



DOI: 10.12086/oe.2018.170678

## 分布式多参数光纤传感技术研究进展

况洋<sup>1</sup>, 吴昊庭<sup>1</sup>, 张敬栋<sup>1</sup>, 周欢<sup>1</sup>, 郑华<sup>1</sup>, 黄礼刚<sup>1</sup>, 白永忠<sup>2</sup>, 屈定荣<sup>2</sup>,  
邱枫<sup>2</sup>, 朱涛<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

<sup>2</sup>中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266000

**摘要:** 分布式光纤传感系统利用光纤既能传感又能传输信号的特性实现对光纤沿线振动、应变、温度等物理量的长距离连续测量, 在周界安防、电网管道监控、大型结构健康监测等领域具有十分广阔的应用前景。上述的实际应用中, 事件或故障的发生通常表现为振动、应变以及温度等物理量的改变, 振动的探测频响高低、应变探测的动态响应能力以及多参数的同时测量都会影响事件的定位或预警。因此, 振动的宽频测量、应变的动态测量以及多参数测量, 对事件定位和信息完整捕获起着至关重要的作用, 能够推动分布式光纤传感的应用发展。本文介绍了近年来在分布式光纤传感系统中, 基于瑞利散射的宽频振动测量、基于布里渊散射的应变动态测量以及基于多散射的多参数测量取得的研究进展。

**关键词:** 分布式光纤传感; 多参数测量; 瑞利; 布里渊; 拉曼

**中图分类号:** O436.3; TN253

**文献标志码:** A

**引用格式:** 况洋, 吴昊庭, 张敬栋, 等. 分布式多参数光纤传感技术研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170678

## Advances of key technologies on distributed fiber system for multi-parameter sensing

Kuang Yang<sup>1</sup>, Wu Haoting<sup>1</sup>, Zhang Jingdong<sup>1</sup>, Zhou Huan<sup>1</sup>, Zheng Hua<sup>1</sup>, Huang Ligang<sup>1</sup>,  
Bai Yongzhong<sup>2</sup>, Qu Dingrong<sup>2</sup>, Qiu Feng<sup>2</sup>, Zhu Tao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems (Education Ministry of China), Chongqing University, Chongqing 400044, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266000, China

**Abstract:** Based on the fiber's characteristics of both sensing and transmission for physical signal, distributed fiber sensing system can realize long-distance and continuous measurement of the strain, temperature and vibration along fiber, which has a great promise in applications of the perimeter security, electric wire and pipeline monitoring, structural health diagnosis for large infrastructure, and so on. The occurrence of events or failures usually causes the changes of multiple parameters such as vibration, strain and temperature, whose measurement contributes to fault diagnosis and intrusion recognition along sensing fiber. This paper overviews the recent progress in distributed fiber

收稿日期: 2017-10-09; 收到修改稿日期: 2018-02-26

基金项目: 科技部重点项目计划(2016YFC0801202); 国家自然科学基金资助项目(61635004, 61377066, 61705024); 重庆市科委杰青支持项目(CSTC2014JCYJJQ40002); 中央高校基础研究基金资助项目(106112017CDJZRPY0005)

作者简介: 况洋(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感技术方面的研究。E-mail: 20150802012@cqu.edu.cn

通信作者: 朱涛(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光器及调控技术、光电功能材料及功能器件, 以及光纤传感技术等方面的研究。E-mail: zhutao@cqu.edu.cn

sensing systems, including wide-frequency vibration measurement based on Rayleigh scattering, dynamic measurement of strain based on Brillouin scattering and multi-parameter measurement based on multiple scattering mechanisms.

**Keywords:** distributed optical fiber sensing; multi-parameter measurement; Rayleigh; Brillouin; Raman

**Citation:** Kuang Y, Wu H T, Zhang J D, *et al.* Advances of key technologies on distributed fiber system for multi-parameter sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170678

## 1 引言

分布式光纤传感技术利用光纤自身既作为信号传输介质又作为传感单元的特点来连续获取光纤沿线振动、应变以及温度等物理量的分布情况，从而实现分布式长距离测量<sup>[1]</sup>。分布式光纤传感技术主要包括基于干涉原理<sup>[2-3]</sup>的分布式传感技术和基于瑞利<sup>[4]</sup>、布里渊<sup>[5-6]</sup>以及拉曼<sup>[7-8]</sup>等散射机制的分布式传感技术，这些技术的单独或结合使用不仅能实现高精度和高空间分辨率传感，而且还能实现多物理参数的同时测量。

如今，分布式光纤传感在周界安防、电力石油管线和轨道交通的安全监控以及大型建筑结构的健康监测等场合中具有非常广阔的应用前景<sup>[9-17]</sup>。2014年电子科技大学饶云江教授课题组利用基于相位敏感型光时域反射技术(phase-sensitive optical time domain reflectometry,  $\phi$ -OTDR)的分布式传感系统探测铁轨沿线的振动信号，实现了在 10.2 km 距离内运行列车的实时定位，并且对列车位置微分后能实时提取列车速度<sup>[14]</sup>。同年，该课题组搭建了基于 $\phi$ -OTDR 的管道入侵监测系统，利用拉曼放大和相干探测实现了长达 131.5 km 的管道安防监控，空间分辨率约为 8 m<sup>[15]</sup>。2017年，Maraval 等人利用基于自发布里渊散射技术(Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)实现了实验室模拟搭建的管道健康监测，应变精度约为  $\pm 40 \mu\epsilon$ <sup>[16]</sup>。实际应用中，仅对单一物理量的监测往往并不能全面有效分析入侵事件或故障。目前国内外多参数测量主要集中在对温度和应变等静态物理量的同时测量。然而，探测振动的频响范围和应变的动态响应速度及范围都会严重影响事件定位和识别的效果。因此，多参数测量首先需要解决的是宽频振动测量和应变的动态测量，在此基础上融合多散射机制实现多参数的测量。下面将分为三部分进行介绍：理论分析，国内外研究进展，总结与展望。

## 2 理论分析

光时域反射技术的工作原理是将一束调制后的脉

冲光注入到传感光纤中，脉冲光在向前传输过程中不断产生后向散射光，通过光电探测器采集后向散射信号并分析处理。采用光时域反射技术的主要包括  $\phi$ -OTDR、基于受激布里渊散射的布里渊光时域分析仪(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)以及基于拉曼散射的拉曼光时域反射计(Raman optical time domain reflectometry, ROTDR)，这三种后向散射光的光谱关系如图 1 所示。

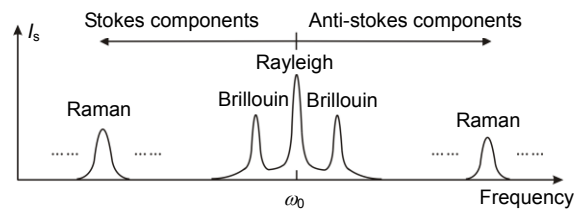


图 1 光纤中三种自发散射的频谱图<sup>[31]</sup>

Fig. 1 The frequency spectrum of three typical spontaneous backscattering<sup>[31]</sup>

ROTDR 系统中拉曼散射光强度只与温度有关。通过对斯托克斯拉曼散射光与反斯托克斯拉曼散射光同时采集，利用它们的比值来进行温度解调，该解调方法可以消除光源不稳定性、环境干扰及光纤微弯引起的损耗等影响。反斯托克斯散射光与斯托克斯散射光强度之比为

$$F(T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \left( \frac{\lambda_{AS}}{\lambda_S} \right)^{-4} \exp\left( \frac{-h\Delta\nu}{k_B T} \right), \quad (1)$$

其中： $\lambda_{AS}$ 、 $\lambda_S$  分别为反斯托克斯和斯托克斯拉曼散射光的波长， $h$  是普朗克常数， $\Delta\nu$  为光纤分子的拉曼声子频率， $k_B$  是玻尔兹曼常数， $T$  是热力学温度。由上式可得到光纤沿线的温度信息，从而实现对分布式光纤温度的解调。

$\phi$ -OTDR 系统主要用于振动测量。采用超窄线宽的激光器，光源经过声光调制器(acoustooptic modulator, AOM)调制为脉冲光，并注入到传感光纤。脉冲

宽度决定系统空间分辨率,即 $\Delta z=v_g T_p/2$ ,其中 $v_g$ 是光纤中光传播的群速度, $T_p$ 是光脉冲宽度。由于光源具有很高的相干性,从而导致探测器探测到的光强是光纤沿线后向瑞利散射光干涉的结果。外界物理量的变化会导致多光束干涉光的相位变化,最终使得干涉的光强发生变化。扰动信号能通过光强变化信号以及前后脉冲光注入传感光纤的间隔时间来确定。但 $\phi$ -OTDR系统为了避免干涉信号之间的串扰,在一个测量周期内传感光纤只允许传输单个光脉冲,则系统中前后脉冲最小间隔时间为 $\tau=2L/v_g$ ,其中 $L$ 为传感光纤长度。显然,脉冲光的最大重复频率 $f_{\max}=1/\tau=v_g/2L$ 。由上式可知,光纤长度极大限制了振动的探测频响范围。此外,信号处理中平均算法虽然能提升定位信号的信噪比,但平均次数过多同样也会使得探测频响降低<sup>[18]</sup>。

BOTDA系统主要用于温度和应变的测量。一束光作为泵浦光,并调制成脉冲光实现分布式测量,脉冲宽度同样决定系统空间分辨率;另一束光是连续光作为探测光,其频率比泵浦光频率低约一个光纤布里渊频移,然后进行频率调制。泵浦光和探测光分别从光纤两端注入到传感光纤,发生受激布里渊散射。对受激布里渊散射放大后的探测光进行采集处理,扫描探测光频率,得到光纤布里渊增益谱。利用洛伦兹拟合得到布里渊中心频移,根据如下公式可以进行温度或应变的解调:

$$\Delta\nu_B = C_{B,\varepsilon}\Delta\varepsilon + C_{B,T}\Delta T \quad (2)$$

其中: $\Delta\nu_B$ 为光纤布里渊频移的改变量, $C_{B,\varepsilon}$ 、 $C_{B,T}$ 分别为光纤应变和温度系数, $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$ 为光纤的应变和温度变化。

前面提到BOTDA系统探测光的频率需要在光纤布里渊频移附近扫描,但会带来耗时的频率扫描过程。同样响应速度还会受到泵浦脉冲的渡越时间、平均次数、微波源的频率转换速度<sup>[19-20]</sup>等因素的限制,使得BOTDA仅适用于温度、应变等静态参数的测量,很难实现大范围的动态测量。

