

相位敏感光时域反射仪研究和应用进展

叶青¹, 潘政清¹, 王照勇^{1,2}, 卢斌^{1,2}, 魏芳¹, 瞿荣辉¹, 蔡海文^{1*}, 赵浩³, 方祖捷¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器及应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海波汇科技股份有限公司, 上海 201203

摘要 国家重大基础设施和关键区域的安全, 对于保障经济发展、国家安全、社会稳定和人民生活具有极其重要的意义。基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的分布式光纤振动传感系统在入侵探测、周界安防和基础设施安全监控等方面具有独特的技术优势, 近年来受到各国科技界和工业界的广泛关注。详述了本课题组近 10 年来在该领域的研究成果, 包括 Φ -OTDR 量化相位解调技术、信号干涉衰落的机理研究、超高频响应带宽系统、超高空空间分辨率系统、低噪声窄线宽单频激光器和激光扫频技术等方面的进展; 介绍了 Φ -OTDR 系统在周界安防和铁路安全监测等领域的工程应用, 并对 Φ -OTDR 的国内外发展趋势进行了简要的评述。

关键词 光纤光学; 相位敏感光时域反射仪; 量化相位解调; 周界安防; 窄线宽单频激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0600001

Progress of Research and Applications of Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry

Ye Qing¹, Pan Zhengqing¹, Wang Zhaoyong^{1,2}, Lu Bin^{1,2}, Wei Fang¹,
Qu Ronghui¹, Cai Haiwen¹, Zhao Hao³, Fang Zujie¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ShangHai Bandweaver Technologies Co., Ltd., Shanghai 201203, China

Abstract The safety of major infrastructure and key regions of a country has extremely important significance to the development of national economy, national safety, stability of society, and people's daily life. A distributed fiber vibration sensing system based on phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) has unique technical superiority in intrusion detection, perimeter security, safe monitoring of infrastructure, and so on. The distributed fiber vibration sensing system based on Φ -OTDR attracts wide attention of scientists and industries in the world. We introduce the results of our researches in the field in recent ten years, including the Φ -OTDR quantitative phase demodulation technique, the mechanism of signal interference fading, the system with ultra-high frequency response band, the system with ultra-high spatial resolution, the low noise narrow linewidth single-frequency laser, and the technique for laser frequency sweeping. We also introduce the applications of Φ -OTDR system in perimeter security, railway safe monitoring, etc. A brief review of domestic and international development in Φ -OTDR is given.

Key words fiber optics; phase-sensitive optical time domain reflectometry; quantitative phase demodulation;

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(61377062, 61475165, 61405227, 61675216)、上海市科技创新基金(15XD1524500)、中国科学院创新基金(CXJJ-15Z006)、中国科学院重点部署项目支持

作者简介: 叶青(1977—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事分布式光纤传感及其产业化等方面的研究。

E-mail: yeqing@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

1 引 言

光时域反射仪(OTDR)是光纤通信系统和分布式光纤传感系统中的重要仪器。相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)具有获取光纤中瑞利背散射所携带的光相位信息的能力,适用于振动信息的传感;该仪器满足了大型结构健康监测、周界安防和管线状况监测等领域对长距离振动检测的需求,得到了广泛关注。 Φ -OTDR在传感探测距离、事件定位精度和环境适应性等方面具有不可替代的优势,引起了国内外学者和应用单位的兴趣。

OTDR 探测技术是由脉冲激光激发光纤瑞利散射,通过回波延时获取散射的空域分布。该技术广泛应用于光纤损耗测量和断点探测。为了利用散射回波信号对光纤所处环境(温度、压力和振动等)的敏感性,研究者们发展了多种基于 OTDR 的分布式光纤传感技术。 Φ -OTDR 采用窄线宽单频激光作为探针光脉冲^[1-3],光纤折射率的变化会引起脉冲宽度内瑞利散射信号的干涉,使得信号幅度大幅增加,因此 Φ -OTDR 对光纤所处环境的灵敏度远高于对传输损耗的灵敏度。 Φ -OTDR 可以采用强度探测和相干探测两种接收方法。相干探测将散射回波与单频本振光源进行拍频,具有进一步放大信号的作用和光相位检测的功能^[3-4]。采用相干探测的 Φ -OTDR 可大幅提高探测灵敏度,延长工作距离,缩短信号获取时间,避免了处理 OTDR 信号过程中采用的多次平均,使分布式传感器具有更强的动态信息传感能力。对不同回波时间相位信号进行移动差分,可获得相应位置光波传输相位的空间(光纤轴向)变化。通过对重复扫描的相位数据进行时间差分,可获得响应位置的振动信息。

国内外已经有很多针对 Φ -OTDR 研究和应用的报道^[5-6]。实际传感应用对 Φ -OTDR 的性能不断提出更高的要求。本课题组在 Φ -OTDR 系统的机理研究及性能优化方面开展了一系列工作,主要包括:1) 相位信息的解调技术;2) 干涉衰落机理及消除其影响的方法;3) 超高频率响应 Φ -OTDR 技术;4) 超高空间分辨率 Φ -OTDR 技术;5) 高相干性单频激光器研究;6) 激光快速移频和扫频技术研究。在工程应用方面,所研制的 Φ -OTDR 装置已经在长距离周界安防、车辆定位以及铁路安全光纤综合监控等项目中取得实际的效果。本文综述了近年来本课题组在该领域所取得的进展,并对国内外发展趋势进行了简要的回顾和展望。

2 Φ -OTDR 研究进展

2.1 相位信息的解调技术

采用单频光源和相干检测后, Φ -OTDR 的传感信号强度远大于常规 OTDR 的传感信号强度。对传感信号的处理方式一般有两种:1) 直接利用散射回波的强度^[3];2) 从回波信号中提取光的相位信息。上述两种信号处理方式分别称为幅度解调和相位解调。待传感信号的扰动引起光纤折射率的变化,这一变化直接造成光相位的变化,从而对光纤传输产生影响。回波幅度是相位变化带来的干涉效应。显然,光相位的探测具有反映扰动信号定量特性的可能性。

本课题组提出了数字相干探测方法^[7]和正交解调技术^[8]。光纤散射回波和本振信号在图 1 所示的光纤耦合器上进行合波,产生的拍频信号强度可表示为

$$I_{\text{beat}} = |E_{\text{LO}}|^2 + |E_{\text{R}}|^2 e^{-\alpha z} + 2E_{\text{R}}E_{\text{LO}}e^{-\alpha z/2} \cos \theta \cos(\Delta\omega t + \varphi), \quad (1)$$

式中 $\Delta\omega = 2\pi(\nu_1 - \nu_0)$ 为声光调制器(AOM)的频移,其中 ν_0, ν_1 分别为单频激光器和声光移频后的光频。

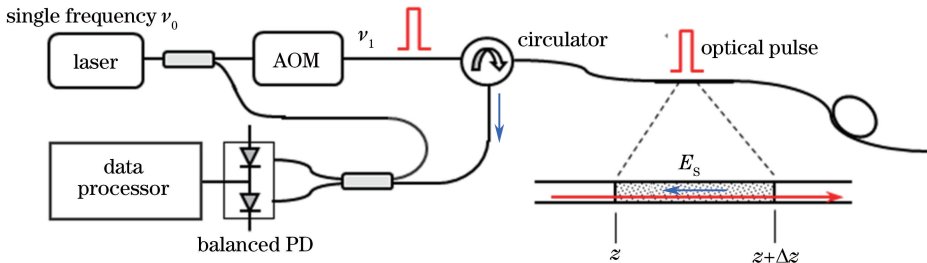


图 1 Φ -OTDR 的基本原理示意图

Fig. 1 Fundamental principle diagram of Φ -OTDR

φ 为包含待测扰动信息的光相位; E_R 、 E_{LO} 分别为回波和本振波的信号强度; θ 为回波与本振波之间的偏振角; t 为时间; α 为光纤的损耗系数; z 为光纤长度。拍频信号在平衡光电探测器(PD)上转换为消除直流成分的扰动信号, 即 $V \propto \cos(\Delta\omega t + \varphi)$ 。利用数据采集卡获取扰动信号, 并在计算机中进行如图 2 所示的数字正交解调, 可得同相(In-phase)和正交(Quadrature)解调信号分别为 $I = \langle V \cos(\Delta\omega t) \rangle$ 和 $Q = \langle V \sin(\Delta\omega t) \rangle$, 其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示时域平均。相位可表示为

$$\varphi(t) = \arctan(Q/I). \quad (2)$$

对相位作移动差分可得

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi(t - T), \quad (3)$$

式中 T 为空间分辨率, 即入射脉冲脉宽的一半。扰动信号的幅度也可以通过 I/Q 解调结果重现, 即 $\langle V \rangle = \sqrt{I^2 + Q^2}$ 。

