



# 相位敏感光时域反射光纤传感技术的研究综述

## 摘要

相位敏感光时域反射计 (Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer,  $\Phi$ -OTDR) 是一种新型的分布式光纤传感技术,在周界安防入侵和建筑结构健康监测等领域具有广泛应用.针对  $\Phi$ -OTDR 的传感原理,根据其系统结构及信号处理,总结了  $\Phi$ -OTDR 系统在光源技术、传感头技术、探测技术、复用技术和信号处理技术方面的进展,并对其进行了简要分析.

## 关键词

相位敏感光时域反射计;相干探测;频分复用;模式识别

中图分类号 TP3

文献标志码 A

## 0 引言

不同于点式传感器和准分布传感器,基于光纤的分布式传感器可实现对整条传感光纤上的物理量进行连续测量,因而分布式光纤传感技术引起国内外的广泛关注<sup>[1-6]</sup>.此外,分布式光纤传感技术还具有结构简单、体积小、抗腐蚀、耐高温、抗电磁干扰以及灵敏度高等优点,被广泛应用.特别的,基于瑞利散射的相位敏感光时域反射计因其传感原理基于光纤中传输光的相位变化,所以其灵敏度极高,非常适用于微弱振动事件的检测,可被应用的领域包括:大型结构的健康监测、地下通信线路的保护、电力线路的监测、周围安防系统监测、石油化工、天然气开采等.本文对基于瑞利散射的相位敏感光时域反射计的基本原理、核心技术进行概述,并介绍了目前的发展概况.

## 1 $\Phi$ -OTDR 的传感原理

相位光时域反射技术是在光时域反射技术上发展起来的,都是将光脉冲从光纤的一段注入到传感光纤,用探测器探测后向瑞利散射光.由于注入的是强相干光,传感系统的输出是脉冲宽度区域内反射回来的瑞利散射光,相干干涉的结果如图 1 所示.当光纤沿线上有入侵事件发生时,相应位置的光纤折射率就会发生改变,由于弹光效应,引起该处的光相位变化.

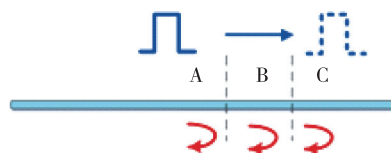


图 1 光脉冲沿光纤传输产生瑞利散射光干涉

Fig. 1 An optical pulse propagates along optical fiber that produces Rayleigh scattering light for interference signals

收稿日期 2017-02-07

资助项目 国家自然科学基金(61422507)

作者简介

庞拂飞,男,博士,教授,获得国家优秀青年基金资助,研究方向为特种光纤及光纤传感. ffpang@shu.edu.cn

## 2 $\Phi$ -OTDR 的技术进展

当前对  $\Phi$ -OTDR 的研究主要集中在以下几个方面:光源技术的研究;传感头技术的研究;探测技术的研究;系统光路技术的研究;信号解调技术的研究.典型的系统原理如图 2 所示.下面将逐个介绍这

1 上海大学 通信与信息工程学院,上海,200072

2 上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室,上海,200072

几个方面的研究进展情况。

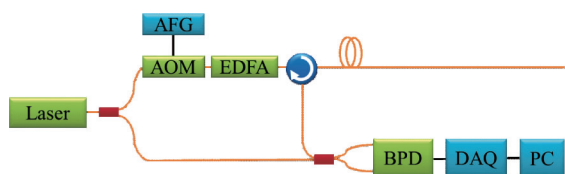


图2  $\Phi$ -OTDR 系统框图主要包含相干光源、传感光纤、探测器

Fig. 2 Schematic diagram of a typical all-fiber  $\Phi$ -OTDR system including coherent light source, sensing fiber and detectors

## 2.1 光源技术的研究

相比于传统的光时域反射计(OTDR), $\Phi$ -OTDR最大的不同就是采用了相干光源,这就对光源的线宽、频漂移特性以及功率等参数提出了要求.为了研制窄线宽、低频率漂移和高功率低噪声的光源,前人对系统的光源做了大量的研究,比如脉冲调Q的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<sup>[7-9]</sup>.