前面分析可知,传统 $\phi$ -OTDR的分布式振动测量的频率响应主要受到平均次数和光纤长度的限制,导致很难用于高频事件的响应和识别。传统BOTDA系统动态响应速度还受到渡越时间、平均次数、微波源的频率转换速度的限制。下面将介绍一些克服上述限制因素的关键技术,从而实现振动宽频测量和应变动态测量,并介绍基于多散射机制的多参数测量。

### 3 国内外研究进展

#### 3.1 基于瑞利散射的光纤分布式宽频振动传感技术研究

传统的基于 $\phi$ -OTDR分布式振动传感系统对于高频振动事件的定位和识别主要受到平均次数和传感距离的限制。其中采用平均算法是为了得到更好的定位信噪比,但却牺牲了探测频率范围。2010年,加拿大渥太华大学鲍晓毅教授课题组<sup>[18]</sup>在基于外差探测的 $\phi$ -OTDR系统上利用相干外差探测方式有效提高了后向瑞利散射信号的信噪比。并提出用移动平均和移动差分的方法处理光电转换后的后向瑞利散射信号,在确保较高定位信噪比的前提下有效减少平均次数,从而提高系统探测频率响应以及实时性,但该方法仍受限于传感光纤长度。

为了进一步提高探测频率响应,重庆大学朱涛教授课题组提出基于 $\phi$ -OTDR与马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)融合的分布式振动传感系统<sup>[21-22]</sup>,如图2所示。传统的基于干涉原理的分布式传感系统具有频率响应范围宽等特点,但其定位精度不高;而基于 $\phi$ -OTDR的分布式系统具有定位精确和多点测量等特点,但其探测频响受到传感距离和数据处理的限制。利用基于 $\phi$ -OTDR与MZI融合的分布式传感系统能够保证精确测量的同时提高探测振动的频率响应,沿1064 m传感光纤上实现了5 m的空间分辨率以及10 Hz到3 MHz的频率响应范围。

图2中分布式反馈激光器(distributed feedback lasers, DFB)经过耦合器分成两路光:一路作为参考光;另一路作为探测光,并以光脉冲和背景光的形式周期性地注入到传感光纤,即一个周期光信号包括一个具有较高光功率的窄脉冲光 $I_1$ ,以及一个具有较低光功率的背景光 $I_2$ 。利用磕铅笔的方式来模拟高频振动,频率高达数十兆赫兹,作用传感光纤后,对窄脉冲 $I_1$ 产生的后向瑞利散射信号进行移动平均和差分处理,即可实现定位。与此同时,连续光在传感光纤末端和参考光发生干涉,对干涉信号解调并进行快速傅里叶变换即可得到振动信号的频率信息。图3和图4给出了任意信号发生器的偏置电压分别为50 mV、100 mV、150 mV和200 mV时振动测量的定位和频率信息。图3可见长度为1065 m的传感光纤约610 m处有明显的峰值变化就是磕铅笔的位置,并表明定位信噪比随着电压偏置量的增加而降低。图4可知,该传感系统可

探测最高振动频率和幅频信噪比随着电压偏置量的增加而增加。其中当电压偏置量为 200 mV 时，实验中得到的最高可探测频率为 3 MHz。而传统的 $\phi$ -OTDR 系统在相同光纤长度下，最高可探测频率仅约为 50 kHz。因此在该方法下探测频响得到了显著的提升。

基于脉冲调制的融合型传感系统能够实现长距离高空间分辨率和宽频振动测量。但是连续光  $I_2$  的强度对系统的性能影响很大。当连续光  $I_2$  强度较强时，脉冲光  $I_1$  的散射信号会受到连续光  $I_2$  散射信号的干扰，降低 $\phi$ -OTDR 定位的信噪比；若连续光  $I_2$  强度较低，

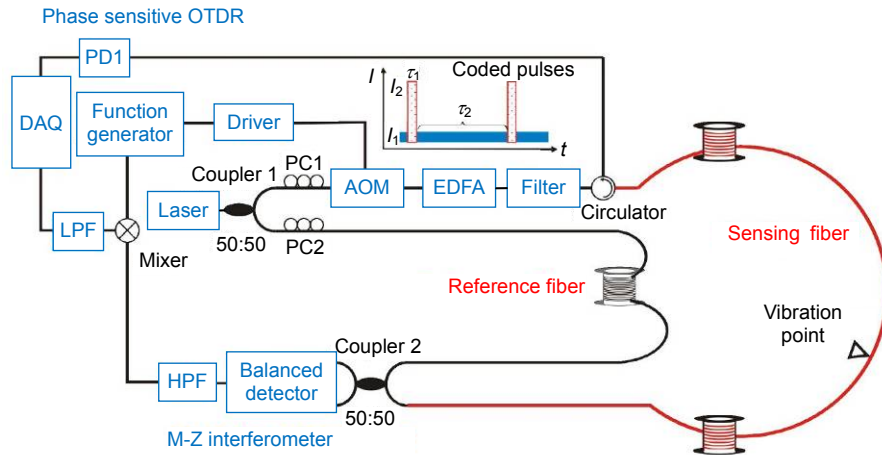


图 2 基于脉冲调制且融合 $\phi$ -OTDR 与 MZI 的分布式光纤传感实验系统图<sup>[21]</sup>

Fig. 2 The experimental setup of distributed optical fiber sensing system based on both  $\phi$ -OTDR and MZI with modulated pulse<sup>[21]</sup>

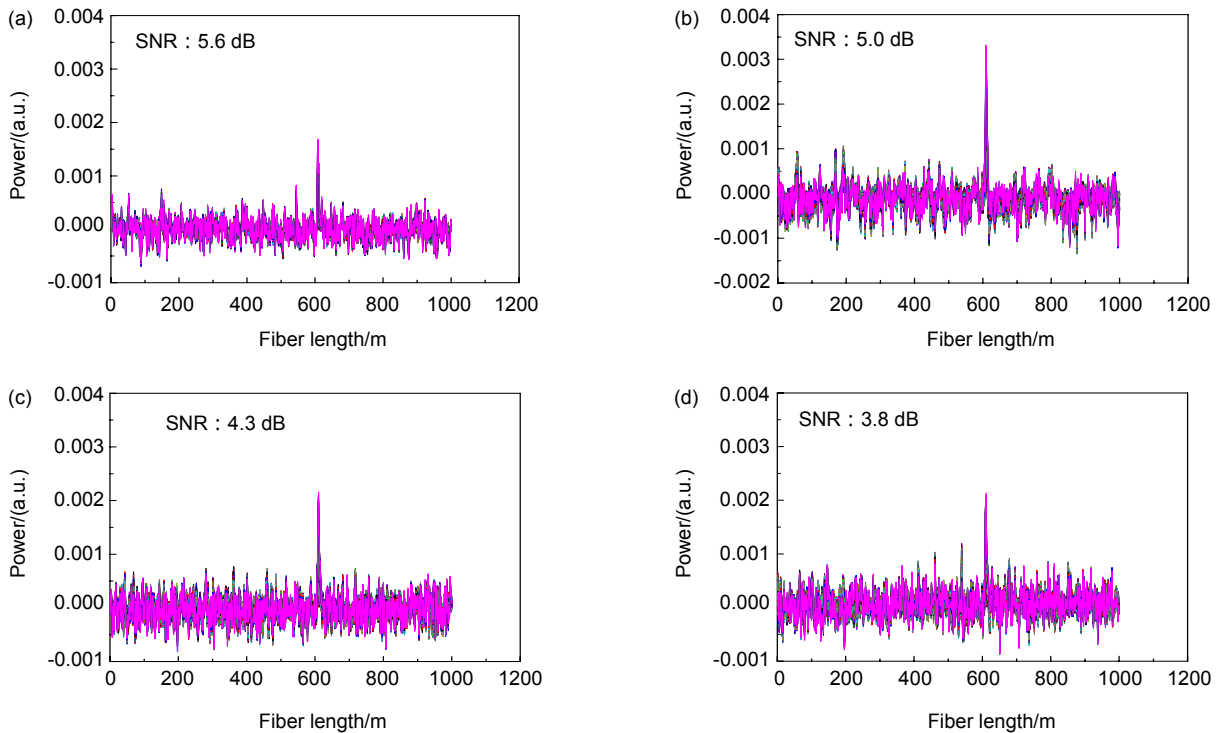


图 3 不同偏置电压下的定位信息。(a), (b), (c)和(d)是任意信号发生器的偏置电压分别为 50 mV, 100 mV, 150 mV 与 200 mV 时的实验结果<sup>[21]</sup>

Fig. 3 The location information. (a), (b), (c) and (d) were tested under 50 mV, 100 mV, 150 mV and 200 mV, respectively<sup>[21]</sup>



会降低 MZI 干涉信号的信噪比并缩短探测频响范围。在融合型传感系统的基础上，重庆大学朱涛教授团队利用时分复用(time division multiplexing, TDM)的技术，使连续光和脉冲光在时间上产生一定的延迟，在解调时避免了干涉信号与散射信号的干扰<sup>[22-23]</sup>。系统

图如图 5 所示。实验中探测光调制成脉宽为 50 ns 的窄脉冲光和 980 μs 的宽脉冲光，并以 16 μs 的延迟注入到 1150 m 的传感光纤中。探测频率提高至 6.3 MHz，同时信噪比达到了 5.6 dB，如图 6 所示。

