

# $\phi$ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展

刘建霞<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 黑龙江科技大学电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; <sup>2</sup> 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 相位敏感光时域反射计( $\phi$ -OTDR)因其优良的综合性能成为目前最主要的入侵和振动分布式传感监测方法之一。总结了 $\phi$ -OTDR分布式光纤传感监测系统的光源技术、传感头技术和信号解调技术的研究进展,对各部分的最新研究成果进行了评述,对其创新性和存在的问题进行了分析。阐述了微分振幅检波技术和直接相位解调技术的工作原理,并对两种解调方法进行了比较:微分振幅检波技术从散斑图样来解调相位信息是艰难的,它是一种非直接的、定性的测量方法;直接相位解调技术是一种直接的、定量的测量方法,可以应用于动态测量以及光纤水听器中,但受相干散斑衰落的影响较大。最后展望了基于 $\phi$ -OTDR的分布式光纤传感监测技术的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤传感器; 相位敏感光时域反射计; 微分振幅检波; 直接相位解调

**中图分类号** O436      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/LOP50.080021

## Research Progress of Distributed Optical Fiber Sensing and Monitoring Technology based on $\phi$ -OTDR

Liu Jianxia<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Electronic and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China  
<sup>2</sup> College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** Phase-sensitive optical time domain reflectometer  $\phi$ -OTDR is one of the most important means of distributed sensing and monitoring for intrusion and vibration due to its excellent overall performance. This paper explains the research progress of the source technology, the sensing technology and the signal demodulation technology of the distributed optical fiber sensing and monitoring system based on  $\phi$ -OTDR, reviews the newest research results, and analyzes their innovativeness and existing problems. The principles of differential amplitude detection and direct phase demodulation are explained, and the difference between these two kinds of demodulated methods are compared. It is hard to demodulate the phase signal only from the speckle using differential amplitude detection, and this scheme is just an indirectly and qualitatively measuring method. Direct phase demodulation is a directly and quantitatively measure method, and can be use in dynamic measurement or fiber hydrophone, etc., but the influence of fading noise resulting from the inner pulse interference of Rayleigh scattering beams is obvious. Finally, the prospect of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on  $\phi$ -OTDR is set forth.

**Key words** fiber optics; distributed optical fiber sensors; phase-sensitive optical time domain reflectometer; differential amplitude detection; direct phase demodulation

**OCIS codes** 040.1880; 230.0250; 250.4745

## 1 引言

加强国境防范、提高能源安全、改善社会治安等是社会稳定、经济快速发展的基本要求。军事国防、大型工矿、民用安防等多个领域的一些重要基地设施的周界安全监测,是避免造成重大经济损失、维护社会稳定发展的有效手段。随着社会的不断发展,人们的安防意识不断提高,各种周界安全监测技术也在不断发展。基于光时域反射计(OTDR)的光纤入侵传感器系统,具有分布式、高灵敏度、监测范围广、可隐蔽、不受地形地貌限制等优势,在周界安防入侵监测方面极具潜力,已成为人们的研究热点<sup>[1-3]</sup>。