在实现长距离传感时,使用过多的光功放会引入一定程度的噪声,因此大功率的激光器成为研究热点.成都电子科技大学饶云江课题组提出了大功率超窄线宽单模激光器和电光调制器的 $\Phi$ -OTDR传感系统<sup>[10]</sup>,高存孝等<sup>[11]</sup>报道了一台基于主振荡功率放大(MOPA)技术的半导体激光器,实现了重复脉冲和脉冲宽度分别独立可调的激光输出,获得最高峰值功率为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%.

对于激光器线宽的压缩机制也有所研究与突

破.饶云江课题组采用光纤饱和吸收法来压窄激光器的线宽<sup>[12]</sup>,加拿大渥太华大学的 Okusaga 等<sup>[13]</sup>根据美国陆军实验室近几年的研究成果,利用增强瑞利散射的激光器线宽压缩机制,制作出线宽为130 Hz的单纵模超窄线宽激光器样机.

就目前的研究结果来看,如果在 $\Phi$ -OTDR中使用线宽较宽的激光器,那么会导致 $\Phi$ -OTDR的干涉效果退化,降低系统的灵敏度;如果使用的激光器频率漂移严重,那么会导致 $\Phi$ -OTDR的曲线随时间增长而发生畸变,除了降低信噪比以外,也限制了 $\Phi$ -OTDR对低频扰动的测量能力;如果激光器输出功率不足,那么 $\Phi$ -OTDR的检测距离就会受到限制.围绕激光器的这些参数,研究者们进行了一系列的参数对比实验,验证其对 $\Phi$ -OTDR系统的影响.2014年,Zhong等<sup>[14]</sup>对激光器光源参数对系统性能的影响做了分析,这对于系统的光源选择及性能提升具有深远的意义.2016年,Fernández-Ruiz等<sup>[15]</sup>研究了脉冲形状对 $\Phi$ -OTDR系统的影响,如图3所示,指出三角形和高斯形状脉冲能在一定程度上抑制衰落问题.

## 2.2 传感头技术的研究

系统中的传感头大部分采用普通的单模光纤,然而在有些测试中发现,对于微小的振动信号,测试效果并不能令人满意,而对于足以引起损耗的干扰,光强变化明显.为了提高微小振动信号的传感灵敏度,抑制损耗干扰,很有必要解决传感头灵敏度等问题.

增强传感头的感知能力是提高系统检测灵敏度

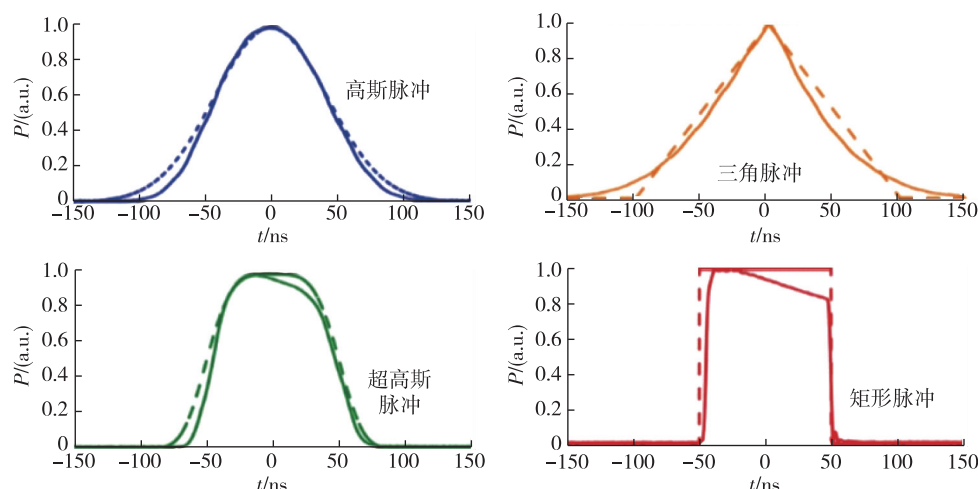


图3 三角形和高斯脉冲抑制 $\Phi$ -OTDR系统的衰落<sup>[15]</sup>

Fig. 3 The pulse shape with triangular and Gaussian profile enabling to suppress fading effect of  $\Phi$ -OTDR system<sup>[15]</sup>

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传感技术的关键问题之一.电子科技大学的罗俊等<sup>[12]</sup>提出了一种基于纤维增强塑料(FRP)传感光缆的新型高灵敏分布式光纤入侵监测系统,该光缆拥有比普通通信光缆高得多的应力敏感性,有效地提高了系统的灵敏度.另外一种是采用全保偏光纤,继而可适当降低由偏振效应引起的偏振衰落及噪声<sup>[16]</sup>.文献[17-18]提出了在光纤中刻入弱布拉格光栅阵列,如图4所示,可以提高应力传感精度和探测距离.