基于脉冲调制和 TDM 技术的融合型传感系统，

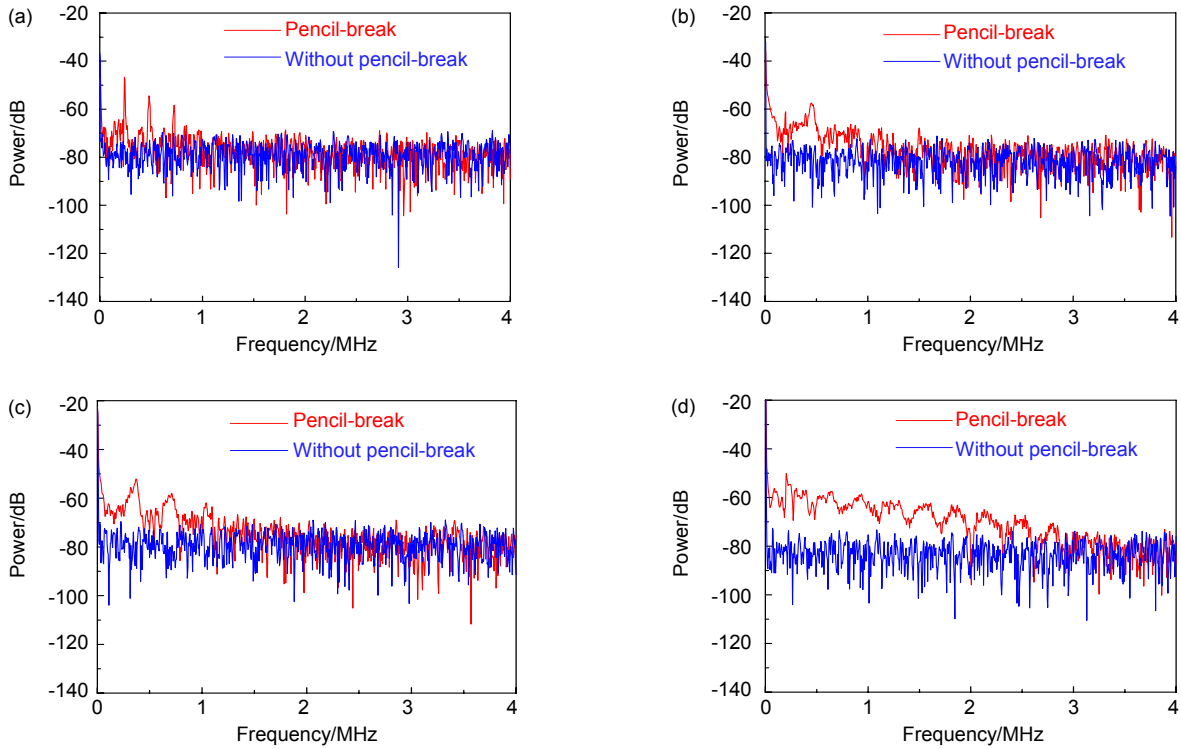


图 4 不同电压偏置量下磕铅笔振动的频率响应。(a), (b), (c)和(d)是任意信号发生器的偏置电压分别为 50 mV, 100 mV, 150 mV 与 200 mV 时的实验结果<sup>[21]</sup>

Fig. 4 The frequency response of pencil-break. (a), (b), (c) and (d) were tested under 50 mV, 100 mV, 150 mV and 200 mV, respectively<sup>[21]</sup>

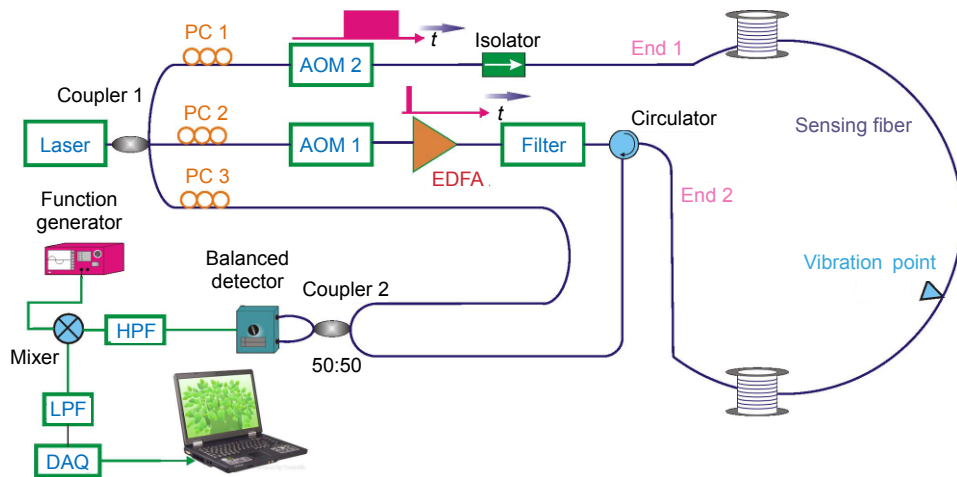


图 5 基于时分复用并融合 $\phi$ -OTDR 与 MZI 的分布式光纤传感实验系统图<sup>[23]</sup>

Fig. 5 The experimental setup of distributed optical fiber sensing system based on both  $\phi$ -OTDR and MZI with TDM technology<sup>[23]</sup>

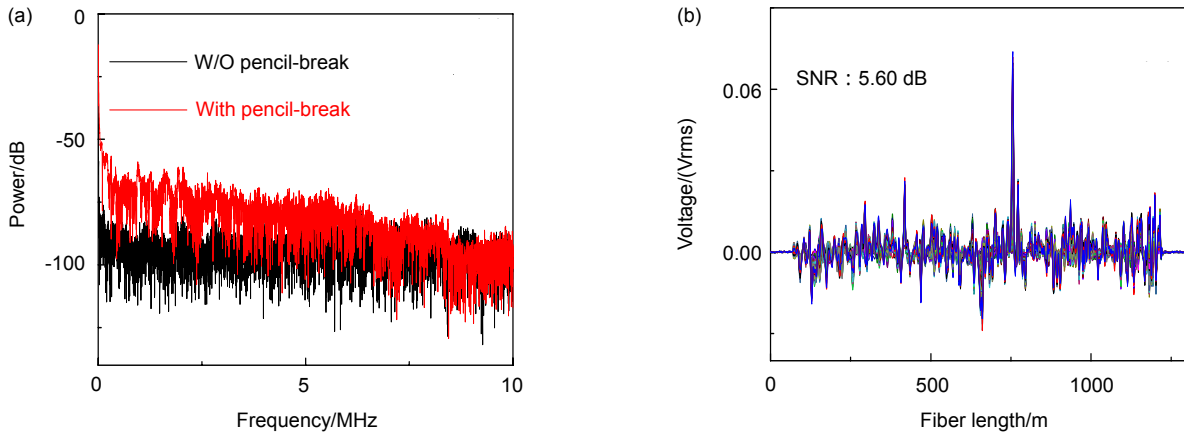


图 6 磕铅笔模拟高频振动。(a) 有磕铅笔振动信号及没有磕铅笔振动信号频响的叠加; (b) 磕铅笔振动的位置信号<sup>[23]</sup>

Fig. 6 The experimental results of detection of pencil-break. (a) Frequency response of with and without pencil-break; (b) Location of vibration<sup>[23]</sup>

虽然能够实现精确定位和宽频率响应的分布式振动测量,但同时引入了MZI,增加了系统复杂性。而传统 $\phi$ -OTDR系统的探测频率仍然受到传感距离的限制。重庆大学朱涛教授团队采用基于频分复用(frequency division multiplexing, FDM)技术的 $\phi$ -OTDR系统<sup>[22-24]</sup>,将探测脉冲重复频率设置为30 kHz,在沿着3024 m的传感光纤上实现了25 kHz振动频率的测量。实验原理是将探测光调制成 $N$ 个光频率的光脉冲(如图7(a)所示),在解调端将这 $N$ 个频率的脉冲光产生的后向瑞利散射光(如图7(b)所示),分别进行移动平均和差分处理。由于一个采样周期内得到的后向瑞利散射曲

线的数量是传统 $\phi$ -OTDR系统的 $N$ 倍,因此在相同测量时间内基于频分复用技术的 $\phi$ -OTDR系统能与传统 $\phi$ -OTDR系统平均次数相同的情况下实现更高可探测频率响应。

基于频分复用技术的 $\phi$ -OTDR实验系统如图8所示,探测光被调制成两个脉冲光,其中一个脉冲光的脉宽为100 ns并产生200 MHz的频移;另一脉冲光的脉宽为100 ns以及频移为100 MHz。实验采用3024 m长的传感光纤,则探测光脉冲的最高重复频率为33 kHz。为了验证系统能突破传感光纤长度对系统最高频率响应的限制,驱动AOM的任意波形发生器

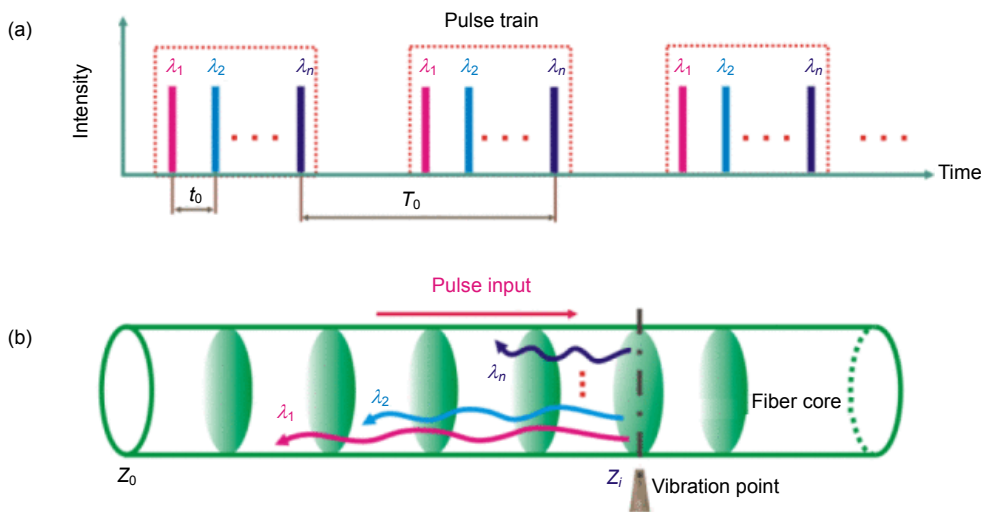


图 7 (a) 注入传感光纤中的 $N$ 个不同波长光脉冲组成的脉冲序列; (b) 一个测量周期内, $N$ 个不同波长的光脉冲在传感光纤内产生的后向瑞利散射<sup>[24]</sup>

Fig. 7 (a) Injected pulse train; (b) The discrete model of  $N$  backscattering traces within one measurement interval after  $N$  pulses carried by different wavelengths are injected into sensing fiber<sup>[24]</sup>

(arbitrary waveform generator, AWG)的重复频率设置为 30 kHz。由奈奎斯特定理可知,探测脉冲的重复频率即采样频率为 30 kHz 时,系统可探测最高振动频率为 15 kHz,并且数据处理会更加缩短系统可探测频率范围。压电陶瓷的振动频率设置为 25 kHz,振动测试实验结果如图 9 所示。实验结果表明,采用两个不同光频的光脉冲作为探测光能够实现高至两倍的探测频率,因此能突破传感光纤长度对振动频率响应的限制。