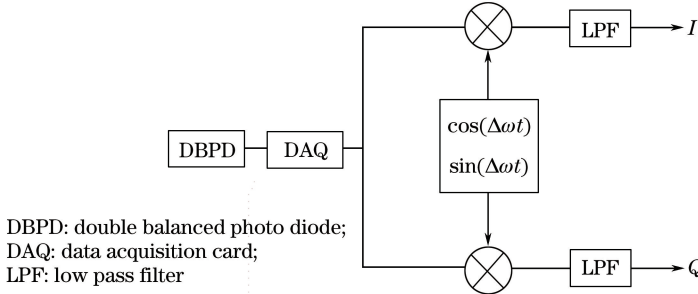


图 2 同相和正交解调

Fig. 2 In-phase and quadrature demodulation

实验中通过压电陶瓷对传感光纤 600 m 处加载频率为 200 Hz 的扰动信号, 解调获得的幅度-时间和相位-时间曲线分别如图 3(a)、(b) 所示。可以看出, 解调得到的幅度信息可以大致反映扰动信号的波动情况, 但是解调得到的幅度信息与扰动信号之间的非线性会导致信号失真; 相位信息能够更好地重建扰动信号, 保真性更好, 可以实现更加准确的定量化测量。

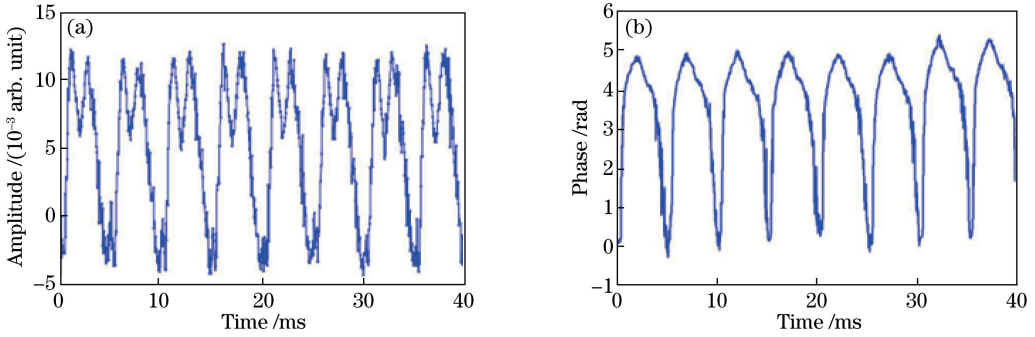


图 3 扰动点处回波信号的(a)幅度-时间曲线和(b)相位-时间曲线

Fig. 3 Curves of (a) amplitude versus time and (b) phase versus time of returned wave signal at disturbed position

2.2 干涉衰落机理及消除其影响的方法

在外差光时域反射仪(HOTDR)和相干光时域反射仪(COTDR)发展的初期, 研究者们发现采用窄线宽光源作为探针脉冲时, 回波信号不再是常规 OTDR 所显示的一个指数衰减的波形, 而是大幅度涨落的波形, 这种现象被称为干涉衰落或者相干瑞利噪声(CRN)。虽然 Φ -OTDR 的回波信号幅度与常规 OTDR 的回波信号幅度相比有了大幅提高, 但由于存在干涉衰落, 需要将依次扫描的波形进行相减才能得到外部扰动。幅度衰落到幅度为 0 的位置便为传感灵敏度的零点。

随机涨落的波形源于瑞利散射的随机性, 这种空间随机性随光源的频率变化而变化^[9], 但是涨落波形在时间上相当稳定。如图 4 所示, 图中频率为探测光相对于本地光源的频移, 这就难以用瑞利散射的随机性解释。经过分析, 提出了一个描述脉冲宽度内瑞利散射互相干涉的模型。对应于脉冲宽度的光纤长度范围

(Δz)内存在着随机的折射率分布,导致产生空间上随机分布的干涉信号,且干涉信号的随机分布随光源频率的变化而变化,干涉信号随机分布的稳定性便于研究人员进行重复扫描。由于瑞利散射的散射体在波长量级,散射发生的时间极短。对于研究人员所关注的时间和空间尺度来说,瑞利散射的随机性不可能体现出来,所得到的实际效果都是瑞利散射的平均效应。本课题组提出了一个计算相干瑞利噪声的数学模型,计算得到在长度为 z 到 $z + \Delta z$ 光纤段内瑞利散射的综合反射率为

$$r_c(z) = \bar{r}_{\text{Ray}} \int_z^{z+\Delta z} f[n(y)x/c] \exp\left[j2 \int_z^x \beta(y)dy\right] dx, \quad (4)$$

式中 \bar{r}_{Ray} 为平均瑞利散射系数; $f[n(y)x/c]$ 为脉冲波形函数,其中 $n(y)$ 为光纤折射率, c 为真空中光速; $\beta(y) = n(y)k$ 为与光频有关的光纤传输常数,其中 k 为激光波数。这一模型可很好地反映干涉衰落的各种基本特征。

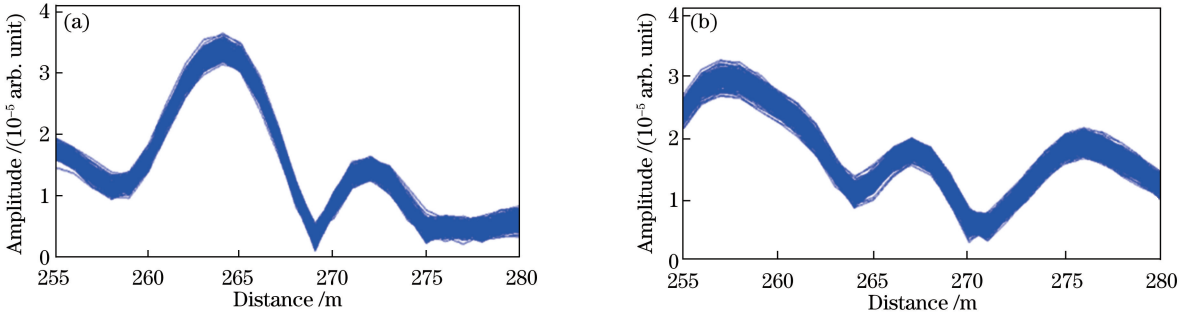


图 4 不同光频下 400 次重复扫描得到的干涉衰落波形。(a) 230 MHz; (b) 160 MHz

Fig. 4 Interference decline waveforms of 400 scans under different optical frequencies. (a) 230 MHz; (b) 160 MHz

相干瑞利噪声引起光纤某些位置处的信号幅度衰落,导致传感器对扰动信号的灵敏度降低。在数字相位解调方法中,由于信噪比降低,在进行反正切运算时产生很高的假信号,从而导致传感器的误报。基于干涉衰落随光频变化的特性,采用多频光源判别信号的真伪,如图 5 所示。根据不同光频下测得的相位差 ($\Delta\phi$) 信号,可以得到只有在光纤 680 m 位置处的信号是真的扰动信号,它不随光频的改变而消失,其余 4 个信号可以判断为假信号^[10]。