**收稿日期**: 2013-03-07; **收到修改稿日期**: 2013-04-17; **网络出版日期**: 2013-06-04

**作者简介**: 刘建霞(1979—),女,硕士,讲师,主要从事光纤传感与特种光纤特性等方面的研究。

E-mail: fiber\_ljx@126.com

相位敏感 OTDR ( $\phi$ -OTDR) 与传统型 OTDR 最大的不同就是采用了相干光源, 并且要求光源具有窄线宽和低频漂特性。为此, 前人采用了不同的激光器作为  $\phi$ -OTDR 系统的光源, 比如脉冲调 Q YAG 激光器、脉冲半导体激光器、单频连续波 (CW) 半导体激光器、Er 光纤激光器等。为了实现长距离监测, 人们提出采用大功率超窄线宽单模光纤激光器作为光源。为了提高  $\phi$ -OTDR 的定位精度和检测灵敏度以实现微小振动信号的传感, 研究人员对  $\phi$ -OTDR 的传感和信号解调方面也做了大量的研究工作, 例如提出传感头采用纤维强化树脂对光缆进行封装、提出采用小波变换理论对  $\phi$ -OTDR 系统的信号进行前期降噪处理等。目前,  $\phi$ -OTDR 系统的信号解调方法主要有振幅检波和相位检波两种。按检测光路的不同又可以分为直接检波和相干检波。当前,  $\phi$ -OTDR 的热点问题是如何实现长距离监测和微小振动信号传感。因此, 本文主要围绕这两点分别对  $\phi$ -OTDR 的光源技术、传感头技术和信号解调技术的最新研究进展进行说明, 并指出了  $\phi$ -OTDR 分布式传感技术实用化研究的发展趋势。

## 2 $\phi$ -OTDR 的光源技术

以脉冲激光器或 CW 激光器作为光源的  $\phi$ -OTDR 分布式传感系统已被证明可以用来检测并定位拉伸或加热引起的相位扰动<sup>[4]</sup>。使用半导体脉冲激光器作为光源的  $\phi$ -OTDR 分布式传感系统可用于检测由温度快速变化引起的光相位变化。由环形激光器与声光调制器组成的  $\phi$ -OTDR 分布式传感系统用于检测由光纤受到扰动引起的光相位扰动。由光纤激光器与电光调制器组成的  $\phi$ -OTDR 分布式传感系统<sup>[5]</sup>, 采用两级放大, 定位精度为 1 km, 定位范围为 12 km; 采用三级放大<sup>[6]</sup>, 定位精度为 20 m, 定位范围为 100 km。

随着光纤制备工艺的提高, 瑞利散射光强越来越小, 而使用过多的光大会引入一定程度的噪声。因此, 大功率激光器对于长距离传感是一种非常好的选择。2008 年, 谢孔利等<sup>[5]</sup>提出了一种采用大功率超窄线宽单模光纤激光器作为光源的  $\phi$ -OTDR 分布式传感系统。激光器结构如图 1 所示。

激光腔由两个光纤布拉格光栅 (FBG) 与一段很短的高增益有源光纤熔接在一起组成, 超窄带光纤布拉格光栅 (NB-FBG) 和另一个宽带、高反射率的光纤布拉格光栅 (WB-FBG) 形成激光腔, 该激光器的线宽  $\Delta f \leq 3$  kHz, 频率漂移很小, 在正常的实验室条件下为 1 ~ 1.5 MHz/min, 输出功率为 50 mW。实验系统结构框图如图 2 所示。光纤激光器发出的连续光, 经过电光调制器 (EOM) 后产生光脉冲, 光脉冲被掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大, 由带通滤波器 (BPF, 包含 FBG 的结构) 滤除自发辐射光后通过一个 3 dB 耦合器进入传感光缆。用带有前放和滤波功能的光电探测器探测后向瑞利散射光, 采用 300 kHz 的低通滤波, 用采样率为 50 MS/s 的数据采集卡 (DAC) 采集数据, 并用 Matlab 软件处理数据。传感光缆采用普通单模光纤制成的直径 3 mm 的细光缆, 并埋设于室外。定位精度可达到 50 m, 定位范围可达到 14 km, 信噪比约为 12 dB, 且灵敏度较高。

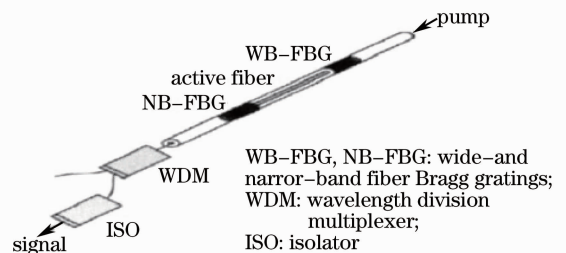


图 1  $\phi$ -OTDR 激光器结构<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Laser configuration for  $\phi$ -OTDR<sup>[5]</sup>