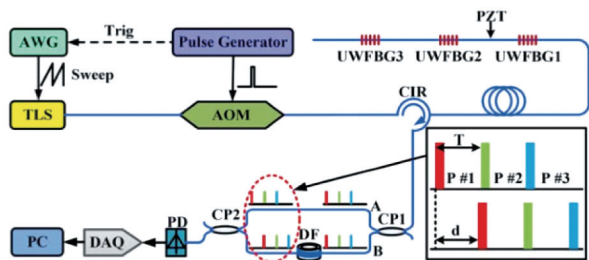


图4 弱布拉格光栅阵列提高应力传感精度和距离<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Ultra-weak fiber bragg grating array being sensing head can improve performance of sensitivity and detection distance<sup>[18]</sup>

### 2.3 探测技术的研究

分布式传感技术最早采用直接探测技术进行探测,但由于直接探测对光波信号的利用率太低,所以采用相干探测法的趋势越来越明显.

相干 OTDR 主要用于长距离光纤损耗和断点的监测、温度与应力的测量以及分布式振动传感方面的测量.2010 年,加拿大渥太华大学的 Lu 等<sup>[19]</sup>报道了一种基于相干探测的分布式振动传感系统,获得了 1.2 km 传感距离和 5 m 空间分辨率的振动测量.此外,该研究小组对连续多个事件在同一位置和多个同步事件在不同位置的频率识别做了研究.2011 年,中国科学院上海光学精密机械研究所研究小组的潘政清等<sup>[20]</sup>采用数字相干检测技术,将分布式多点实时测量振动的优点和相干检测可实现相位解调的优点结合起来,实现了对长距离范围内扰动信号的位置、频率和强度同时测量.

### 2.4 复用技术的研究

复用技术是为了提高通信线路的利用率,而采用的在同一传输线路上同时传输多路不同信号而互不干扰的技术.为了提高系统的测量效率,多路复用技术在系统中也逐渐被应用起来.

庞拂飞,等.相位敏感光时域反射光纤传感技术的研究综述.

为了迅速提高测量效率,Sumida<sup>[21]</sup>提出了一种由 DBR 激光器产生的频率编码脉冲序列的 FSK 探测方法.通过注入相同脉宽不同频率的探测脉冲形成的频率编码探测脉冲序列到传感光纤中,并经过相干探测,产生具有一定时延的不同的中频信号,实现了测量效率的倍增.日本有研究者利用相位调制器(PM)产生的多频探测脉冲的方法提高了动态范围.针对这些研究中只使用了一阶频率和频带利用率较低的问题,南京大学的张旭萃研究小组对此展开了研究.他们首先利用相位调制器产生了 4 种不同频率的探测脉冲<sup>[22]</sup>,使 FDM-OTDR 系统的测量效率和动态范围都有大幅提升.随后,张旭萃等<sup>[23]</sup>采用双频探测的 TDM-COTDR 系统与传统的 COTDR 系统将动态范围提高到 8.0 dB.除此之外,中国科学院上海光学精密机械研究所在复用技术方面也做了不少研究.2014 年,他们提出了一种新型的多脉冲注入的 FDM- $\Phi$ -OTDR 系统<sup>[24]</sup>,通过注入 4 种频率交替切换的脉冲序列,使在相同传感距离的条件下系统的采样率提高了 4 倍,从而在 10 km 的传感光纤上实现了频率范围为 20 kHz 的测量,突破了传感范围与固有采样率相互制约的限制,提高了系统测量频率带宽.为了进一步扩展传感距离,文献[25]提出了将相干探测技术和拉曼增强技术复用.由于拉曼增强技术可以补偿脉冲在光纤传输中的损耗,传输距离扩展至 175 km<sup>[26]</sup>.