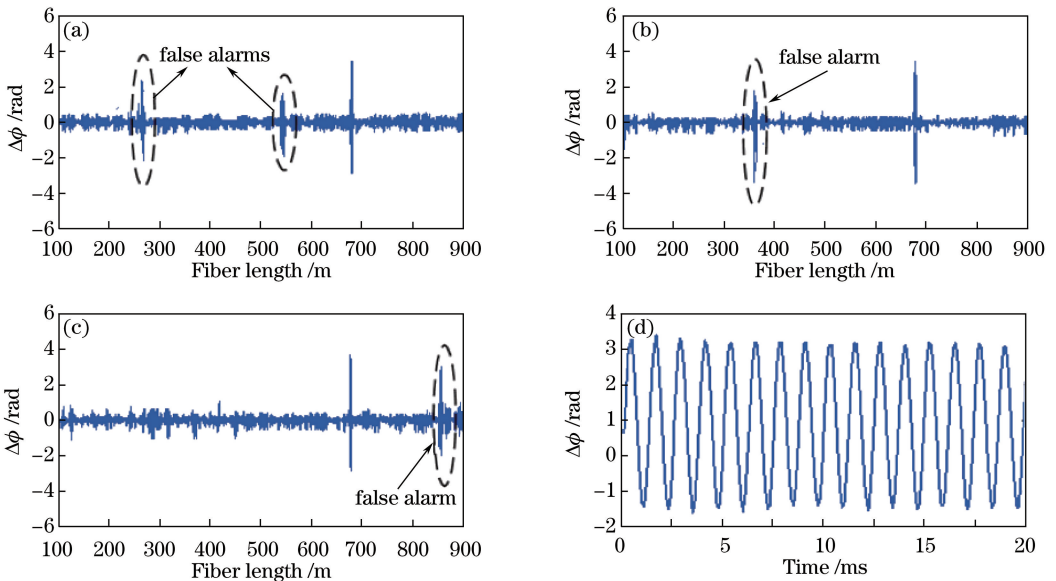


图 5 (a) 移频 90 MHz 的相位差信号; (b) 移频 160 MHz 的相位差信号; (c) 移频 230 MHz 的相位差信号; (d) 测得的正弦振动信号的相位差

Fig. 5 (a) $\Delta\phi$ when frequency shift is 90 MHz; (b) $\Delta\phi$ when frequency shift is 160 MHz; (c) $\Delta\phi$ when frequency shift is 230 MHz; (d) $\Delta\phi$ detected sinusoidal vibration signal

为了排除或缓解干涉衰落的影响,提出了利用相位调制双脉冲的方案^[11]。该方案的系统原理示意图如图 6(a)所示。AOM 斩波和移频的光脉冲经过一个可调时延的迈克耳孙干涉仪后被调制为 $0/\pi$ 相位交替变化的双脉冲,通过比较奇数序列和偶数序列的接收信号可判别和排除因干涉衰落导致的假信号,从而实现扰动信号的无衰落重建。实验中分别采用正弦波、方波和三角波进行扰动信号测试,解调得到的相位差信号如图 6(b)所示,对应的时间序列如图 6(c)~(e)所示。可以看出,扰动信号得到准确重建,信噪比大于 20 dB。

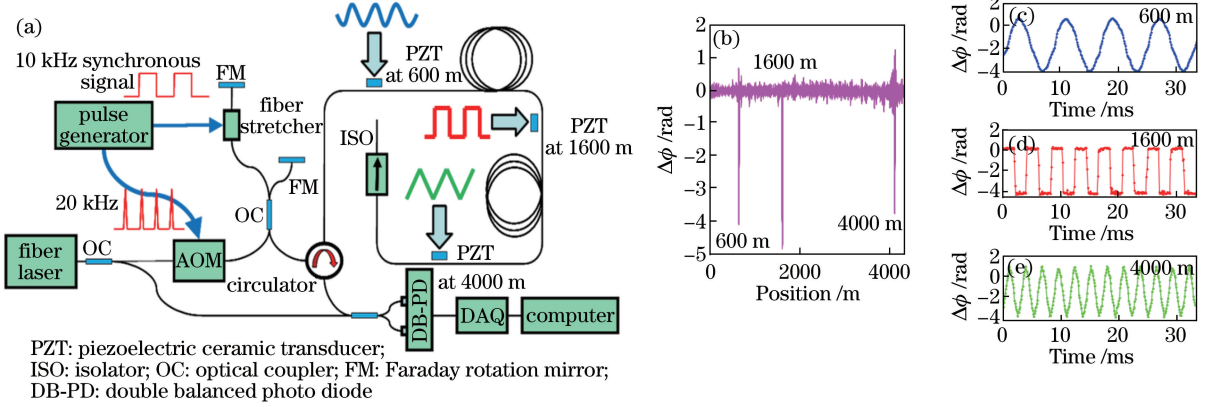


图 6 (a)相位调制双脉冲 Φ -OTDR 原理图; (b)解调得到的相位差信号; (c)~(e)解调得到的扰动信号的相位差
Fig. 6 (a) Schematic of phase-modulated pair pulse Φ -OTDR; (b) demodulated $\Delta\phi$;
(c)-(e) demodulated disturbing signals

2.3 超高频响应 Φ -OTDR

对于分布式光纤传感技术,系统的响应带宽受到传感距离的限制,传感距离越长,响应带宽越窄,这是因为探测脉冲的时间间隔不能小于光在光纤中的往返时间 $[T_z = 2n(y)z/c]$;否则,前后脉冲的回波在时域重叠,导致无法分辨。根据采样定律,如果待探测的振动信号频率高于取样频率 $1/T_z$ 的一半,振动信号波形就不可能重现,因此必须缩短传感距离才能实现传感的要求。然而,在工程结构和大型设施的健康检测和安全监控中,如电力电缆的局部放电检测和高压油气管线的泄露检测等,待探测的损伤信号大多属于高频声波和超声波,甚至更高频段的波,且要求传感范围足够大。因此,突破当前 Φ -OTDR 系统传感距离对传感器响应带宽的限制是提升 Φ -OTDR 性能的一个关键。

基于光纤通信波分复用的概念,提出了采用时域排序多频光源(TSMF)的 Φ -OTDR 技术^[12-13]。在该技术中,各个频率的光脉冲按照同一重复频率($1/T$,其中 T 为方波周期)发射,相邻光频之间保持相同间隔 Δf 和时延($\tau_1 = T/N$),如图 7 所示。 N 个频率的探针脉冲光场强度可表示为

$$E_p = \sum_{n=1}^N E_n \text{rect}[(t - n\tau_1)/\tau] \exp\{-j[\omega_n(t - n\tau_1) + \varphi_n]\}, \quad (5)$$

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数, $\omega_n = \omega_0 + 2\pi n \Delta f$, τ 为激光脉冲的脉冲宽度, E_n 为对应于第 n 个光频的光场, φ_n 为对应于第 n 个频率的光相位。取各频率光波幅度相等,可得散射回波与本振波的拍频信号为

$$I_{\text{beat}} \propto \sum_{n=1}^N \exp[-\alpha c(t + n\tau_1)/n_0] [\sin(\Delta\omega_n t) \cos \Phi_n + \cos(\Delta\omega_n t) \sin \Phi_n], \quad (6)$$

式中 $\Delta\omega_n = \omega_n - \omega_{LO}$, $\Phi_n \propto 2n_0(z, t)\omega_n z/c$, n_0 为光纤折射率。对拍频信号进行同相和正交解调后,可获得不同时延的相应光纤位置的相位信息。因此,可以在扫描的重复周期内获得 N 个光纤相位信息,从而增大系统的响应带宽。