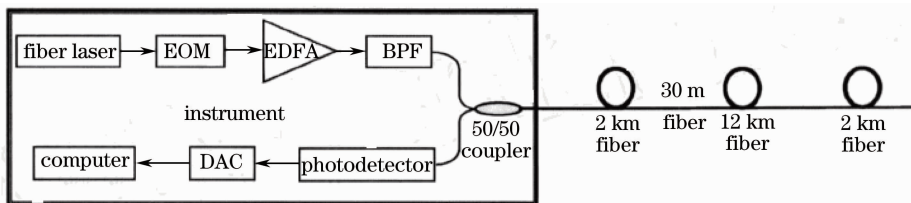


图 2  $\phi$ -OTDR 实验系统结构框图<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Experimental setup of the  $\phi$ -OTDR system<sup>[5]</sup>

2010 年, 高存孝等<sup>[7]</sup>报道了一台适用于分布式光纤传感的大功率全光纤激光器, 激光器结构如图 3 所示。激光器基于主振荡功率放大 (MOPA) 技术, 种子光源为半导体激光器, 放大器为 EDFA。实现了重复频率和脉冲宽度分别独立可调的激光输出, 中心波长为 1550 nm, 光谱的 3 dB 带宽小于 0.2 nm, 获得的最高峰

值功率为 1.1 kW,输出的激光脉冲中放大自发辐射(ASE)功率分数的最大值低于 10%。

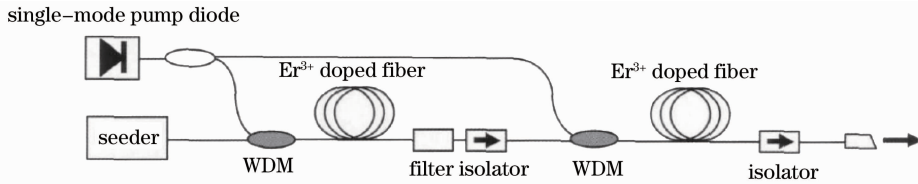


图 3 全光纤脉冲 MOPA 激光器结构<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Configuration of all-fiber pulse MOPA laser<sup>[7]</sup>

显而易见,为了实现长距离传感,采用大功率光纤激光器是必然趋势。然而,这同时也会激起光纤中的非线性效应,如受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)。其中,SBS会使传输功率受到限制,引起信号噪声,给信号处理带来困难,降低传感系统的检测灵敏度。为了使光纤放大器的高输出功率能够有效地注入单模光纤,必须提高 SBS 门限功率。采用的方法主要是对信号光源做附加调制或对外调制器做附加调相,使入射光的谱宽增大。

### 3 $\phi$ -OTDR 的传感头技术

起初在  $\phi$ -OTDR 系统中,传感头部分采用的是一根普通的单模光纤,窄带的短光脉冲被发射到探测光纤中,产生背向瑞利散射,返回的瑞利散射的波形由于不同散射中心的相干作用被调制成锯齿状。当光纤线路上的某个位置发生扰动时,由光纤相应位置折射率的变化导致该处光相位发生变化,从而导致背向散射光光强的变化。已有研究证明,系统对于足以引起损耗的干扰,光强变化明显,而对于微小振动信号,效果并不能令人满意<sup>[8]</sup>。但由于使用时域反射技术,系统定位精度较高。为了提高对微小振动信号的传感灵敏度,就必须解决信号处理和传感头敏感度等问题。

2009 年,罗俊等<sup>[9]</sup>提出采用纤维强化树脂(FRP)对光缆进行封装来提高入侵探测的灵敏度<sup>[9]</sup>。该传感系统在 2 km 和 6 km 处均能获得较高信噪比的扰动信号,能有效地预报和定位微扰的发生,而且该系统的成本得到了有效的控制。系统的监测范围达到了 8 km,定位精度达到了 100 m。