### 2.5 信号处理技术的研究

$\Phi$ -OTDR 的信号解调处理算法是研究的热点之一.传统的信号处理方案是通过包络解调算法获取  $\Phi$ -OTDR 的光功率幅度曲线,然后用曲线之间的差分运算寻找扰动事件点,但是这种数据解调处理后的  $\Phi$ -OTDR 信号信噪比较低.

目前对于相位敏感光时域反射系统信号处理研究主要是对事件点的位置测量以及对事件点的频率和幅度的测量,主要集中在如何提高空间分辨率、信噪比和可测频率范围以及降低噪声、降低误报率等几个方面.主要有以下几种处理方法:1)在分组平均基础上的移动平均和移动差分方法进行振动事件定位;2)在相干探测的正交解调技术中可以获得瑞利信号的振幅和相位等;3)利用小波分析的方法提取事件点以及滤除光纤中偏振态随机变化引入的相位噪声和背景噪声等;4)利用解调的相位进行差分定位;5)采用图像处理和模式识别方法对事件进行识别.下面将详细介绍这几种方法.



### 2.5.1 移动平均等定位方法

文献[27]采用移动平均及移动差分的方法,在1 km 传感光纤上实现了5 m 空间分辨率的测量,当平均次数为100时,振动位置信号的信噪比达到了6.5 dB,这给其他研究人员在整个系统的信号检测和信噪比提高这两项关键性因素方面提供了新的思路和思考.另外有研究者提出了一种改进系统的信号解调方法<sup>[28]</sup>,即采用数字平均、移动平均和间隔处理相结合的解调方法,根据信号波动特性将原始数据进行分组,提高了各组数据的相关性,降低了各组数据的差异性,在不引入复杂运算的情况下,提高了系统的信噪比.

### 2.5.2 正交解调对相位的定量测量

中国科学院上海光学精密机械研究所提出了数字相干检测技术,采用正交解调、相位解卷绕<sup>[20]</sup>,使相位解调精度达到0.1 rad.2015年,南京大学张旭萃团队利用统计计算方法对振动点的相位做了定量测量<sup>[29]</sup>,如图5所示.另外,成都电子科技大学的饶云江团队采用了90°光混频器探测结构实现了正交解调<sup>[30]</sup>,并采用分段解卷绕、平均相位差估计算法和IIR滤波的方法来提高相位解调性能<sup>[31]</sup>.

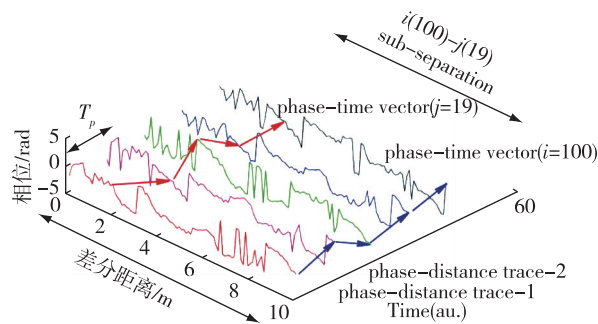


图5 利用统计计算方法对振动点的相位做了定量测量<sup>[29]</sup>

Fig. 5 An improvement of phase-measuring  $\Phi$ -OTDR based on statistics calculating method<sup>[29]</sup>

### 2.5.3 小波变换

小波信号处理方法通常被应用于分析系统中的稳态和非稳态振动信号.加拿大渥太华大学的Qin等<sup>[32]</sup>提出使用小波变换来进行降噪,可以在1 km的探测距离上得到0.5 m的空间分辨率,这是目前报道的最高的空间分辨率.同时,他们尝试使用连续小波变换提取扰动信号的频谱信息,成功地检测到了500~1 000 Hz 啁啾的外界扰动信号.2011年,吴麻伟等<sup>[33]</sup>针对周围环境如微风、声音、暴风雨等干扰源引起误报的问题,提出了基于多个小波分解结

果进行综合判决的低误报率分布式光纤围栏入侵监测系统,为该技术的实际产业化应用奠定坚实基础.