此外,2016 年西南交通大学闫连山教授团队<sup>[25]</sup>将前面介绍的系统有效地结合在一起,即融合  $\phi$ -OTDR 与 MZI 分布式系统的同时利用了 FDM 技术。在 3 km 的传感光纤上实现了 10 m 的空间分辨率,并在保证信号信噪比的前提下,其可探测的振动频率提高至 40 kHz。2017 年上海交通大学何祖源教授团队<sup>[26]</sup>利用 FDM 技术将探测光调制成 4 个频率的脉冲光,在 10 km 的传感光纤上利用直接探测实现了 40 kHz 的频率响应,其中直接探测有效降低了对光电探测器带

宽以及采集卡采样率的要求。

基于  $\phi$ -OTDR 与 MZI 融合的分布式传感系统利用探测脉冲时分复用技术,以及  $\phi$ -OTDR 系统利用频分复用技术,都能提高振动测量的频响范围。在保证定位信噪比的前提下,突破了传统  $\phi$ -OTDR 系统的频率响应因平均次数以及传感距离的限制。

### 3.2 基于布里渊散射的分布式光纤动态测量系统技术研究

前面介绍了分布式光纤传感系统在宽频振动上的技术研究。然而在大型结构的健康监测中往往还有低频振动以及大应变所致的振动存在,对于  $\phi$ -OTDR 系统很难实现低频振动以及大应变的动态测量。BOTDA 系统利用布里渊频移能实现温度或应变的测量。但传统的 BOTDA 中,响应时间会受到泵浦脉冲的渡越时间、平均次数、微波源的频率转换速度等因素的限制,使得 BOTDA 仅适用于温度、应变等静态参数的测量。

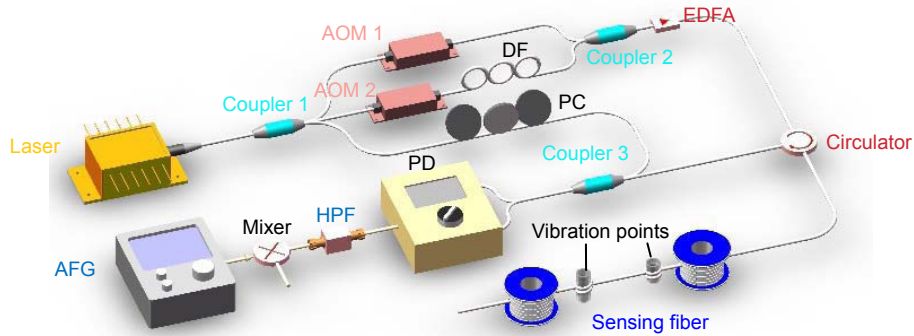


图 8 基于频率复用技术的  $\phi$ -OTDR 系统实验图<sup>[24]</sup>  
Fig. 8 The  $\phi$ -OTDR system based on FDM technology<sup>[24]</sup>

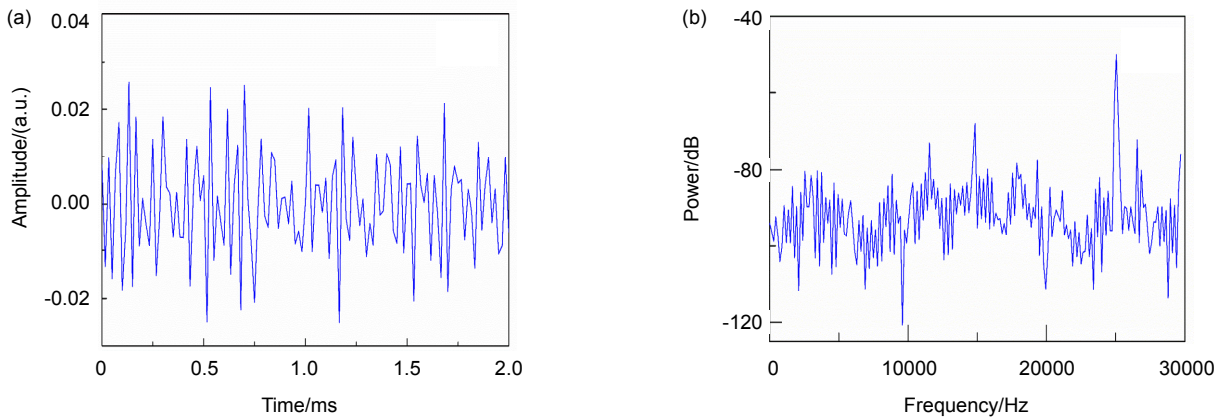


图 9 压电陶瓷振动频率为 25 kHz 的实验结果。(a) 未经过平均处理的曲线组中取出的振动位置处时域信号; (b) 频率响应频谱图<sup>[24]</sup>

Fig. 9 The experimental result of PZT with 25 kHz vibration frequency. (a) Time-domain vibration signal; (b) Spectrum of frequency response<sup>[24]</sup>

为了提高 BOTDA 的动态响应能力, 2009 年 Bernini 等人<sup>[27]</sup> 提出了基于 BOTDA 的斜率辅助技术 (slope-assisted BOTDA, SA-BOTDA), 其原理如图 10 所示。

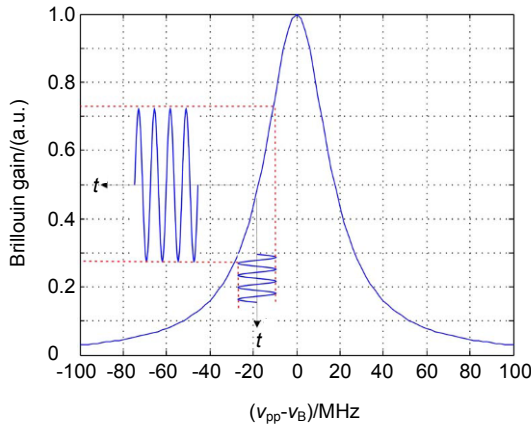


图 10 斜率辅助技术的原理图<sup>[27]</sup>

Fig. 10 The principle waveform of the slope assisted technique<sup>[27]</sup>

与传统的 BOTDA 探测光的频率需要在光纤布里渊频移附近扫描不同, SA-BOTDA 将探测光频率固定在布里渊增益谱的半高处, 避免了 BOTDA 中耗时的频率扫描过程, 大大提高了 BOTDA 的动态响应能力。当光纤受到外界应力扰动时, 布里渊频移的变化就会转换成探测光光强的变化。通过对探测光光强的记录就可以获取到加载在光纤上的应变信息。

SA-BOTDA 传感系统实验图如图 11 所示, 泵浦光被强度调制器(intensity modulator, IM)调制成重复频率为 50 kHz 的脉冲。探测光在传感光纤中与泵浦光发生受激布里渊散射作用后, 由光电探测器(photoelectric detector, PD)探测后进行数据处理。30 m 传感光纤的前 3 m 一端固定, 另一端通过一个连接杆

与直流电机连接, 提供周期性的应变。采集到的动态应变信息如图 12 所示, 12.3 Hz 的振动信号可以清晰识别。

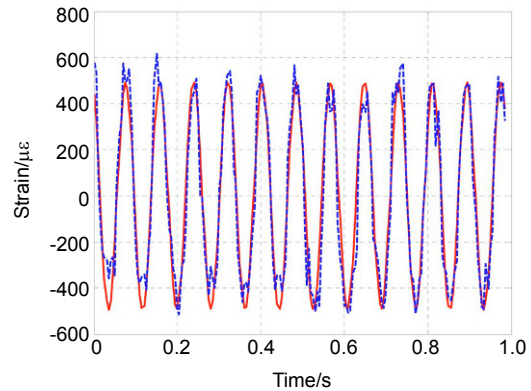


图 12 12.3 Hz 的振动信号测试图<sup>[27]</sup>

Fig. 12 The test diagram of 12.3 Hz vibration signal<sup>[27]</sup>

SA-BOTDA 可以对几百赫兹到千赫兹的振动信号探测, 但是由于布里渊增益谱带宽较小且 SA-BOTDA 只能利用布里渊增益谱带宽的一半, 使得 SA-BOTDA 的动态范围只有 600  $\mu\epsilon$  左右。为了不牺牲 BOTDA 动态范围的同时提高 BOTDA 的动态响应能力, Yair 等人<sup>[28]</sup> 提出了 Fast BOTDA 技术。Fast BOTDA 中采用高性能的任意波形发生器对探测光的频率进行调制, 将不同频率的探测光拼接在一起, 减少了使用微波源调制时的频率跳变时间。实验系统如图 13 所示。DFB 激光器的输出由 3 dB 耦合器分成探测光和泵浦光两路, 泵浦光由电光调制器 EOM2(electro-optic modulator)调制成脉宽为 13 ns 的脉冲光, 经过掺饵光纤放大器 EDFA2(erbium-doped fiber amplifier)放大后由环形器进入传感光纤。AWG 产生的频率拼接信号通过具有 IQ 调制功能的矢量微波源移到 11 GHz 左右用于调制探测光。探测光经过调制后由 EDFA1 放大, 并经过扰偏器、隔离器、衰减器后输入到传感光纤。与