FRP 材料是由纤维和树脂组成的复合材料。FRP 材料和光纤复合得很好,与裸光纤的应变敏感性基本一致,而比普通通信光缆应力敏感性高很多。图 4 为普通通信光缆和 FRP 封装光缆的对比测试结果,可以看出,对于相同的外力,FRP 封装光缆干涉条纹空间频率的变化是普通通信光缆的 5 倍左右。同时 FRP 材料的高强度能够保证传感光纤很难被破坏,而且普通光缆埋于地下太久会因为渗水的原因导致损耗加大,而 FRP 封装光缆的全实心结构能够很好地防止渗水的发生。

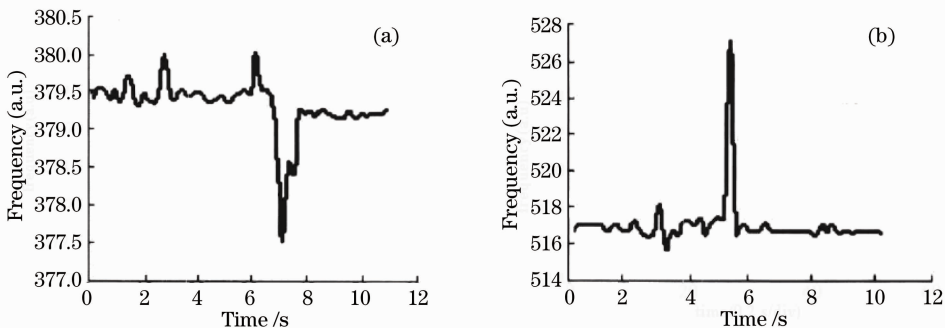


图 4 光缆应力敏感性对比测试。(a) 普通通信光缆;(b) FRP 封装光缆

Fig. 4 Comparison of the fiber cable stress sensitivity. (a) Ordinary communication fiber cable;  
(b) FRP encapsulated fiber cable

增强传感头的感知能力是提高  $\phi$ -OTDR 系统检测灵敏度的有效手段。选择新型涂层封装材料,在提高传感光纤感知能力的同时又能增强传感光纤的强度,保证传感光纤不被破坏是  $\phi$ -OTDR 传感头技术的关键问题之一。

## 4 $\phi$ -OTDR 的信号解调技术

### 4.1 信号解调与定位原理

$\phi$ -OTDR 系统通过分析光纤中背向散射光信号的光功率沿时间轴的分布曲线实现对扰动信号的检测和定位。系统采用超窄线宽脉冲激光器作为光源,输出的是光脉冲宽度范围内反射回来的瑞利散射光相干涉的结果。因此可以将脉冲宽度按 1:1 切分成两部分,则实际上发生干涉的光可以等效为这两部分脉冲光整体分别对应的瑞利背向散射光的自相干和互相干的结果。探测器接收到的光信号可表示为<sup>[10]</sup>

$$I_{\text{total}} = I_{\text{RB}} + I'_{\text{RB}} + 2\gamma(\tau_{\text{RB}} - \tau'_{\text{RB}}) \sqrt{I_{\text{RB}} I'_{\text{RB}}} \cos(\varphi_{\text{RB}} - \varphi'_{\text{RB}}), \quad (1)$$

式中  $I_{\text{RB}}, I'_{\text{RB}}, \tau_{\text{RB}}, \tau'_{\text{RB}}, \varphi_{\text{RB}}, \varphi'_{\text{RB}}$  分别为两部分脉冲光的瑞利后向散射信号的光强、相位和时延;  $\gamma$  为相干函数。

当由声音或物体振动产生的压力施加于传感光缆时,由于弹光效应导致传感光缆的长度和折射率发生变化,从而引起传感光缆中传输光的相位改变,即(1)式中  $(\varphi_{\text{RB}} - \varphi'_{\text{RB}})$  发生变化。由(1)式可知,相位变化将导致背向散射光光强的变化,从而可以实现信号的解调。另外,通过引入光时域反射技术,可以实现振动位置的准确定位,通过测量注入脉冲与接收信号之间的时间延迟得到扰动位置。系统的定位精度  $\Delta z$  与注入光纤的光脉冲宽度  $T_p$  有关,且满足  $\Delta z = cT_p/2n$ ,其中  $c$  为真空中的光速,  $n$  为传输介质的折射率。

