

长距离分布式光纤传感技术研究进展

饶云江

Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing

Rao Yun-Jiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 074207 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锥柱型光纤探针在表面增强拉曼散射方面的应用

Application of cone-cylinder combined fiber probe to surface enhanced Raman scattering

物理学报.2017, 66(4): 044208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044208>

环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析

Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores

物理学报.2017, 66(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024210>

基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究

High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect

物理学报.2017, 66(1): 014206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014206>

基于偏振延时干涉技术的光子波形产生技术研究

Photonic microwave waveform generation based on polarization delay interference

物理学报.2016, 65(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224203>

少模光纤的弯曲损耗研究

Study on bending losses of few-mode optical fibers

物理学报.2016, 65(6): 064208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064208>

专题: 光纤传感

## 长距离分布式光纤传感技术研究进展\*

饶云江†

(电子科技大学, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2017年1月19日收到; 2017年3月10日收到修改稿)

分布式光纤传感技术是光纤传感领域的重要组成部分, 具有以下突出优势: 无需在光纤上制作传感器, 传感光纤集传感与传输于一体, 可实现远距离、大范围的传感与组网; 可连续感知光纤传输路径上每一点的温度、应变、振动等物理参量的空间分布和变化信息, 单根光纤上能获得多达数万点的传感信息. 由于在长距离连续传感方面具有不可替代的优势, 分布式光纤传感技术在周界安防、石油电力、大型结构等领域的安全监控方面具有非常广阔的应用前景. 本文主要介绍电子科技大学光纤传感与器件研究团队在长距离分布式光纤静(布里渊光时域分析仪)、动(相位敏感型光时域反射仪)态参量传感技术取得的研究进展, 包括基础与应用研究两个方面.

关键词: 光纤光学, 光纤传感器, 光纤激光器, 随机激光

PACS: 42.81.-i, 42.81.Pa, 42.55.Wd, 42.55.Zz

DOI: 10.7498/aps.66.074207

## 1 长距离布里渊光时域分析仪 (BOTDA) 研究进展

## 1.1 长距离BOTDA发展历程回顾

BOTDA最初由Horiguchi和Tateda<sup>[1]</sup>提出. BOTDA信噪比高、测量距离远、精度高, 已受到各国研究者的普遍重视及深入研究<sup>[2-4]</sup>.

BOTDA距离延伸与精度提高是相互制约的, 其原因不仅与光纤损耗导致的信噪比降低有关, 还与探测光对抽运脉冲消耗所致的非局域效应(non-local effect)有关<sup>[5]</sup>, 即: 抽运光脉冲沿光纤传播时, 峰值功率与本地布里渊频移相关, 导致光纤末端布里渊增益谱出现多峰结构, 即前端信息串扰至后端. 这一效应随传感距离增加会恶化. 因此, 长距离BOTDA应在提高信噪比、克服非局域效应找到突破口.

在提高BOTDA信噪比方面, 文献<sup>[6-12]</sup>提

出光脉冲编码技术改进信噪比, 并取得了可喜的进展. 该方案中, 首先在发射端对发送的抽运光脉冲进行编码(如Simplex码), 接收端则用快速Hadamard反变换解码. 与单一的累加平均相比, 在相同平均次数条件下, 可取得更高的信噪比. 早期研究集中于非归零码, 为避免其中连“1”码引起的布里渊增益谱形变, 2010年1月, Soto等<sup>[8]</sup>报道了采用归零编码, 在50 km传感光纤上取得1 m空间分辨率、2.2 °C精度的结果. 总之, 经过近几年发展, 光脉冲编码已成为一种高效的改进信噪比途径.

另一种改进BOTDA光信噪比的方案是分布式拉曼放大<sup>[13-18]</sup>. 2010年6月, 本课题组提出该方案, 实验获得了75 km传感距离、10 m空间分辨率、±0.6 °C测量精度<sup>[13]</sup>. 2011年4月, 电子科技大学研究小组<sup>[14]</sup>将127 bit光脉冲编码融入到基于一阶拉曼放大的BOTDA, 空间分辨率达到2.5 m, 同时传感距离达到74.6 km, 测量精度为±1 °C.

\* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 61290312)、国家自然科学基金重大仪器项目(批准号: 41527805)、教育部创新团队项目(批准号: IRT1218)和“111”学科创新引智基地计划(批准号: B14039)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

与此同时, Rodríguez-Barrios 等<sup>[15]</sup>采用一阶拉曼放大取得 75 km 传感、测量精度为 3 °C 的实验成果; Martin-Lopez 等<sup>[16]</sup>将此方法推广至二阶拉曼放大,并于 2010 年 8 月报道了 100 km 传感距离、2 m 空间分辨率的实验结果. 为抑制拉曼放大中抽运——信号相对强度噪声转移的问题,2011 年 2 月, Soto 等<sup>[17]</sup>报道了利用低噪声半导体激光器抽运延伸传感距离、提高空间分辨率的方法. 总之,分布式放大在大于 100 km BOTDA 距离延伸方面具有较大潜力.

在克服 BOTDA 非局域效应方面<sup>[19–21]</sup>, Bao 研究组<sup>[19]</sup>提出频分复用 (FDM) 方法. 该方案将多段具有不同布里渊频移的传感光纤串联起来,扫描整段光纤布里渊增益谱. 扫频时,仅当频移量与对应光纤布里渊增益谱峰值频率相等时,抽运才与探测光作用,以抑制非局域化. 实验获得了

1.5 °C 温度精度、2 m 空间分辨率的长距离传感. 另一种克服非局域化的途径是时分复用 (TDM) 方法<sup>[20,21]</sup>. 2011 年初, Dong 等<sup>[20]</sup>报道了该方案. 与传统 BOTDA 不同的是,抽运光与探测光均被调制,改变抽运与探测光之间的时延量,可对特定光纤段进行选取,而探测光脉宽决定了所选取光纤段长度. 总体而言, FDM 及 TDM 是两种较为有效的抑制非局域化的方案.

2012 年,电子科技大学研究团队在系统研究随机光纤激光 (random fiber laser, RFL) 特性的基础上,首次提出了基于随机光纤激光的分布式拉曼放大 (DRA) 新概念,随后将其成功应用于分布式光纤传感距离的提升,两次刷新了无中继 BOTDA 的传感距离世界记录 (分别为 142.2 km ( $\pm 1.5$  °C; 5 m), 154.4 km ( $\pm 1.4$  °C; 5 m)).

表 1 长距离 BOTDA 研究进展 (蓝色字体为项目组研究成果)  
Table 1. The research progress of long-distance BOTDA.

序号	期刊时间	作者	技术	实际距离/km	分辨率/m	精度
1	OL, 2010	Liang et al.	差分脉冲对 (DPP)	50	0.5	0.7 MHz/12 $\mu\epsilon$
2	OL, 2010	Soto et al.	光脉冲编码 (OPC)	50	1	2.2 °C/44 $\mu\epsilon$
3	JLT, 2010	Jia et al.	一阶 DRA	75	10	$\pm 0.6$ °C
4	JLT, 2010	Barrios et al.	一阶 DRA	75	2	
5	OE, 2010	Lopez et al.	二阶 DRA	100	2	
6	PTL, 2011	Jia et al.	一阶 DRA+OPC	74.6	2.5	$\pm 1$ °C
7	OE, 2011	Soto et al.	一阶 DRA	120	2	2.1 °C/45 $\mu\epsilon$
8	OL, 2011	Soto et al.	预放	120	3	3.1 °C/60 $\mu\epsilon$
9	OL, 2011	Dong et al.	TDM	100	2	$\pm 2$ MHz/ $\pm 2$ °C
10	JLT, 2012	Dong et al.	FDM+ 中继	150	2	1.5 °C/30 $\mu\epsilon$
11	OFS, 2012	Vinuesa et al.	二阶 DRA+OPC	120	5	1.9 °C/38 $\mu\epsilon$
12	PTL, 2012	Soto et al.	一阶 DRA+OPC	120	1	1.3 °C/26 $\mu\epsilon$
13	JLT, 2012	Vinuesa et al.	一阶 DRA	100	2	1.2 °C
14	OE, 2012	Vinuesa et al.	一阶 DRA+DPP	100	0.5	2.9 °C
15	OE, 2013	Hu et al.	相干检测	72	5	1.8 °C
16	MST, 2013	Taki et al.	一阶 DRA+DPP+OPC	93	0.5	1.7 °C/34 $\mu\epsilon$
17	OFS, 2012	Jia et al.	基于 RDFB-FL 抽运的 DRA+OPC	122	4	$\pm 1$ °C
18	OE, 2013	Jia et al.	基于环形随机激光抽运的 DRA+OPC	142.2	5	$\pm 1.5$ °C
19	OE, 2013	Jia et al.	混合 DRA+OPC	154.4	5	$\pm 1.4$ °C
20	ICOON, 2016	Qian et al.	混合 DRA+OPC+W-PCA+NLM	157.68	8	$\pm 0.65$ °C