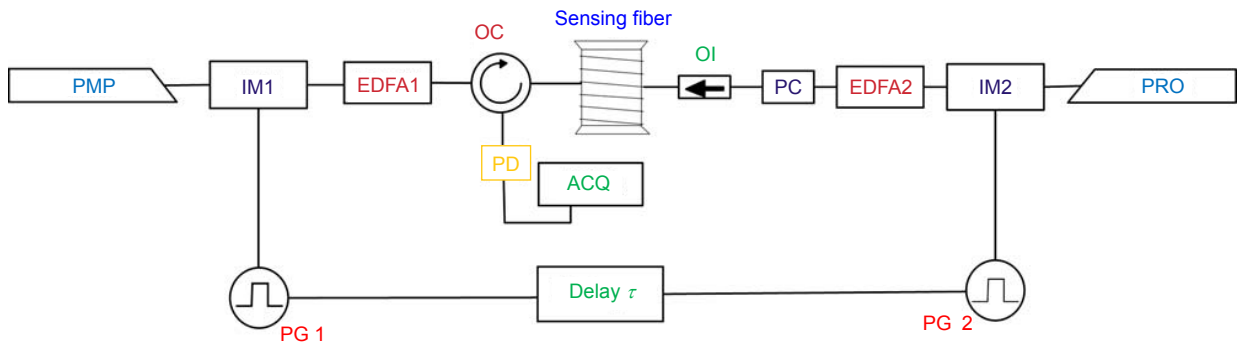


图 11 SA-BOTDA 传感系统实验图<sup>[27]</sup>

Fig. 11 The experimental diagram of SA-BOTDA<sup>[27]</sup>



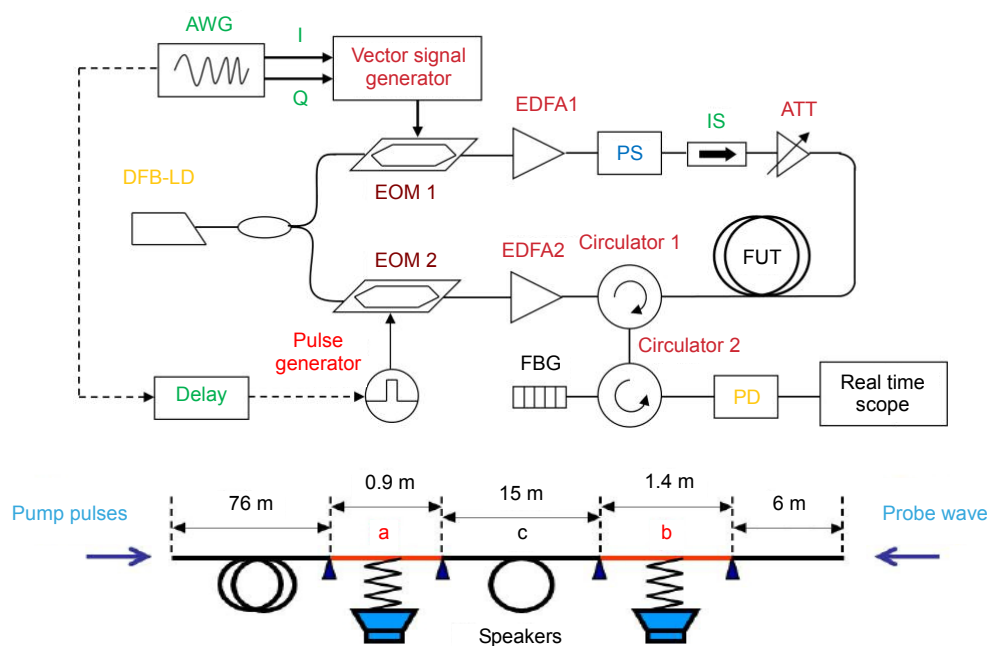


图 13 Fast BOTDA 传感系统实验图<sup>[28]</sup>

Fig. 13 The experimental diagram of fast BOTDA<sup>[28]</sup>

泵浦光发生作用后的探测光由光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)滤去下边带后由 PD 探测。

传感光纤由 5 部分组成, 其中 a、b 两部分安装在手动位移台上提供静态应变, 两个贴近光纤的扬声器提供动态应变。测得的布里渊增益谱如图 14(a)所示。可以清晰地看到 80 Hz 和 100 Hz 的振动信息为洛伦兹拟合后得到的振动信号, 如图 14(b)所示。

尽管 Fast BOTDA 的动态响应能力可以达到千赫兹级别, 但是其传感距离只有 100 m 左右, 限制了其在实际场合中的应用。为了使 BOTDA 能够进行长距离的测量又具有动态响应能力, 2017 年 Jin 等人<sup>[29]</sup>提出了基于光学频率梳的 sweep-free BOTDA (SF-BOTDA), 只需要测量一次就可以得到应变信息。与传统的 BOTDA 中探测光为单频信号不同, SF-BOTDA 中的探测光为非常精细的数字光学频率梳。探测光与泵浦光在传感光纤中发生作用后, 通过解调每个子载波的幅值及相位就可以得到增益谱和布里渊相移谱进行重构, 进而获得应变信息。同时利用相干探测可以有效提高 BOTDA 的信噪比, SF-BOTDA 的传感速度只与光纤长度有关。SF-BOTDA 的实验系统图如图 15 所示。

100 kHz 线宽的可调谐激光器作为系统的光源被 3 dB 耦合器分成泵浦光和探测光两路。其中泵浦光由马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)

调制产生两个频移为 11 GHz 左右的边带, 下边带被窄带滤波器滤掉, 保留上边带作为泵浦光, 然后再经过 IM 调制成脉冲。泵浦脉冲通过一个偏振分束器分成两个正交的偏振态, 并用偏振控制器(polarization controller, PC)进行调节使两个偏振态的泵浦光功率保持一致。经过一段延时光纤后, 两个不同偏振态的泵浦光先后由 EDFA 放大, 再输入传感光纤。探测光由一个 50 : 50 的耦合器分成探测光和本振光两部分。IQ 调制器将探测光调制成带宽为 1 GHz, 间隔为 1.95 MHz 频率梳。探测光经过环形器 3 端口输出后与本振光进行拍频并由光电探测器进行探测。

为了进行动态测试, 1 kHz 正弦波驱动的压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer, PZT)作为振动信号加载在 51.2 m 的传感光纤上, 如图 16(a)所示, SF-BOTDA 测试得到的振动信号如图 16(b)所示。

上述主要介绍了基于 BOTDA 分布式光纤动态测量的研究进展。首先通过利用 SA-BOTDA 技术降低扫频时间, 从而提高 BOTDA 系统的动态响应能力; 接着 Fast BOTDA 技术在不牺牲动态测量范围的同时提高响应速度; 最后 SF-BOTDA 技术使得 BOTDA 系统具有动态响应能力又能实现长距离测量。

### 3.3 基于多散射的分布式光纤传感系统技术研究

前面主要介绍了基于单一散射机制的分布式传感

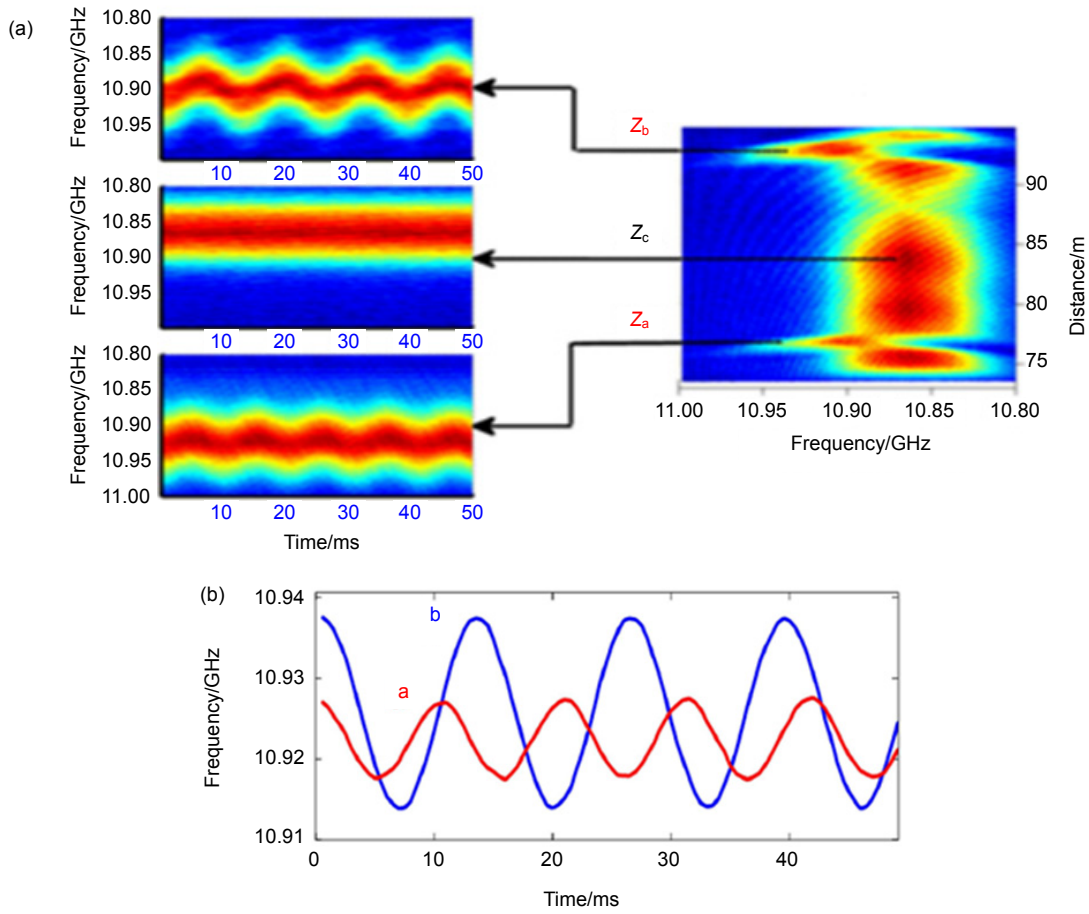


图 14 振动信号测试图。(a) 布里渊增益谱；(b) 洛伦兹拟合得到的拟合结果<sup>[28]</sup>  
 Fig. 14 The test diagram of vibration signal. (a) Brillouin gain spectrum; (b) Fitting result of Lorentzian nonlinear fitting<sup>[28]</sup>

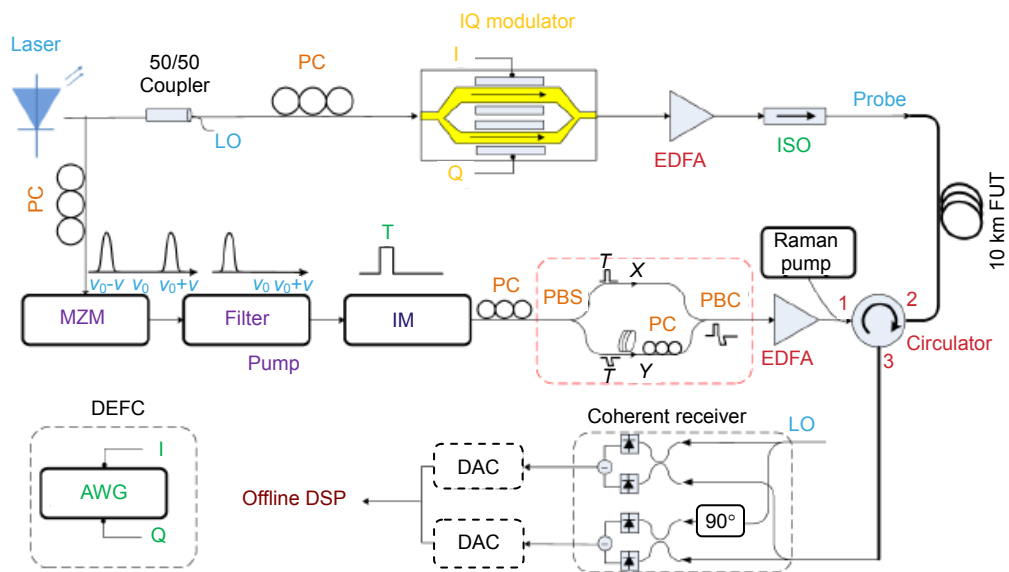


图 15 SF-BOTDA 传感系统实验图<sup>[29]</sup>  
 Fig. 15 The experimental diagram of SF-BOTDA<sup>[29]</sup>