### 4.2 微分振幅检波技术

微分振幅检波技术通过监测因依次注入询问脉冲而发生变化的相干散斑图样来感知光纤任意位置处的扰动信息。

入射光脉冲注入到光纤中时,由于折射率的不均匀性会发生瑞利散射。沿光纤轴向向后的散射,称为背向瑞利散射。光纤中的瑞利散射过程可以看做是一个个分立的瑞利后向反射镜的反射光相互作用叠加的过程,每个反射镜的长度为  $l$ 。每一个瑞利后向反射镜都有它自己的散射中心,如图 5 所示。根据平衡干涉原理,只有两个临近的长为  $l$  的散射区域的散射才会彼此相遇并发生干涉。这种内部脉冲干涉的结果形成了相干散斑图样。

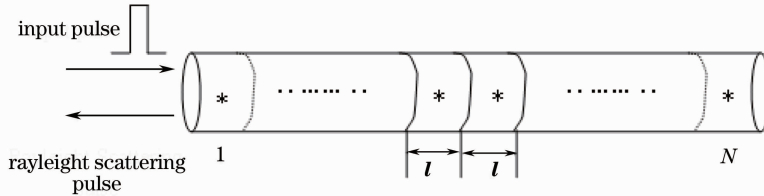


图 5 离散瑞利后向散射示意图

Fig. 5 Sketch map of the discrete Rayleigh scattering areas

2010 年, Lu 等<sup>[11]</sup>采用振幅外差探测方法提高振动的信噪比(SNR),利用移动平均和移动差分的方法减少噪声功率和提高频率响应宽度,建立的  $\phi$ -OTDR 系统实现了对振动波或声波的监测功能,当脉冲宽度为 50 ns 时,空间分辨率可达 5 m。这种分布式的声音或振动传感系统可以被用于各种结构内部破裂的动态探测,如图 6 所示。

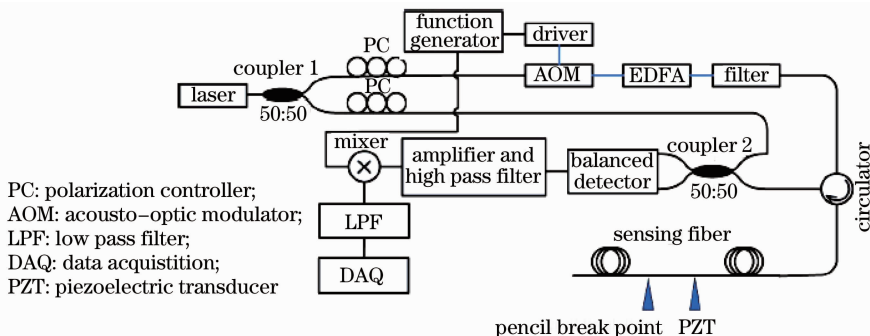


图 6 相干  $\phi$ -OTDR 实验系统

Fig. 6 Experimental setup for coherent  $\phi$ -OTDR

光波频率为  $f$  的相干光源经一个 3 dB 耦合器被分成两部分,一部分为信号光,另一部分为本地振荡光 (LO),如图 6 所示。声光调制器 (AOM) 被用于产生  $\Delta f$  大小的频移和光脉冲。背向瑞利散射信号与 LO 光通过另一个 3 dB 耦合器时相互混合。混合信号被一个平衡探测器探测。探测电流与光功率成正比,即满足

$$I(t) \propto E_{LO}^2(t) + E_b^2(t) + 2E_{LO}(t)E_b(t)\cos\theta(t)\cos[2\pi\Delta ft + \varphi(t)], \quad (2)$$