实验演示了传感距离为 10 km 的高频振动传感。采用 $N=100$ 、频率间隔 $\Delta f=1.5$ MHz 的光源实现了 0.5 MHz 振动信号的探测。图 8(a)为根据频率 f_1 、 f_2 和 f_3 的拍频信号得到的振动波形。图 8(b)为含有振动信号的频谱,信噪比达到 16 dB。图 8(c)为 0~484 kHz 调谐振动信号的短时傅里叶变换频谱(STFT)。这些实验结果优于文献^[14-15]报道的结果(0~39.5 kHz)。与单一频率光源相比,10 km 光纤传感距离的最大扫描重复频率为 10 kHz,因此 1 kHz 的振动频率只能取得 10 个数据点,可测信号的信噪比很低。可见,多频光源可显著增大响应带宽。

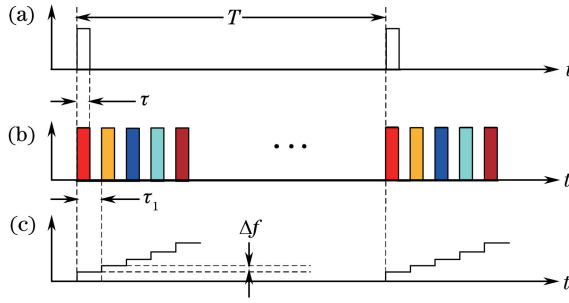


图 7 (a) 常规 OTDR 脉冲; (b) TSMF Φ -OTDR 脉冲; (c) TSMF 光频信号

Fig. 7 (a) Pulses of conventional OTDR; (b) pulses of TSMF Φ -OTDR; (c) optical frequency signal of TSMF

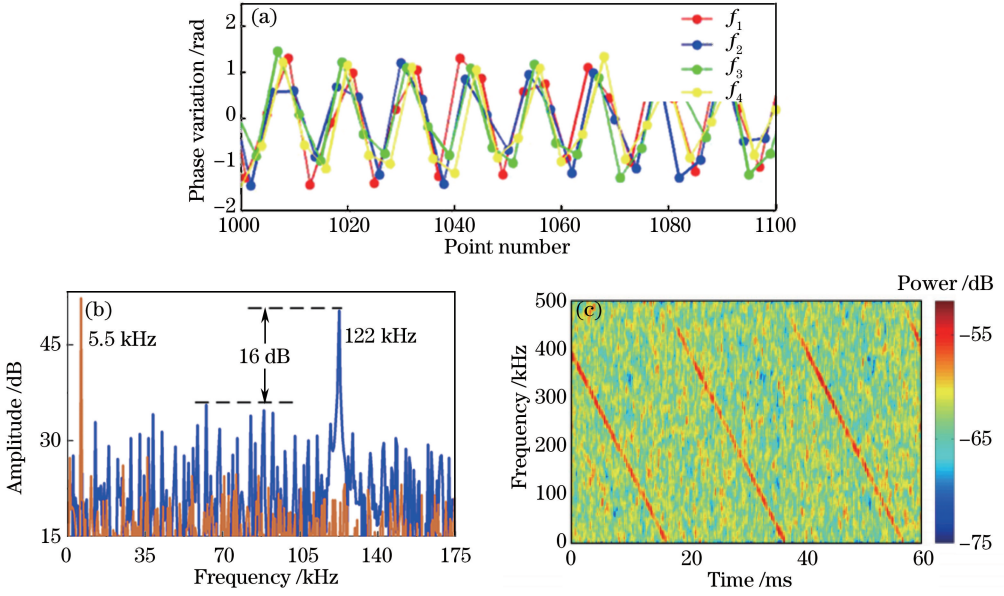


图 8 (a) 测得的振动信号; (b) 振动信号频谱和信噪比; (c) 0~484 MHz 谐振振动信号的 STFT

Fig. 8 (a) Measured variation signals; (b) frequency spectrum of variation signal and signal noise rate;

(c) STFT of resonance vibration signal with frequency of 0-484 MHz

2.4 超高空间分辨率 Φ -OTDR

Φ -OTDR 与常规的 OTDR 一样,其空间分辨率决定于探测脉冲宽度 $\Delta z = cT/(2n)$ 。在一定范围内可以通过压缩脉冲宽度来提高空间分辨率,但是这样会导致脉冲能量减小,回波信号的信噪比降低,传感范围减小。提高脉冲峰值功率将导致不利于传感的非线性效应的产生。关于 Φ -OTDR 低于米量级空间分辨率的报道都是在具有较短传感距离的系统中获得的^[15-16]。然而,在许多实际应用中,如电力系统局部放电和结构裂缝的监测,都需要更高的空间分辨率。基于在微波雷达领域显示的显著脉冲压缩效果的线性扫频(LFM)技术,提出了扫频脉冲 Φ -OTDR 的方案,大幅提高了系统的空间分辨率^[16]。扫频脉冲的光场强度可表示为

$$E_p = E_0 \text{rect}(t/T) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi K t^2), \quad (7)$$

式中 K 为扫频速率, f_0 为扫频起始点的光频。从光纤 z 位置散射的回波光场强度为

$$E_s = r_{\text{Ray}} E_0 \text{rect}(\hat{t}/T) \exp[-acT_z/n] \exp\{j[2\pi f_0(t + T_z) + \phi_z]\} \exp(j\pi K \hat{t}^2), \quad (8)$$

式中 $T_z = 2nz/c$ 为回波时延, $\hat{t} = t - T_z$ 为局域时间变量, ϕ_z 为 z 位置待测的相位, r_{Ray} 为瑞利散射系数。与本振波进行拍频后相关接收的信号可表示为

$$I_{\text{beat}} = A \text{rect}(\hat{t}/T) \exp(j\pi K \hat{t}^2), \quad (9)$$

式中 $A = 2r_{\text{Ray}} E_0 E_{\text{LO}} \exp(-acT_z/n) \exp(j2\pi f_0 T_z + j\phi_z)$ 。利用由微波雷达技术发展的匹配滤波器技术,将相关接收到的数据与一个正比于信号波形复共轭的函数进行卷积,可达到脉冲压缩的效果。匹配滤波器波

形可表示为

$$h(\hat{t}) = \text{rect}[(T - \hat{t})/T] \exp[-j\pi K (T - \hat{t})^2]. \quad (10)$$

匹配滤波后的信号为

$$y(\hat{t}) = I_{\text{beat}}(\hat{t}) \otimes h(\hat{t}) = A \frac{\text{sinc}[\pi K (T - |\hat{t}|) \hat{t}]}{\pi K (T - |\hat{t}|)}, \quad (11)$$

式中 sinc 函数的主瓣宽度近似为 $1/(KT)$, 与原始脉冲宽度相比压窄为原来的 $1/(KT)$ 。

微波雷达探测的目标是集中点式反射体, 而 OTDR 探测的是分布式散射信号, 分布式散射信号的回波是一个具有长的衰减式尾巴的展宽脉冲。对于 Φ -OTDR 所关注的振动信号探测, LFM 技术在提高空间分辨率方面的效果是十分显著的。实验采用脉冲宽度为 2 s、扫频范围为 420 MHz 的激光器, 传感光纤长度为 20 km。LFM 脉冲 Φ -OTDR 系统的实验框图如图 9(a) 所示。在光纤 19.8 km 位置处间隔 1 m 的两个位置上用两个压电陶瓷(PZT)驱动器对光纤施加扰动, 探测波形显示了 30 cm 和 40 cm 的空间分辨率, 如图 9(b) 所示。如果采用常规的单频激光器, 具有 $2 \mu\text{s}$ 脉冲宽度的探针脉冲对应于 200 m 的空间分辨率, 采用 LFM 技术将空间分辨率提高了 500 倍, 充分证实了 LFM 技术不仅适用于集中式目标^[17], 也适用于分布式的动态目标。

匹配滤波的技术充分利用了脉宽内的光能量, 从原理上优化了探测的信噪比。实验结果表明, 所得振动信号的信噪比大于 10 dB, 意味着传感器的传感距离可以获得大的延伸, 因为在许多场合, 大约 3 dB 的信噪比就可以满足传感的需求。