系统分别实现宽频振动和应变动态测量，有效解决了长距离高频事件定位难以及动态响应慢的问题。

而在实际应用中，对于故障诊断以及健康监测，往往需要对振动、应变以及温度等多个参数同时监测。2016年，南京大学张旭萃教授课题组<sup>[30]</sup>在BOTDA的基础上，利用扫频布里渊增益谱和斜率辅助分别实现对温度和应变所致的振动测量，但很难实现应变大小以及高频振动的测量。因此仅基于单一散射原理的分布式传感目前还很难实现多参数的同时有效测量，特别是振动与其他静态量如应变、温度的同时监测。

2015年，重庆大学朱涛教授课题组<sup>[31]</sup>融合瑞利和拉曼散射实现了振动和温度的同时测量。其实验原理如图17(a)所示，窄线宽连续光通过AOM调制成重复频率为25 kHz、脉宽均为50 ns的高低功率脉冲序列，经过EDFA放大以及FBG滤掉自发辐射噪声后注入到传感光纤，如图17(b)所示，产生的瑞利散射光从波分复用模块的端口1传输进入环形器并由PD探测。瑞利散射信号通过移动差分实现了5 m空间分辨率以及最高频响为10 kHz的振动测量，如图18(a)~图18(d)。反斯托克斯拉曼散射光和斯托克斯拉曼散射光分别由

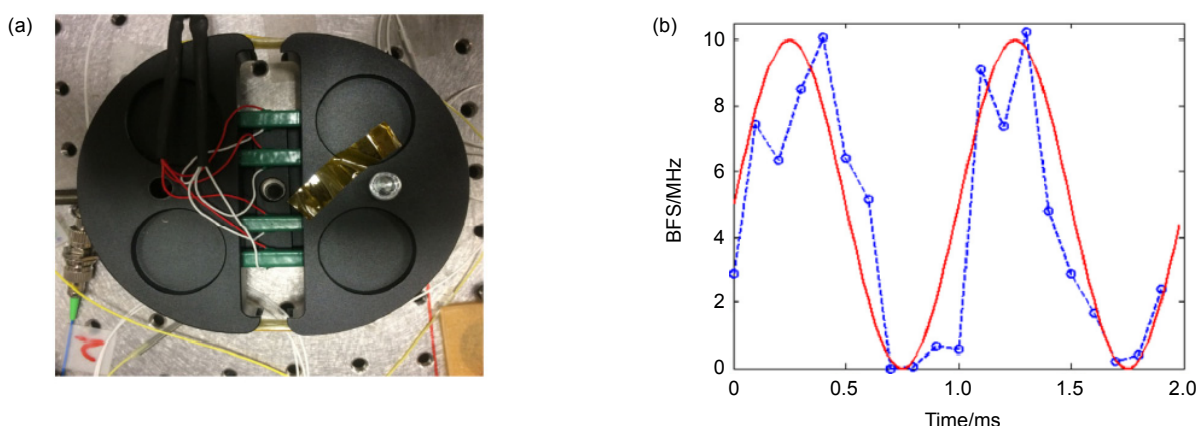


图 16 振动信号测试图<sup>[29]</sup>  
Fig. 16 The test diagram of vibration signal<sup>[29]</sup>

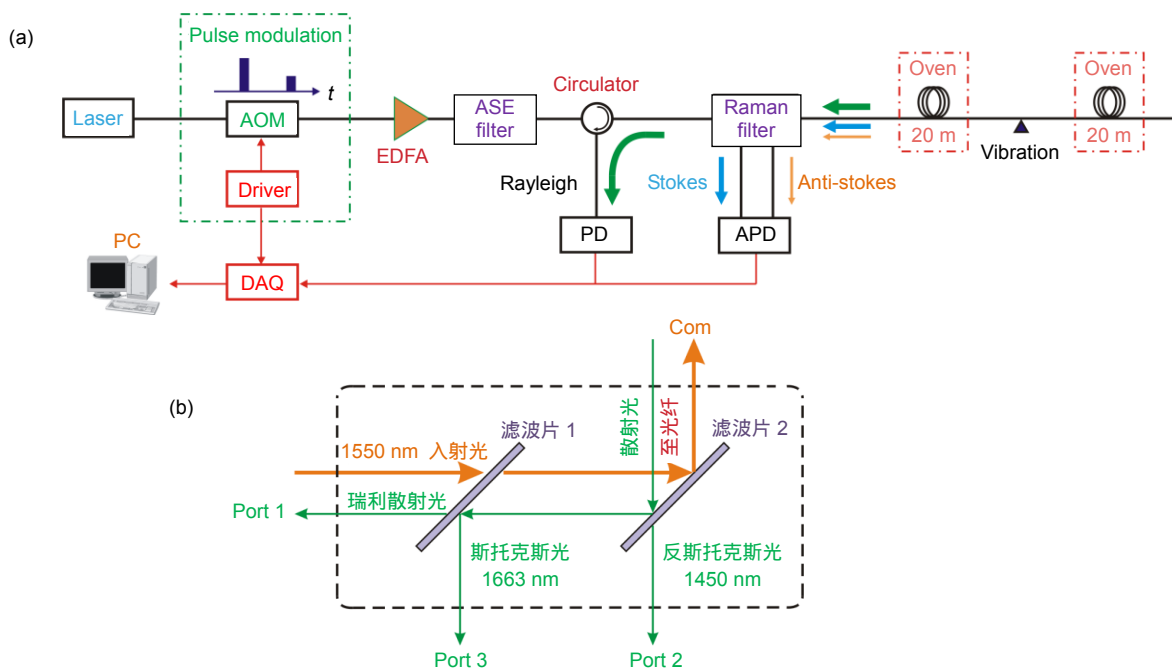


图 17 (a) 基于结合瑞利散射及拉曼散射的分布式光纤传感实验系统图；(b) 波分复用模块示意图<sup>[31]</sup>  
Fig. 17 (a) The experimental setup of distributed optical fiber sensing system based on both Rayleigh and Raman backscattering; (b) The schematic of wavelength division multiplexing device<sup>[31]</sup>

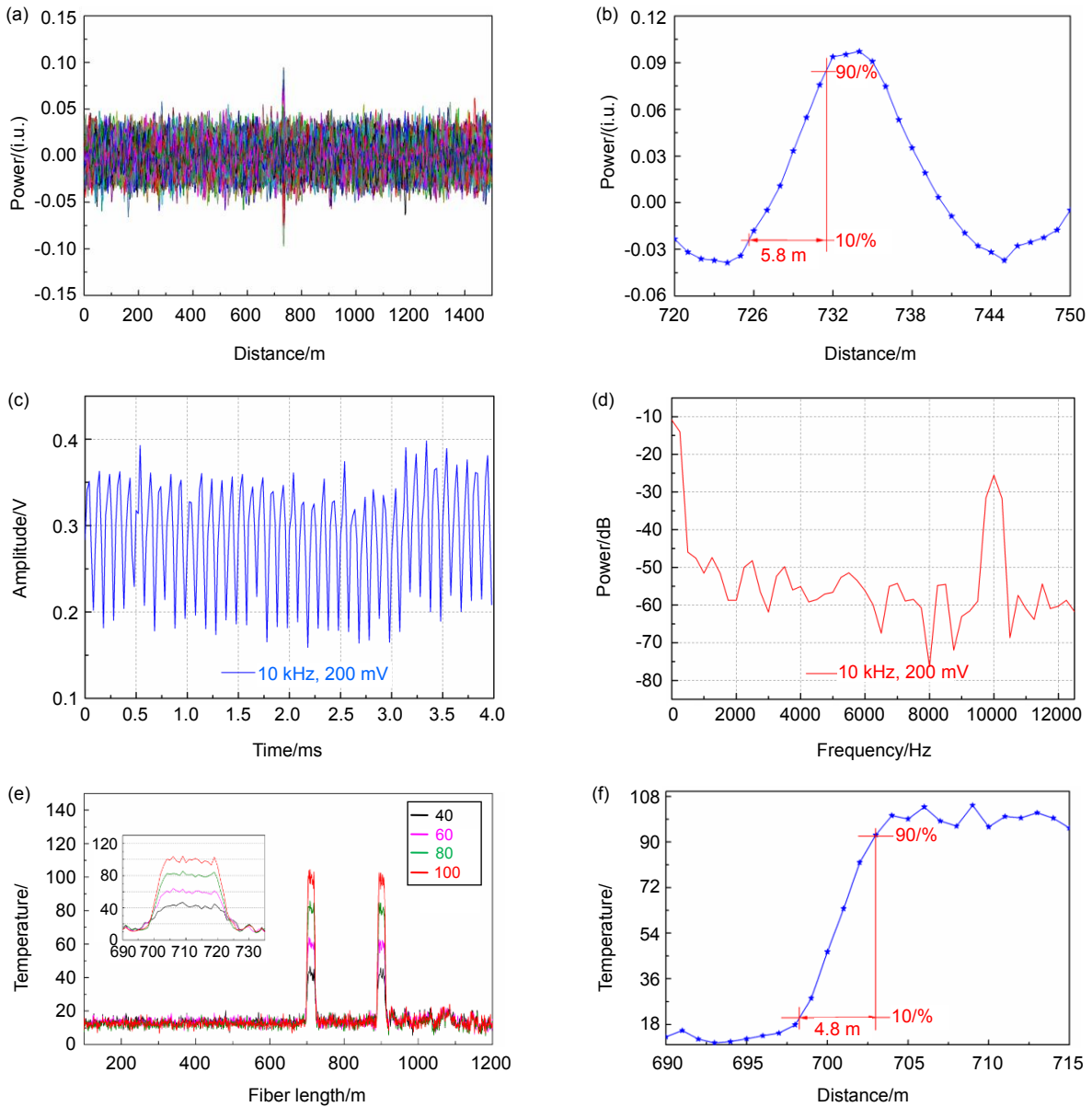


图 18 (a) 瑞利散射信号移动差分后的信号叠加图; (b) 振动空间分辨率; (c) 振动信号频率为 10 kHz 的时域图; (d) 振动信号频率为 10 kHz 的频域图; (e) 传感光纤的温度分布曲线; (f) 温度空间分辨率<sup>[31]</sup>