式中  $\theta(t)$  和  $\varphi(t)$  分别是背向散射光信号和 LO 光的相对偏振角和相位。

#### 4.3 直接相位解调技术

由(2)式可知,电流的拍部分对散射光的振幅、相位和偏振态是十分敏感的。拍的振幅和相位可以很容易地通过离散傅里叶积分得到<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} E_R(t)\cos\theta \propto \left| \int_{t-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} I_{AC} \times \exp(i\Delta\omega t') dt' \right| \\ \varphi(t) = \int_{t-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} I_{AC} \times \exp(i\Delta\omega t') dt' + 2k\pi \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $I_{AC}$  为拍信号的交流分量,由平衡光电探测器获得。由(3)式可知,振幅与傅里叶积分系数成正比,相位与傅里叶积分的相角有关。 $\Delta T$  是积分范围,大小由空间分辨率决定。利用相位展开算法,沿光纤的相位分布可以被解调。光纤中任意两点间的光程差可以通过监测相位差  $[\varphi(t_1) - \varphi(t_2)]$  的变化被感知。实验原理如图 7 所示。

相干激光器的线宽为 2 kHz,输出功率为 100 mW。输出光被一个 1:99 的耦合器分成两部分。主要部分被一个脉冲宽度 5 ns,重复频率 20 kHz 的声光调制器 (AOM) 进行脉冲调制。调制脉冲通过一个环形器注入到 3.5 km 长的光纤当中,背向瑞利散射信号与本地振荡光相混合。拍信号的交流 (AC) 分量由平衡光电探测器探测。电信号由速率为 3 GS/s 的数据采集卡进行抽样。相位解调和信号重建过程在计算机上完成。实验结果如图 8 所示。不难看出,相位轨迹的信噪比比振幅轨迹的信噪比要高。

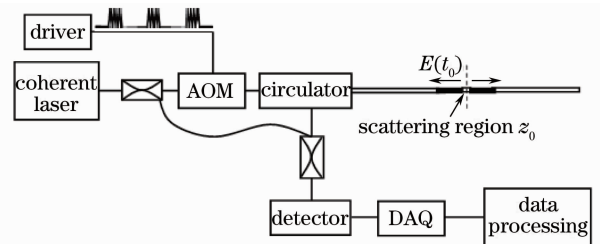


图 7 直接相位解调实验原理图

Fig. 7 Schematic of the experimental setup for direct phase demodulation

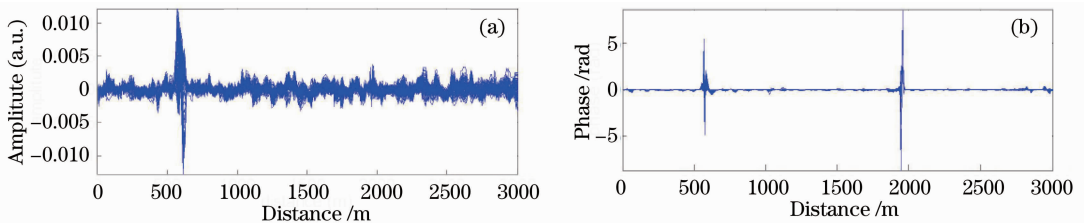


图 8 (a) 振幅变化轨迹; (b) 相位差变化轨迹

Fig. 8 (a) Amplitude and (b) phase difference variation traces

微分振幅检波技术是根据散斑图样的变化来确定扰动信息,而从散斑图样来解调相位信息是十分艰难的,因此它是一种非直接的、定性的  $\phi$ -OTDR 解调测量方法。直接相位解调技术则是一种直接的、定量的  $\phi$ -OTDR 解调测量方法,可以应用于动态测量以及光纤水听器中。但因其受相干散斑衰落的影响,使其解调不准确并且在某些区域产生很大的错误。