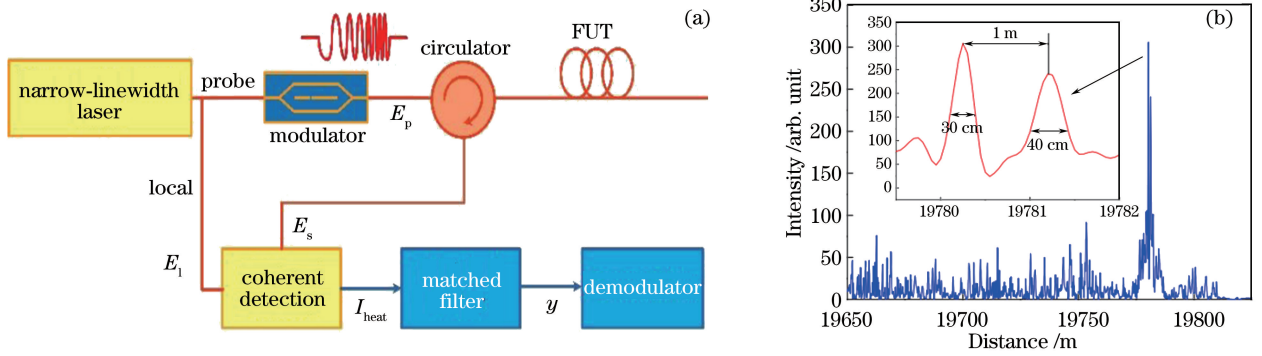


图 9 (a) LFM 脉冲 Φ -OTDR 系统框图; (b) 在间隔 1 m 的两点探测到的扰动信号

Fig. 9 (a) Diagram of LFM pulse Φ -OTDR system; (b) vibration signals detected at two points with spacing of 1 m

2.5 单频窄线宽激光器的研究

Φ -OTDR 技术的进展有赖于单频激光器的发展。接收端的相关接收方法要求光源的相干长度大于传感光纤来回的距离, 否则拍频信号的可视度将明显降低, 因此所采用的激光器必须具有单纵模和窄线宽的特性。

2.5.1 可饱和吸收和光纤光栅(FBG)选频、稳频的光纤激光器

掺铒光纤激光器(EDFL)是在 OTDR 系统中最常用的激光器之一。但是, 简单的线性腔激光器很容易运行在多纵模状态, 因此必须插入一定的选模和稳定机构才可能实现单纵模工作。本课题组采用 FBG 作为选模元件, 掺铒光纤的可饱和吸收效应可使单纵模稳定运转, 系统框图如图 10 所示^[18]。利用 FBG 的窄带反射特性, 从环形光纤激光器多纵模中选出窄带包络; 通过光纤环谐振腔的来回振荡, 进一步压窄线宽, 从而选出单纵模。窄线宽 EDFL 的结构示意图如图 10(a) 所示。在由掺铒光纤构成的萨格奈克环中注入激光光波, 环内形成周期与激光对应的驻波, 掺铒光纤具有可饱和吸收特性使得腔内形成一个动态光栅, 该动态光栅具有与激光匹配的强选频效应。利用光谱仪观察输出激光, 边模抑制比大于 60 dB。利用零拍法测量激光线宽, 结果如图 10(b) 所示, 3 dB 带宽在 5 kHz 以下。

2.5.2 超短腔磷酸盐玻璃光纤激光器

采用短腔结构实现单纵模运转可增大纵模间隔。为了维持足够高的单程增益, 必须采用具有高增益系数的有源介质, 因此在光纤基质中掺入高浓度的稀土离子。对于石英基质, 掺铒浓度是有限的。研究者们发

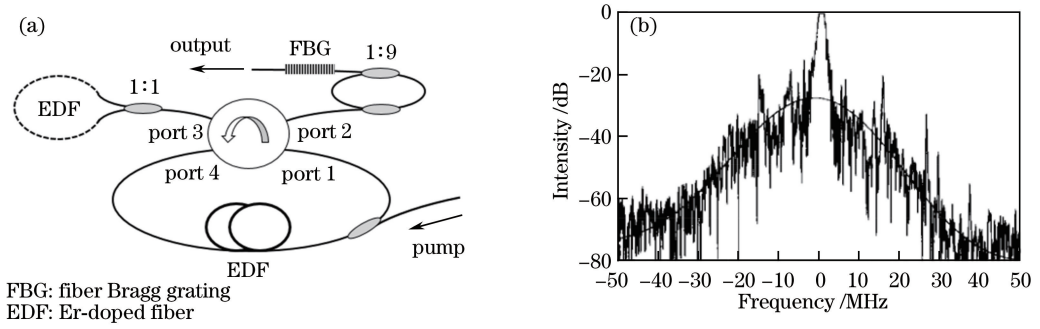


图 10 (a)窄线宽 EDFL 结构示意图;(b)时延零差法测得的频谱

Fig. 10 (a) Structural diagram of narrow linewidth EDFL; (b) frequency spectrum obtained by delay homodyne method

现磷酸盐玻璃具有高的铒/镱(Er/Yb)掺入浓度的可行性。本课题组将长度为 2 cm 的国产铒镱共掺磷酸盐玻璃光纤作为增益介质,搭建了由窄带反射谱 FBG 和高反镜构成的线性腔。在 500 mW 半导体激光器抽运下,获得了功率约为 100 mW 的单频单偏振激光^[11],激光线宽小于 5 kHz。单偏振磷酸盐玻璃光纤激光器的结构示意图和时延零差信号频谱分别如图 11(a)、(b)所示^[19-20]。

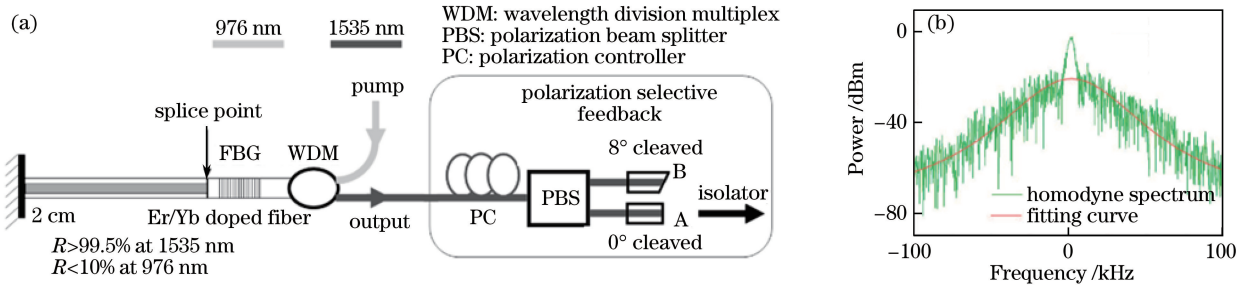


图 11 (a)单偏振磷酸盐玻璃光纤激光器的结构示意图;(b)时延零差信号频谱

Fig. 11 (a) Structural schematic of single polarization phosphate glass fiber laser; (b) delay homodyne signal frequency spectrum