Fig. 18 (a) The superimposed moving differential signals of Rayleigh traces; (b) Vibration spatial resolution; (c) Time domain diagram of vibration signal of 10 kHz; (d) Frequency domain diagram of vibration signal of 10 kHz; (e) Temperature distribution curve along the sensing fiber; (f) The spatial resolution of temperature<sup>[31]</sup>

波分复用模块的端口 2 和端口 3 提取出来, 并由雪崩光电二极管探测。对反斯托克斯拉曼散射信号进行 20000 次累加平均处理, 如图 18(e)和图 18(f)所示, 数据处理实现了 20 °C~100 °C 范围的温度测量, 空间分辨率达到 4.8 m。

基于 ROTDR 的分布式传感系统只对温度敏感, 而基于  $\varphi$ -OTDR 的系统很难实现对低频振动和大应变

的测量, 因此融合这两种散射机制的系统只能实现对温度和振动同时监测。2016 年, 重庆大学朱涛教授团队<sup>[32]</sup>利用基于脉冲调制的  $\varphi$ -BOTDR 系统, 实现了振动、温度以及应变的同时测量。其实验原理如图 19(a) 所示, 往 10 km 的传感光纤中交替注入脉宽为 8 ns 和 30 ns 的高斯型光脉冲, BOTDR 和  $\varphi$ -OTDR 两种工作模式切换工作。其中在进行 BOTDR 测量时, 散射光



与频率相差三百兆左右布里渊激光进行拍频，并利用高斯加窗短时傅里叶变换法对拍频信号进行处理，可以最大限度地保留数据中时间域信息。如图 19(b)和图 19(c)所示，在 10 km 的传感光纤末端施加温度和应变时，系统都能准确响应，且空间分辨率达到 80 cm。

当对光纤末端施加 100 Hz 的振动信号时，如图 20(a)所示，振动点相应位置可见清晰的响应。当加载不同频率的振动信号时，振动点位置的频谱信息如图 20(b)所示。可见该系统可实现最高 4.8 kHz 的振动频率响应范围和 3 m 的空间分辨率。

此外针对大型结构健康监测中普遍存在的频率高、幅度小的振动事件和频率低、幅度大的应变事件，

单独依赖传统的 $\phi$ -OTDR 或 BOTDR 手段无法对两种事件进行同时探测。2016 年，电子科技大学饶云江教授团队<sup>[33]</sup>同样利用基于 $\phi$ -OTDR 与 BOTDR 的融合系统，并配合前向拉曼放大，能够实现动态振动和静态应变的同时探测。其在 49 km 的传感光纤上实现了 10 m 的空间分辨率以及 200  $\mu\epsilon$ ~700  $\mu\epsilon$  的应变范围，并能感应小球撞击造成的振动事件。

基于 BOTDR 或 BOTDA 的分布式传感技术只能实现温度和应变等静态参数的测量， $\phi$ -OTDR 与拉曼散射或布里渊散射融合的分布式传感系统能够实现振动、应变和温度等参数的同时监测，并对事件的定位以及信息完整捕获具有重要的作用。

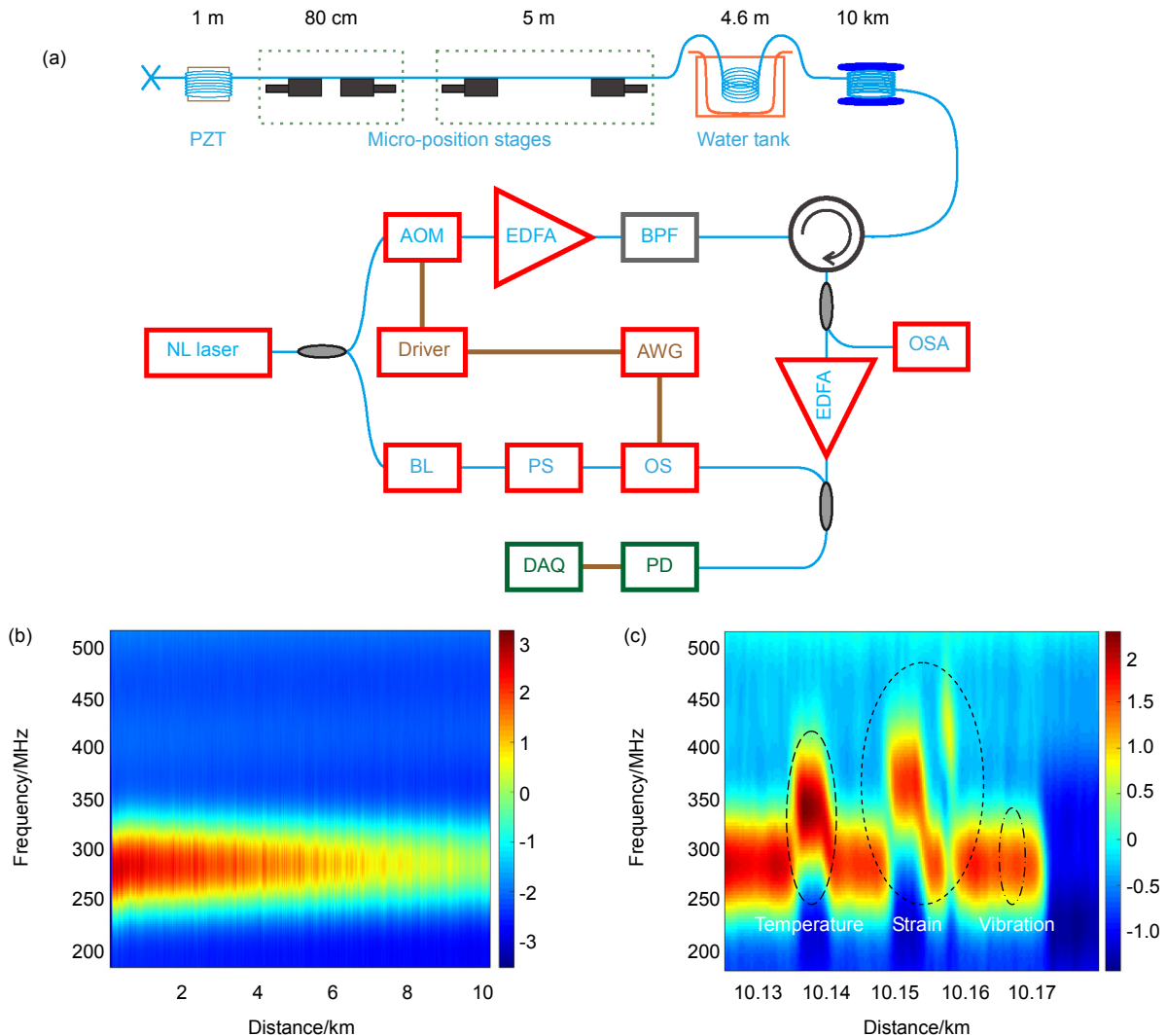


图 19 (a)  $\phi$ -BOTDR 复合系统原理图; (b) 10 km 传感光纤的布里渊频移图谱; (c) 在传感光纤末端同时施加温度、应变以及振动后的布里渊频移谱<sup>[32]</sup>

Fig. 19 (a) The system diagram of  $\phi$ -BOTDR; (b) Brillouin frequency shift of 10 km sensing fiber; (c) Brillouin frequency shift of end section of the sensing fiber when applied temperature shift, strain and vibration simultaneously<sup>[32]</sup>

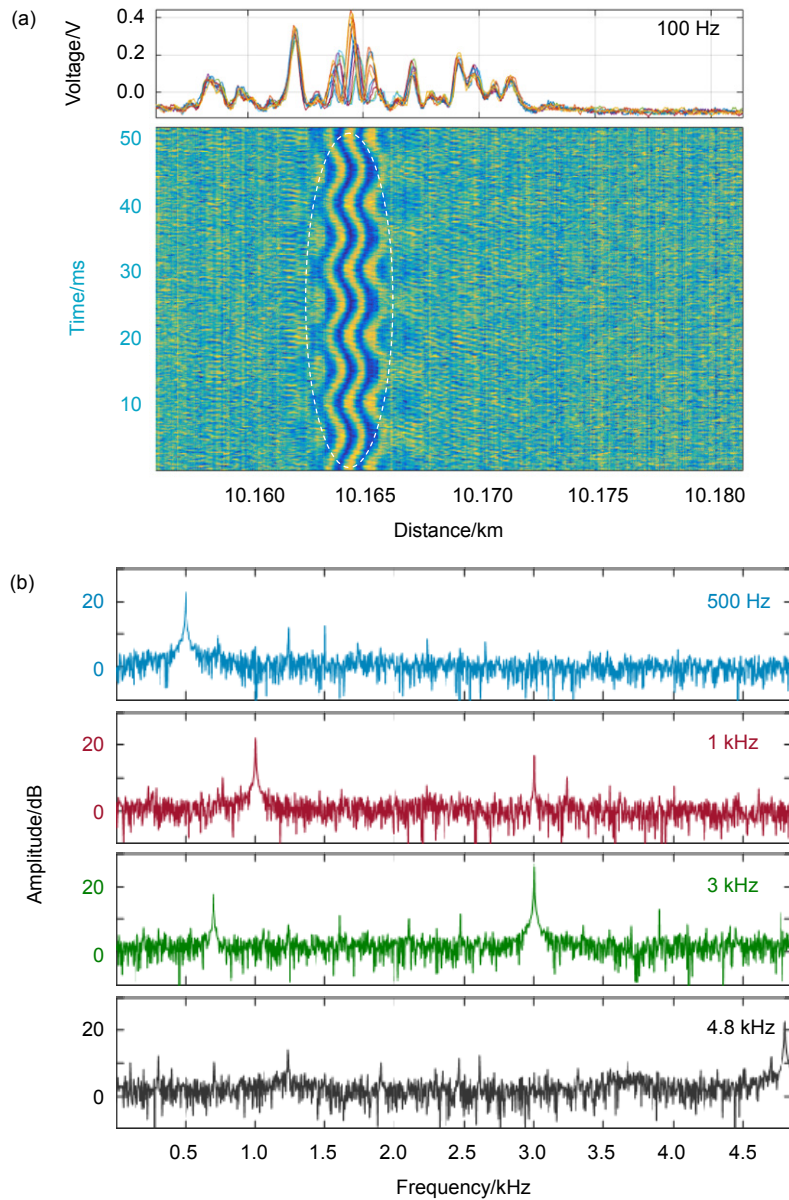


图 20 (a) 当加载 100 Hz 振动信号时光纤末端 $\phi$ -OTDR 散射信号; (b) 加载 500 Hz, 1 kHz, 3 kHz 和 4.8 kHz 的振动时, 振动点信号的快速傅里叶变换频谱<sup>[32]</sup>