最近,Hui等<sup>[34]</sup>提出了一种基于希尔伯特变换的 $\Phi$ -OTDR数据处理方法,该方法能够有效地对平稳和非平稳信号进行频率分析,并用实验证明了其结果的有效性.

### 2.5.4 相位差分测量方法

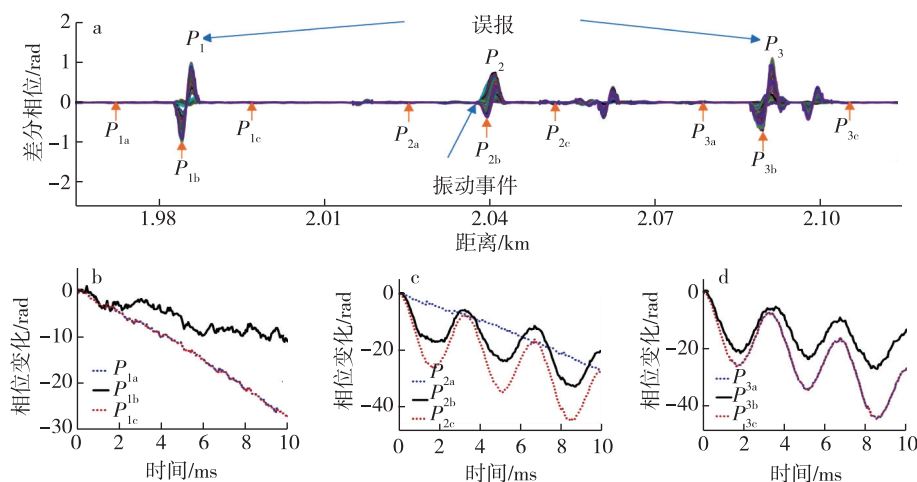
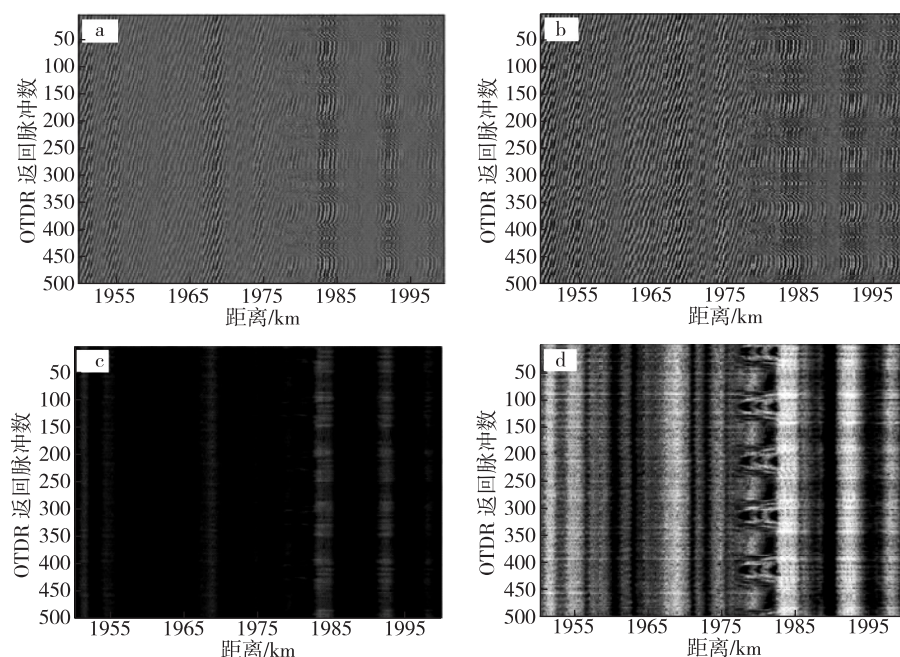
研究发现,在没有进入振动区域之前,后向瑞利散射光的相位的变化量较平坦;在振动区域处,外界振动会引入额外的相位增量,每个位置的后向瑞利散射光相位是脉冲内散射光干涉叠加的结果,随着光脉冲逐渐遍历整个振动区域,可获得一组单调递增的后向瑞利散射光相位曲线;在出了振动区域后,此时由于不受外界振动源的调制,没有引入新的相位增量,所以相位的变化量接近常数.利用这一特点,笔者所在团队利用前后正交解调出相位前后两点的相位差,不仅能定位,还可排除由衰落引起的相位误报点,提高了整个系统定位的准确性<sup>[35]</sup>.如图6所示, $P_1$ 为衰落引起的误报,该点前后的相位差随时间的变化恒为零,而 $P_2$ 为事件振动点,相位差大于零.此方法在不增加任何复用技术和复杂信号处理的条件下,简单有效地提高了排除衰落引起的误报,具有潜在的应用价值.