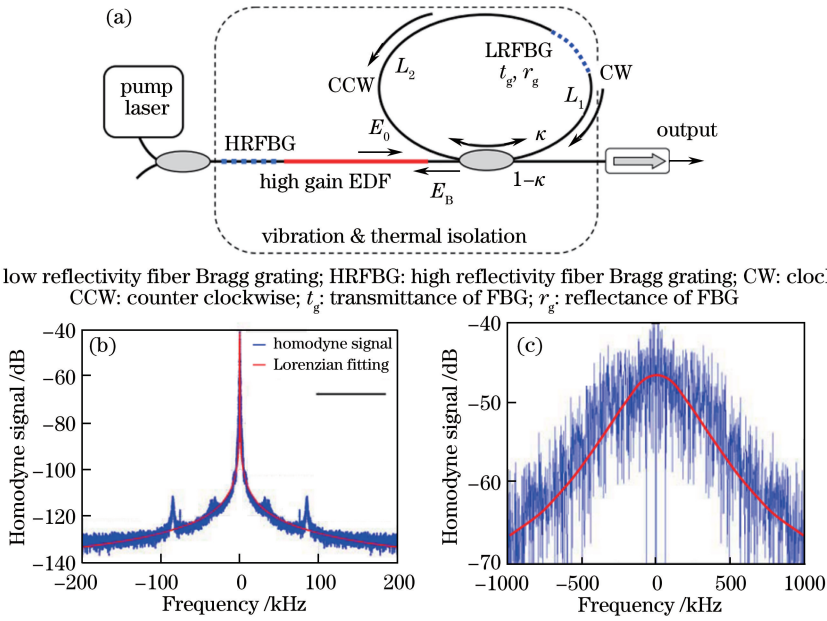
2.5.3 利用 FBG 和光纤环复合腔慢光效应的窄线宽激光器

根据肖洛-汤斯的激光基本理论,激光线宽与光子腔内寿命的平方成反比。近几年,光学领域研究热点之一的慢光效应为增大光子寿命提供了一个新思路。光纤环谐振器是一个具有慢光效应的元件,但是它是一个全通滤波器,没有反射功能,不能作为腔镜使用。本课题组在理论上和实验上证明了将光纤环与 FBG 相结合可以获得具有极窄带宽、显著慢光效应的反射元件^[21]。图 12(a)为将该元件作为腔镜之一构成的 EDFL 结构框图,该元件的慢光效应与光波在光纤环内的循环传输时间有关。因此,插入 FBG 的反射率(R)需很低。实验中采用反射率低于 1% 的 FBG,同时光纤耦合器的分束比也要很小,实验中采用 20:80 的分束比。文献^[22]报道了对这一慢光元件特性的详细分析和模拟计算。图 12(b)为用时延零差自相关方法测得的激光器的线宽。结果表明,根据洛伦兹线形拟合曲线估算的本征线宽为 10 Hz,由曲线顶部拟合的包络谱线半峰全宽约为 150 Hz;该器件在 500 Hz 时的相对强度噪声(RIN)为 -125 dB/Hz,在 500 Hz 时的频率噪声为 30 Hz/Hz^{1/2}。

2.6 激光移频和扫频技术的研究

上述超高响应带宽和超高空间分辨率 Φ -OTDR 方案有赖于激光的灵活调谐和宽带扫频技术。在保证高相干性的条件下,用电光调制器(EOM)和 AOM 对连续工作的单频激光在腔外进行调谐和调制是一个最佳的方案。铌酸锂波导马赫-曾德型 EOM 可以对激光束进行强度调制,从而获得一系列的边带。边带频移正比于调制频率,边带幅度分布与调制制度有关。用相应的窄带光滤波器或时域选通,就可以实现从基带到边带的移频。第 2.4 节中的高响应带宽 Φ -OTDR 就是通过采用 EOM 获得了时域排序多频激光光源。

EOM 的调制频率可以通过压控振荡器(VCO)方便地进行调谐,从而获得激光的 LFM,但是 VCO 的工作带宽有限。为了进行大范围的扫频,可以利用高阶边带,但是边带幅度随阶数的增加而下降。本课题组提出了一个利用半导体激光器的注入来放大输出功率的方案^[23],如图 13 所示。该系统采用商售的单频激光



LRFBG: low reflectivity fiber Bragg grating; HRFBG: high reflectivity fiber Bragg grating; CW: clockwise; CCW: counter clockwise; t_g : transmittance of FBG; r_g : reflectance of FBG

图 12 (a) FBG 与光纤环构成的复合腔激光器结构; (b) 时延零差频谱; (c) 顶部放大曲线
Fig. 12 (a) Laser structure with composite cavity composed of FBG and fiber ring;
(b) delay homodyne frequency spectrum; (c) amplification curve at top

器作为基带光源, 采用 VCO 驱动的 EOM。基带扫频范围为 0~3 GHz, 扫频速率为 0.5 THz/s。选择 5 阶边带作为种子光来注入锁定的分布反馈式 (DFB) 激光器, 该激光器的工作电流和温度由 VCO 同一频率发生器同步控制, 从而使其纵模不失锁。注入锁定的激光可获得扫频范围达 0~15 GHz、扫频速率达 2.5 THz/s 的扫频输出。测量得到激光的边模抑制比达 30~40 dB, 线宽维持在 2.5 kHz。

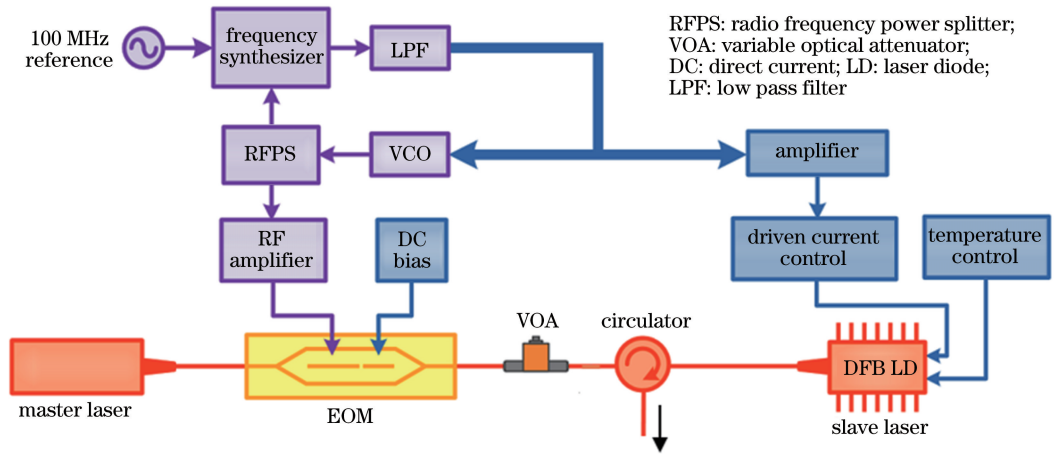


图 13 利用半导体激光器的注入来放大输出功率的方案
Fig. 13 Schematic of amplifying output power by injection of semiconductor laser

用 EOM 实现移频的方法简单易行, 但是能量效率比较低, 因为许多其他边带的分量都被浪费了。研究者们提出多个实现单边带调制的方案, 其中双平行马赫-曾德调制器 (DPMZM) 的设计合理, 使用方便, 可实现载波抑制单边带调制。本课题组利用 DPMZM 和宽带 VCO, 获得了扫频范围为 3.85 GHz、扫频速率达 80 GHz/s 的高速扫频实验结果^[24]。

3 Φ -OTDR 的工程应用技术

Φ -OTDR 以其灵敏度高、抗电磁干扰、隐蔽性好以及定位精度高等优势, 在长距离周界安防、油气管线安全监控、智能电网和铁路安全监控等领域得到了广泛应用。近年来, 本课题组也在相关领域取得了一定的成效。

3.1 周界安防

Φ -OTDR 系统作为一种分布式振动传感系统,可以实现光纤沿线扰动的实时检测,在周界安防、国境线以及核心区域的入侵检测等领域发挥了重要的作用^[2,5-6]。周界安防领域需通过复杂的扰动信号判断入侵类型。提出了基于频谱欧氏距离(EDFS)的快速模式识别方法,对扰动信号进行实时分析和识别^[25]。

EDFS 方法主要分为 4 个步骤:1) 初步判断扰动位置,利用短时能量和平移差分对扰动位置的时间序列进行分析,提取有效扰动数据;2) 对上述有效扰动数据作快速傅里叶变换,并进行归一化处理,以获得频域特征;3) 重复对多类扰动信号进行上述两步处理,将最能体现同类扰动信号的频域特征作为参考模板,建立模板数据库;4) 将扰动信号的待识别数据经过步骤 1)、2)处理,并将获得的频域特征与步骤 3)建立的模板数据库进行比对,以确定扰动信号类型。