为了有效地消除干涉信号中的衰落现象,2012 年, Pan 等<sup>[13]</sup> 对以上系统进行了改进,利用一个非平衡 Michelson 干涉仪产生具有一定相位偏移的双脉冲信号,交替注入到传感光纤中,在传感光纤中会前后产生两个背向瑞利散射光,两个背向瑞利散射光的合成光通过环形器返回入射处后与一个本地振荡信号相结合,产生干涉效应,通过一个光纤耦合器后,用一个双平衡光探测器进行探测,输出的拍信号用一个采样率 3 GS/s 的 8 bit 数据采集卡采集数据,最后利用软件在电脑上进行处理。该解调技术的相位分辨率可以达到 0.1 rad;在监测范围 4 km 的情况下,信噪比大于 20 dB,探测带宽大于 360 Hz。

## 5 结 论

与其他分布式光纤传感系统相比, $\phi$ -OTDR 系统具有长传感距离、高空间分辨率、无盲点、无额外的电光设备、低成本和高稳定性的优点,适合于大范围分布式传感测量和长期监控,这在周界安全和结构健康监测中尤为重要。 $\phi$ -OTDR 系统以其特有的优势在周界安全和结构健康监测领域中有着广阔的应用前景。

随着激光光源技术、光纤传感技术以及解调方案的成熟, $\phi$ -OTDR 系统在周界安全和结构健康监测中将会发挥更大的作用。通过对重要场所的周界入侵状况和建筑物内部结构的健康状况如温度、应变、损伤、破裂、震动等长期在线、实时监测,可以监测并定位重要场所周界的入侵情况,可以预测建筑物结构内部的损伤、破裂及剩余寿命,从而可以阻止非法入侵,消除隐患,避免许多灾难性意外事故的发生,大大减少突发事件造成的伤害。

## 参 考 文 献

- 1 Juan C Juarez, Henry F Taylor. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Appl Opt, 2007, 46(11): 1968–1971.
- 2 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao, *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 650–654.  
宋牟平, 鲍 翀, 裘 超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 650–654.
- 3 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 954–958.  
宋牟平, 裘 超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 954–958.
- 4 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin, *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 123–127.  
杭利军, 何存富, 吴 斌, 等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 123–127.
- 5 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based on rayleigh scattering light  $\phi$ -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  $\phi$ 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.
- 6 Yang Bin, Gao Wei, Xi Gang, *et al.*. Located super remote full optical fiber boundary safety guarding system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(5): 050603.  
杨 斌, 皋 魏, 席 刚, 等. 定位型超远程全光纤周界安防系统[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 050603.
- 7 Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, Feng Li, *et al.*. An all fiber laser for distributed optical fiber sensor[J]/ Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1501–1504.  
高存孝, 朱少岚, 冯 莉, 等. 用于分布式光纤传感的全光纤激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1501–1504.
- 8 Fan Denghua, Liu Yongzhi, Zhang Lixun. A novel optical time domain reflectometer with michelson structure[J]. Infrared, 2009, 30(6): 35–38.  
范登华, 刘永智, 张利勋. 一种具有迈克尔逊结构的新型光时域反射仪[J]. 红外, 2009, 30(6): 35–38.
- 9 Luo Jun, Rao Yunjiang, Yue Jianfeng, *et al.*. Highly sensitive distributed optical fiber intrusion monitoring system[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1123–1128.  
罗 俊, 饶云江, 岳剑锋, 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.
- 10 S V Shatalin, V N Treschikov, A J Rogers. Interferometric optical time domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing[J]. Appl Opt, 1998, 37(24): 5600–5604.
- 11 Yuelan Lu, Tao Zhu, Liang Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3243–3249.
- 12 Zhengqing Pan, Kezhen Liang, Qing Ye, *et al.*. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[C]. SPIE, 2011, 8311: 83110S.
- 13 Zhengqing Pan, Kezhen Liang, Jun Zhou, *et al.*. Interference fading free phase demodulated OTDR system[C]. SPIE, 2012, 8421: 842129.