### 2.5.5 图像处理及模式识别

图像处理与模式识别是信号处理的另一个重要分支.2013年,重庆大学的Zhu等<sup>[36]</sup>尝试把图像处理中的边缘检测算法应用在数据处理中,从而实现系统中振动位置的测量.他们将采集的后向瑞利散射曲线组成一幅二维灰度图像,通过计算每点的空间梯度实现对振动位置的测量,在1 km的传感光纤下得到8.4 dB的位置信号信噪比,由于检测算子在领域内具有平均的效果,在噪声背景下可以有效地提取有用信号,极大地提高了传感系统的性能参数.最近,笔者所在团队提出了利用灰度图像处理的方法<sup>[37]</sup>,通过直方图均衡化与梯度处理,降低了由环境干扰所引入的噪声信号,提高了系统对振动信号的分辨力,在2.5 km的传感光纤上实现了振动探测,如图7所示.

## 3 结束语

虽然相对于其他种类的分布式光纤传感器,相位敏感型光时域反射计尚未达到商业应用的水平,但是在近些年的研究中,其硬件技术及软件技术都

图6 相位差分测量方法可排除由衰落引起的相位误报点<sup>[35]</sup>Fig. 6 Differential phase method helps distinguish the false alarms induced by fading effect from the real vibration event<sup>[35]</sup>图7 利用灰度图像处理的方法<sup>[37]</sup>Fig. 7 Signal processing of  $\Phi$ -OTDR based on grey scale image<sup>[37]</sup>

有巨大的发展,获得了令人瞩目的成果,并有望在实际工程中得到应用,具有广阔的发展前景。

## 参考文献

### References

- [1] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639
- [2] Kihara M, Hiramatsu K, Shima M, et al. Distributed optical fiber strain sensor for detecting river embankment collapse[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2002, E85C(4): 952-960
- [3] 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): 2081-2087
- [4] Yilmaz G, Karlik S E. A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2006, 125(2): 148-155
- [5] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204
- [6] Gao J Z, Jiang Z D, Zhao Y L, et al. Full distributed fiber

- optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3 (11):633-635
- [7] Shatalin S V, Treschikov V N, Rogers A J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing [J]. Applied Optics, 1998, 37 (24): 5600-5604
- [8] Seo W. Fiber optic intrusion sensor investigation [D]. College Station, Texas: Texas A&M University, 1994
- [9] Choi K N, Taylor H F. Spectrally stable Er-fiber laser for application in phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15 (3):386-388
- [10] 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  
XIE Kongli, RAO Yunjiang, RAN Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of 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
- [11] 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  
GAO Cunxiao, ZHU Shaolan, FENG Li, et al. An all fiber laser for distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1501-1504
- [12] 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  
LUO Jun, RAO Yunjiang, YUE Jianfeng, et al. Highly sensitive distributed optical fiber intrusion monitoring system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1123-1128
- [13] Okusaga O, Cahill J P, Docherty A, et al. Spontaneous inelastic Rayleigh scattering in optical fibers [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 549-551
- [14] Zhong X, Zhang C X, Li L J, et al. Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor [J]. Applied Optics, 2014, 53(21): 4645
- [15] Fernández-Ruiz M R, Martins H F, Pastor-Graells J, et al. Phase-sensitive OTDR probe pulse shapes robust against modulation-instability fading [J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5756-5759
- [16] Qin Z G, Zhu T, Chen L, 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
- [17] Zhu F, Zhang Y X, Xia L, et al. Improved  $\Phi$ -OTDR sensing system for high-precision dynamic strain measurement based on ultra-weak fiber Bragg grating array [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (23): 4775-4780
- [18] Zhang Y X, Guo Z, Qian W Y, et al. Improved  $\Phi$ -OTDR system with narrow pulses for quantitative strain measurement based on ultra-weak fiber bragg grating array [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58 (12): 2892-2894
- [19] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249
- [20] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C] // Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011: 831105
- [21] Sumida M. Optical time domain reflectometry using an M-ary FSK probe and coherent detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(11): 2483-2491
- [22] Lu L D, Song Y J, Zhang X P, et al. Frequency division multiplexing OTDR with fast signal processing [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2206-2209
- [23] Zhang X P, Song Y J, Lu L D. Time division multiplexing optical time domain reflectometry based on dual frequency probe [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(22): 2005-2008
- [24] 周俊, 潘政清, 叶青, 等. 基于多频率综合鉴别  $\Phi$ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 114-119  
ZHOU Jun, PAN Zhengqing, YE Qing, et al. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a  $\Phi$ -OTDR system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 114-119
- [25] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity  $\Phi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. Optics Express, 2014, 22 (11): 13804-13810
- [26] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification [J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5866-5869
- [27] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249
- [28] 方英兰, 刘升, 沈成银, 等. 相位敏感 OTDR 系统的信号解调方法 [J]. 量子电子学报, 2015, 32(1): 123-128  
FANG Yinglan, LIU Sheng, SHEN Chengyin, et al. Signal demodulation method of phase-sensitive optical time domain reflectometer [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2015, 32(1): 123-128
- [29] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, et al. The development of an  $\Phi$ -OTDR system for quantitative vibration measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1349-1352
- [30] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent  $\Phi$ -OTDR based on  $I/Q$  demodulation and homodyne detection [J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-859
- [31] Wang S, Zhang L, Li Y, et al. Performance enhancement of phase-demodulated  $\Phi$ -OTDR with signal processing [C] // Asia Communications and Photonics Conference, 2015, DOI:10.1364/ACPC.2015.ASu2A.146
- [32] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20459-20465
- [33] 吴麻伟, 吴慧娟, 饶云江, 等. 基于多种小波分解方法综合判决的低误报率分布式光纤围栏入侵监测系统 [J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1692-1696

- WU Xiuwei, WU Huijuan, RAO Yunjiang, et al. Low misstatement rate distributed optical fiber fence intrusion detection system by variety of wavelet decomposition method [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40 ( 11 ) : 1692-1696
- [ 34 ] Hui X N, Ye T H, Zheng S L, et al. Space-frequency analysis with parallel computing in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer distributed sensor [J]. Applied Optics, 2014, 53 ( 28 ) : 6586
- [ 35 ] Pang F F, He M T, Liu H H, et al. A fading-discrimination method for distributed vibration sensor using coherent detection of  $\Phi$ -OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28 ( 23 ) : 2752-2755
- [ 36 ] Zhu T, Xiao X, He Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in  $\Phi$ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31 ( 17 ) : 2851-2856
- [ 37 ] 赵世琦, 庞拂飞, 贺梦婷, 等. 基于灰度图像的光纤相干光时域反射计信号处理研究 [J]. 中国激光, 2015, 42 ( 3 ) : 146-151
- ZHAO Shiqi, PANG Fufei, HE Mengting, et al. Research on the signal processing in optical fiber coherent optical time domain reflectometer based on grey scale image [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42 ( 3 ) : 146-151

## A review of distributed fiber sensors based on phase-sensitive optical time domain reflectometer

PANG Fufei<sup>1,2</sup> LIU Huanhuan<sup>1,2</sup> WANG Tingyun<sup>1,2</sup>

1 School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072

2 The Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072

**Abstract** Distributed fiber sensors based on phase-sensitive optical time domain reflectometer ( $\Phi$ -OTDR) show great potential applications in the field of perimeter security intrusion and structural health monitoring. This paper reviews the principle of  $\Phi$ -OTDR for sensing, and the recent development of  $\Phi$ -OTDR in aspects of light source, sensing head, detection method, multiplexing technology and signal processing.

**Key words** phase-sensitive optical time domain reflectometer; coherent detection; frequency-division multiplexing; pattern recognition