实验中建立了三类扰动信号的模板(A, B, C),并对这三类扰动信号和自然风信号进行测试。图 14(a)~(c)和图 14(d)~(f)为分别采用常规的动态时间规划(DTW)和 EDFs 方法对扰动信号进行分类的结果。从左到右依次为扰动信号与 A、B、C 三类模板的相似度,可以看出,EDFS 方法的识别率不低于 DTW。同时,EDFS 的运算耗时不足 DTW 的十分之一。图中横坐标为测试序号;纵坐标 DTW 和 EDFs 为动态时间规划和频移欧氏距离,均为对数相对单位。

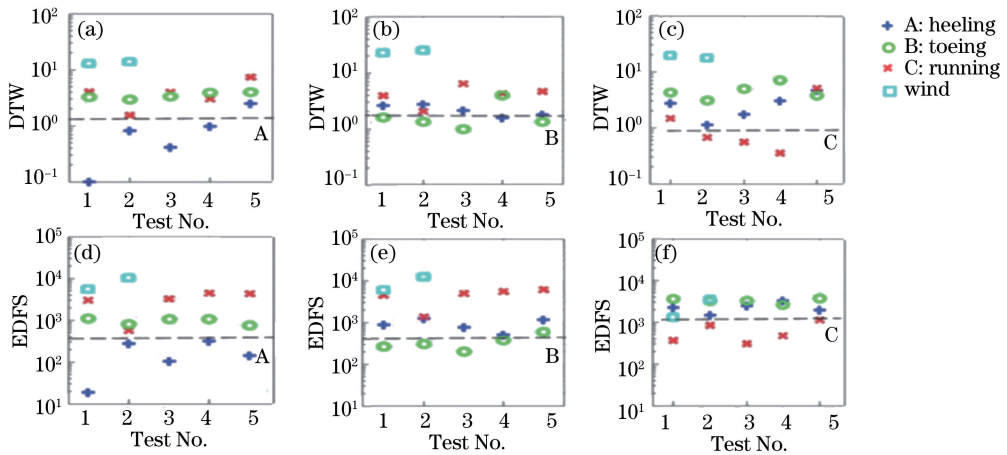


图 14 采用 2 种方法得到的模式识别结果。(a)(b)(c) DTW;(d)(e)(f) EDFs

Fig. 14 Pattern recognition results obtained by two methods. (a)(b)(c) DTW; (d)(e)(f) EDFs.

3.2 车辆定位与跟踪技术

实时车辆定位与跟踪技术多采用全球定位系统(GPS)、无线射频识别(RFID)以及超宽带无线通信(UWB)等。然而,这些传统技术需要在被跟踪车辆上安装相应的设备或磁卡,不便于管理和使用,易于损坏,隐蔽性差。

2014 年,本课题组将 Φ -OTDR 系统用于园区车辆跟踪^[26]。 Φ -OTDR 利用光纤对其环境扰动进行检测,通过检测车辆的扰动信号来获取车辆的位置和速度等信息。因此,基于 Φ -OTDR 的车辆定位技术具有使用方便、隐蔽性好以及抗电磁干扰等优势。

沿路边的路牙石铺设传感光缆,并用水泥固定光缆。首先对解调后的扰动信息进行动态频谱分析(DSFI),确定车辆扰动的频率范围,以提升信噪比;之后进行二维数字平滑滤波,消除环境因素引起的孤岛噪声,便于车辆的识别和定位。图 15(a)为一辆车从检测近端驶往远端并返回的瀑布图;图 15(b)为 4 辆车依次从检测远端驶向近端的瀑布图。由图 15 可以看出,车辆行驶的信号非常清晰,效果显著。

3.3 铁路安全检测技术

随着我国铁路事业的迅猛发展,列车的安全运营愈加重要。列车行驶安全和基础设施安全是关系列车安全运营的两大方面。综合运用 Φ -OTDR 和布里渊光时域反射计(BOTDR),对列车的行驶状态及铁路基础设施进行检测^[27],为铁路安全提供了一种全新的分布式、全天候检测方法。

如图 16 所示,BOTDR 主要针对基于应变和温度变化的检测,如光缆异常温升和边坡位移等。 Φ -OTDR 则针对基于振动的安全检测,如列车脱轨、车体分离、中途停车、堑坡落石、非法施工以及人员入侵等。

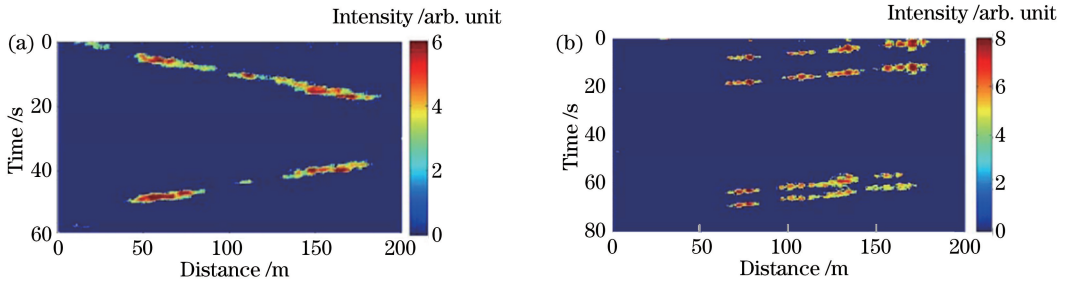


图 15 (a) 一辆车往返通过的瀑布图; (b) 4 辆车依次通过的瀑布图

Fig. 15 (a) Waterfall pattern detected for one car driving through round; (b) waterfall pattern detected for four cars driving through successively

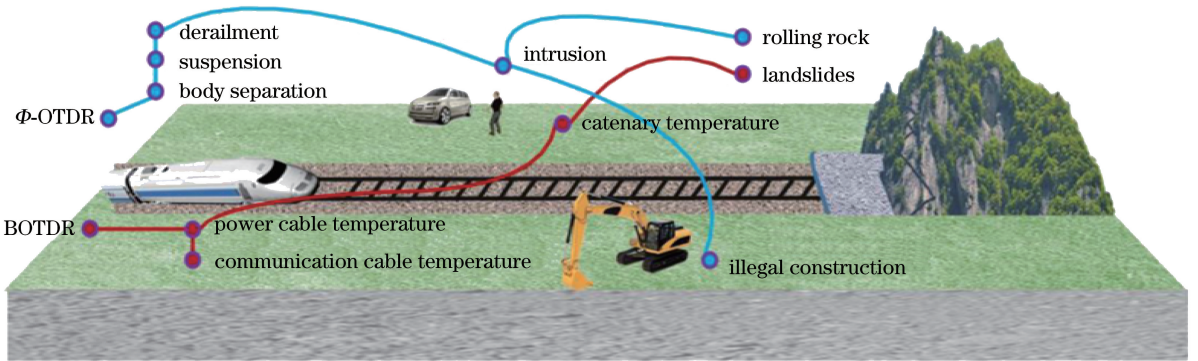


图 16 铁路安全检测

Fig. 16 Railway safety monitoring

基于 Φ -OTDR 的检测方法主要分为 4 个步骤: 1) 系统发送探测脉冲, 对瑞利散射信号进行解调; 2) 分析扰动信息, 根据时间、空间等特征识别列车信号, 获取列车位置、车速和车体长度等信息; 3) 根据列车信息对扰动信号进行相应的处理; 4) 综合分析扰动信号的特征, 对其进行分类和识别并发送报警。

这些工程应用的突破对相位敏感光时域反射仪的推广和应用起到了一定的作用。研究人员在工程应用的实践中发现, 相位敏感光时域反射仪的实际应用以及处理传感器基本性能指标的提升必须结合信号判别的要求, 因此需开展模式识别和相关算法的研究, 以满足各种不同类型传感的需求。