Fig. 20 (a)  $\phi$ -OTDR traces at the end section of the sensing fiber when the PZT is driven by 100 Hz; (b) FFT transform spectra of the vibration point when 500 Hz, 1 kHz, 3 kHz and 4.8 kHz sinusoidal signals are applied to the PZT, respectively<sup>[32]</sup>

#### 4 总结与展望

本文首先理论上分析了宽频振动测量以及应变动态测量的限制因素;接着总结了 $\phi$ -OTDR 系统实现宽频振动的关键技术,利用脉冲调制、时分复用技术的融合系统和频分复用技术突破了传感光纤长度和平均次数所致的频响限制;以及总结了 BOTDA 系统利用斜率辅助以及频率梳的方式实现动态快速测量;最后

介绍了基于多散射机制的多参数测量方法。

日益增长的实际工程应用促进着分布式传感的不断发展,振动的探测频响范围增加、应变的动态响应提升以及前两者在多参数测量中的不断优化,更加有效准确地实现事件或故障的定位和识别,将推动分布式光纤传感技术在周界安防、输电网及长距离石油管道监测和大型建筑健康监测等诸多领域的应用。

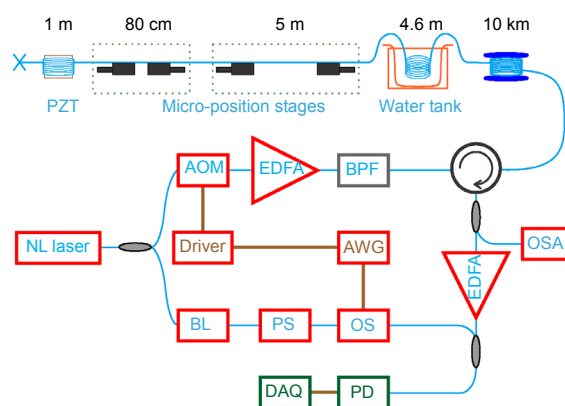
## 参考文献

- [1] Zhang X P. *Distributed Fiber Sensing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1–3.  
张旭革. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1–3.
- [2] Kizlik B. Fibre optic distributed sensor in Mach-Zehnder interferometer configuration[C]//*Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, 2002.
- [3] Sun Q Z, Liu D M, Wang J, et al. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(6): 1538–1544.
- [4] Zhu T, Xiao X H, 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.
- [5] Dong Y K, Xu P B, Fu C, et al. 1200°C high-temperature distributed Brillouin optical fiber sensing based on photonics crystal fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9634**: 963485.
- [6] Kim Y H, Song K Y. Tailored pump compensation for Brillouin optical time-domain analysis with distributed Brillouin amplification[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(13): 14098–14105.
- [7] Bolognini G, Hartog A. Raman-based fibre sensors: trends and applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 678–688.
- [8] Zhu C H, Zhao Y, Wang J P, et al. Ensemble recognition of fiber intrusion behavior based on blending features[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(12): 6–12.  
朱程辉, 赵益, 王建平, 等. 光纤入侵行为融合特征的集成识别[J]. 光电工程, 2016, **43**(12): 6–12.
- [9] Rao Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(7): 139–157.  
饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, **66**(7): 139–157.
- [10] Ye X W, Su Y H, Han J P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, **2014**: 652329.
- [11] Khalid M, David K P. A review of hybrid fiber-optic distributed simultaneous vibration and temperature sensing technology and its geophysical applications[J]. *Sensors*, 2017, **17**(11): 2511–2535.
- [12] Inaudi D, Glisic B. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2010, **132**(1): 763–772.
- [13] Tejedor J, Martins H F, Piote D, et al. Toward prevention of pipeline integrity threats using a smart fiber-optic surveillance system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(19): 4445–4453.
- [14] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(20): 2055–2057.
- [15] 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.
- [16] Maraval D, Gabet R, Jaouen Y, et al. Dynamic optical fiber sensing with Brillouin optical time domain reflectometry: Application to pipeline vibration monitoring[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(16): 3296–3302.
- [17] Chen F C, Dai J, Yu C Q, et al. Distributed Raman fiber sensing system with fiber-ring calibration and double-ended probe[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(8): 33–38.
- [18] 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.
- [19] Bergman A, Yaron L, Langer T, et al. Dynamic and distributed slope-assisted fiber strain sensing based on optical time-domain analysis of Brillouin dynamic gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(12): 2611–2616.
- [20] Fang J, Xu P B, Dong Y K, et al. Single-shot distributed Brillouin optical time domain analyzer[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(13): 15188–15198.
- [21] Zhu T, He Q, Xiao X H, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 2953–2963.
- [22] He Q. Study on the fiber optical distributed wide-frequency vibration sensing based on  $\phi$ -OTDR[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.  
何茜. 基于  $\phi$ -OTDR 的光纤分布式宽频振动传感技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [23] He Q, Zhu T, Xiao X H, et al. All fiber distributed vibration sensing using modulated time-difference pulses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(20): 1955–1957.
- [24] He Q, Zhu T, Zhou J, et al. Frequency response enhancement by periodical nonuniform sampling in distributed sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(20): 2158–2161.
- [25] He H J, Shao L Y, Li Z L, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response based on frequency division multiplexing[C]//*Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2016.
- [26] Yang G Y, Fan X Y, Liu Q W, et al. Increasing the frequency response of direct-detection phase-sensitive OTDR by using frequency division multiplexing[C]//*Proceedings of 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference*, 2017: 103238F.
- [27] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2613–2615.
- [28] Peled Y, Motil A, Yaron L, et al. Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 19845–19854.
- [29] Jin C, Guo N, Feng Y H, et al. Scanning-free BOTDA based on ultra-fine digital optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4): 5277–5284.
- [30] Hu J H, Xia L, Yang L, et al. Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(12): 13610–13620.
- [31] Zhou J. Research on the key techniques of multiple parameters of the distributed optical sensing system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.  
周进. 多参数分布式光纤传感系统关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [32] Zhang J D, Zhu T, Zhou H, et al. High spatial resolution distributed fiber system for multi-parameter sensing based on modulated pulses[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(24): 27482–27493.
- [33] Peng F, Cao X L. A hybrid  $\phi$ /B-OTDR for simultaneous vibration and strain measurement[J]. *Photonic Sensors*, 2016, **6**(2): 121–126.

# Advances of key technologies on distributed fiber system for multi-parameter sensing

Kuang Yang<sup>1</sup>, Wu Haoting<sup>1</sup>, Zhang Jingdong<sup>1</sup>, Zhou Huan<sup>1</sup>, Zheng Hua<sup>1</sup>,  
Huang Ligang<sup>1</sup>, Bai Yongzhong<sup>2</sup>, Qu Dingrong<sup>2</sup>, Qiu Feng<sup>2</sup>, Zhu Tao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems (Education Ministry of China), Chongqing University, Chongqing 400044, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266000, China



The system diagram of  $\phi$ -BOTDR

**Overview:** Distributed fiber sensing system can realize long-distance and continuous measurement with a tremendous potential of applications to the fields such as perimeter security, pipeline monitoring and structural health diagnosis for large infrastructure, whose faults or intrusions constantly cause changes of multiple physical parameters, namely vibration, strain and temperature. In addition, the alert and location abilities are also determined by the frequency response range of vibration and the dynamic response ability of strain, which are critical to obtain full information of external events. According to recent research progress in distributed fiber sensing system, wide-frequency vibration measurement based on Rayleigh scattering, dynamic strain measurement based on Brillouin scattering and multi-parameter measurement based on multiple scattering mechanisms are proposed, respectively.

Distributed vibration sensing system based on the combination of Mach-Zehnder interferometer (MZI) and  $\phi$ -OTDR can realize wide frequency response range and high-precision location. In order to solve the trade-off between the highest frequency response range and signal to noise ratio of location signal, the time-division multiplexing technology based on the merits of MZI and  $\phi$ -OTDR is proposed. In addition, frequency-division multiplexing technology based on  $\phi$ -OTDR system can break through the limitation of sensing distance on frequency response range. However, it poses considerable difficulties in realizing the dynamic measurement of vibration-induced strain with large strain range in conventional  $\phi$ -OTDR system. Through fixing the frequency of probe light at the half height of Brillouin gain spectrum (BGS), slope-assisted technology based on Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system can avoid excessive time of sweeping frequency and improve the dynamic response ability. Compared with slope-assisted technology, the fast BOTDA technology is proposed to improve the dynamic response ability without shortening the dynamic range. Above all, the OTDR system based on Rayleigh scattering and spontaneous Raman scattering has been used to measure vibration and temperature along sensing fiber. Interestingly, the distributed fiber sensing system by integrating  $\phi$ -OTDR and Brillouin optical time domain reflectometry is proposed for simultaneous multi-parameter detection, including vibration, strain and temperature.

**Citation:** Kuang Y, Wu H T, Zhang J D, *et al.* Advances of key technologies on distributed fiber system for multi-parameter sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170678

Supported by the Key Research and Development Program of Ministry of Science and Technology (2016YFC0801202), the Project of Natural Science Foundation of China (61635004, 61377066, and 61705024), the Science Fund for Distinguished Young Scholars of Chongqing (CSTC2014JCYJJQ40002), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112017CDJZRPY0005)

\* E-mail: zhutao@cqu.edu.cn