical fiber interferometer phase carrier modulation and demodulation scheme [J]. *Journal of Measurement*, 2002, 23 (1): 10 - 12. (in Chinese)
唐晓琪, 唐继. Mach-Zehnder 光纤干涉仪相位载波调制及解调方案的研制[J]. *计量学报*, 2002, 23 (1): 10 - 12.
- [9] Charles B C, Robert M K, Steven L G. A symmetric analogue demodulator for optical fiber interferometric sensors [J]. *Proceeding of IEEE*, 1992: 666 - 671.
- [10] The Secure Fence Fiber Technologies corporation [EB/OL]. (2009 - 11 - 9). <http://www.fftsecurity.com>.
- [11] Seedahmed S. Mahmoud, Jim Katsifolis. Fiber Optic Sensor and Application [C]. *Proc. of SPIE 2009*, 7316: 731604.
- [12] XU Haiyan. Research on distributed optical fiber vibration sensor and positioning technology [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
徐海燕. 分布式光纤振动传感器及其定位技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [13] SUN Zhifeng. Intrusion system of distributed optical fiber vibration sensing network [D]. Wuhan: Science and Technology of Huazhong University, 2010. (in Chinese)
孙志峰. 分布式光纤振动传感网络周界防入侵系统 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [14] WANG Li. Based on the intelligent environment perception of distributed optical fiber sensing technology research [D]. Tianjin: Nankai University, 2008. (in Chinese)
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.
- [15] LAN Tian, ZHANG Chunxi, LI Lijing, et al. All fiber perimeter security system [J]. *Optical Technology*, 2008, 34 (2): 259 - 261. (in Chinese)
蓝天, 张春熹, 李立京, 等. 全光纤周界安全防范系统 [J]. *光学技术*, 2008, 34(2): 259 - 261.