4 发展动向展望

国内外许多研究团队对 Φ -OTDR 的研究做出了重要贡献。从传感器性能的角度来看, 值得关注的有以下几个方面。

1) 提高传感器的探测灵敏度和其他性能。文献[3]报道了利用保偏光纤进行传感, 进一步提高了探测灵敏度, 用折断铅笔作为检验可探测到振动源离开光纤 18 cm 的信号^[28]。在信号处理方法方面, 文献[29]报道了利用图像处理方法加快数据处理速度的效果; 文献[30]报道了采用小波变换方法进行降噪的效果; 文献[31]改进了 I/Q 解调方法; 文献[32]发挥 I/Q 解调方法的作用, 进行了纳应变的测量; 文献[33]发展了数据处理方法并获得相位的定量分析; 文献[34]提出了有效的信号处理方法来鉴别和消除干涉衰落。多参量综合传感技术也是这一领域的发展趋势。

2) 延伸光纤的传感距离。限制传感器的传感距离的因素是光功率的传输衰减。研究者们对采用掺铒光纤放大器、光纤拉曼放大(FRA)和光纤布里渊放大(FBA)等技术来放大探针光脉冲功率或回波信号的方法进行了广泛研究^[35-39]。FBA 具有分布式放大的优点, 研究者们对前向和后向抽运的放大方案进行了探索, 通过将 FRA 和 FBA 相结合, 实现了传感距离为 175 km 的检测^[39]。

3) 体系结构改进和探索。在体系结构方面, 提出了不同于相干接收和常规强度探测的新方案。思路之一是在接收端用一个时延与脉冲宽度相等的马赫-曾德干涉仪或迈克耳孙干涉仪来获得前后脉冲散射回波

之间的干涉,并提取相关的相位信息^[40-42]。这一方案大幅降低了光源的相干性,不需要价格昂贵的窄线宽激光器,缓解了相干瑞利噪声的影响,但是该方案忽略了相干检测中本振信号的放大作用。该方案受到广泛关注,其长处和适用性还有待发挥。该方案中,干涉仪采用了 3×3 光纤耦合器,解决了由 2×2 耦合器构成的干涉仪中存在的灵敏度死区的问题,便于进行相位展开运算。

4) 工程应用不断拓展。随着高速铁路在我国的迅猛发展和出口需求的增长,铁路安全监控为技术关键之一。文献[43]将 Φ -OTDR应用于现场火车的定位和速度的测量。

5 结束语

相位敏感光时域反射计灵敏度高,可实时检测光纤沿线的扰动信号,在大型结构健康监测、周界安防、长距离管线状况监测、水听器以及地震监测等应用领域有广阔的应用前景。如何确保该技术更好地在这些领域发挥作用是亟待解决的重要问题。对本课题组在相位敏感光时域反射仪领域的研究及其应用进展进行了较为系统的介绍,着重论述了本课题组近年来的工作。

致谢 感谢上海铁路局和南京派光科技有限公司在铁路安全检测项目中提供的资助和支持,感谢上海波汇有限公司在周界安防项目中提供的资助和支持,感谢中国科学院上海光学精密机械研究所青年创新促进会提供的支持。

参 考 文 献

- [1] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-03-16.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] King J P, Smith D F, Richards K, *et al.* Development of a coherent OTDR instrument[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(4): 616-624.
- [5] Juarez J C, Taylor H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1968-1971.
- [6] Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -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 ϕ -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.
- [7] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, *et al.* Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[C]. SPIE, 2011, 8311: 83110S.
- [8] Liang Kezhen, Pan Zhengqing, Zhou Jun, *et al.* Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805004.
梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805004.
- [9] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, *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.
- [10] 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 Φ -OTDR system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905003.
周俊, 潘政清, 叶青, 等. 基于多频率综合鉴别 Φ -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): 0905003.
- [11] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, *et al.* Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[C]. SPIE, 2012, 8421: 842129.
- [12] Pan Z Q, Wang Z Y, Ye Q, *et al.* High sampling rate multi-pulse phase-sensitive OTDR employing frequency division

- multiplexing[C]. SPIE, 2014, 9157: 91576X.
- [13] Wang Z Y, Pan Z Q, Fang Z J, *et al.* Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [14] Iida D, Toge K, Manabe T. High-frequency distributed acoustic sensing faster than repetition limit with frequency-multiplexed phase-OTDR[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, 2016: 16227057.
- [15] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over >100 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 32(8): 1510-1518.
- [16] Lu B, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* High spatial resolution phase-sensitive optical time domain reflectometer with frequency-swept pulse[J]. Optics Letters, 2016, 42(3): 391-394.
- [17] Zou W W, Yang S, Long X, *et al.* Optical pulse compression reflectometry: Proposal and proof-of-concept experiment [J]. Optics Express, 2015, 23(1): 512-522.
- [18] Yang Jing, Qu Ronghui, Sun Guoyong, *et al.* A novel single longitudinal mode fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4): 441-444.
杨 敬, 瞿荣辉, 孙国勇, 等. 一种新型结构的单纵模光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 441-444.
- [19] Yang F, Ye Q, Pan Z Q, *et al.* 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. Optics Communications, 2012, 285(2): 149-152.
- [20] Pan Z Q, Cai H W, Meng L, *et al.* Single-frequency phosphate glass fiber laser with 100-mW output power at 1535 nm and its polarization characteristics[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(1): 52-54.
- [21] Pan Z P, Ye Q, Cai H W, *et al.* Fiber ring with long delay used as a cavity mirror for narrowing fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1621-1624.
- [22] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* Novel slow-light reflector composed of a fiber ring resonator and low-reflectivity fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 3016-3022.
- [23] Wei F, Lu B, Wang J, *et al.* Precision and broadband frequency swept laser source based on high-order modulation-sideband injection-locking[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4970-4980.
- [24] Wang J, Chen D J, Cai H W, *et al.* Fast optical frequency sweeping using voltage controlled oscillator driven single sideband modulation combined with injection locking[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7038-7043.
- [25] Wang Zhaoyong, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.* Fast pattern recognition based on frequency spectrum analysis used for intrusion alarming in optical fiber fence[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405010.
王照勇, 潘政清, 叶 青, 等. 用于光纤围栏入侵告警的频谱分析快速模式识别 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405010.
- [26] Wang Z Y, Pan Z Q, Ye Q, *et al.* Novel distributed passive vehicle tracking technology using phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(10): 100603.
- [27] Qu Ronghui, Wang Zhaoyong, Cao Yulong, *et al.* Railway safety monitoring system and monitoring method: CN201610576448.7[P]. 2016-07-21.
瞿荣辉, 王照勇, 曹玉龙, 等. 铁路安全监测系统和监测方法: CN201610576448.7[P]. 2016-07-21.
- [28] 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.
- [29] 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): 6586-6590.
- [30] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 542-544.
- [31] Wang Z N, Zhang L, Wang S, *et al.* Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection [J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858.
- [32] Dong Y K, Chen X, Liu E H, *et al.* Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [33] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, *et al.* The development of an Φ -OTDR system for quantitative vibration measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1349-1352.
- [34] Pang F F, He M T, Liu H H, *et al.* A fading-discrimination method for distributed vibration sensor using coherent detection of ϕ -OTDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(23): 2752-2755.
- [35] Munster P, Vojtech J, Sysel P, *et al.* Φ -OTDR signal amplification[C]. SPIE, 2015, 9506: 950606.

- [36] Peng F, Peng Z P, Jia X H, *et al.* 128 km fully-distributed high-sensitivity fiber-optic intrusion sensor with 15 m spatial resolution[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: 14546688.
- [37] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, *et al.* Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over >100 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [38] Mermelstein D, Shacham E, Biton M, *et al.* Brillouin amplification and processing of the Rayleigh scattered signal[J]. Optics Letters, 2015, 40(14): 3340-3343.
- [39] Wang Z N, Zeng J J, Li J, *et al.* 175 km phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification[C]. SPIE, 2014, 9157: 9157D5.
- [40] 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.
- [41] Wang C, Wang C, Shang Y, *et al.* Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry[J]. Optics Communications, 2015, 346: 172-177.
- [42] Cao Y L, Yang F, Xu D, *et al.* Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on a 120° -phase-difference Michelson interferometer[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(5): 050701.
- [43] Duan N, Peng F, Rao Y J, *et al.* Field test for real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR)[J]. SPIE, 2014, 9157: 9157A.