2016年初, Soto等<sup>[22,23]</sup>报道了运用数字图像处理技术(非局域均值滤波)提升BOTDA的信噪比,在50 km传感光纤实验中实现了高达约14 dB的信噪比提升. 随后,本课题组将非局域均值滤波技术(non-local means, NLM)与分布式放大和脉冲编码技术进行结合,并提出了基于主成分分析的BOTDA噪声分析技术,提升了NLM方法的适应性和降噪性能,实现了157.68 km ( $\pm 0.65$  °C; 8 m)无中继BOTDA<sup>[24,25]</sup>. 表1列出了迄今为止长距离BOTDA的研究进展.

### 1.2 基于环形腔随机光纤激光放大的BOTDA

大部分情况下,基于超长光纤激光器(UL-FL)抽运的DRA为线形腔结构. 事实上,DRA也可通过环形腔实现. 基于环形腔UL-FL抽运的DRA最初由Stentz及Nielsen等提出. 他们在1.3  $\mu\text{m}$ 波段实现了 $8 \times 10$  Gbit/s信号的141 km无中继光传输<sup>[26]</sup>. 但针对其放大特性(包括开关增益、增益分布、有效噪声指数、非线性损伤)的研究尚未见报道. 本小节在阐述环形腔UL-RFL抽运的新DRA结构的基础上,研究其基本放大特性. 此外,将该方案应用于超长距离BOTDA分布式传感,实现了142.2 km无中继传感距离、5 m空间分辨率及 $\pm 1.5$  °C温度不确定度.

图1给出了环形腔UL-RFL抽运的二阶DRA基本结构及实验装置图,图中示出了前向抽运<sup>[27]</sup>.

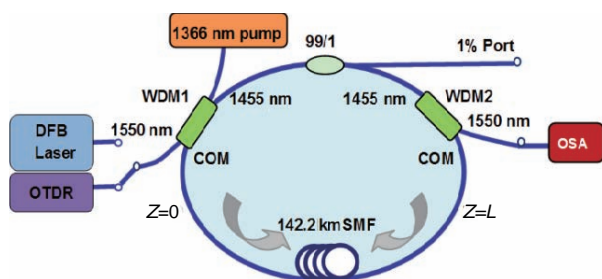


图1 基于环形UL-RFL的二阶DRA系统结构及实验装置

Fig. 1. System structure and experimental setup for forward pumping DRA using UL-RFL with ring cavity.

图2(a)给出了不同抽运功率条件下的RFL激光光谱. 由图可知,抽运功率较低(30.5 dBm)时,激光波长位于拉曼增益谱第一峰处(1454 nm). 随着抽运功率升高,1454 nm峰值逐步降低,这是由于短波长能量向长波长(1462 nm)转移的缘故. 此

外,实验观察到1464 nm激射峰有强烈展宽,这种展宽与大量激射模式的四波混频(FWM)作用有关. 特别地,系统设计中省去了窄带滤波器件(WDM的1455 nm端口带宽约为20 nm),从而抑制了非线性谱展宽对抽运效率的影响. 这一特点与基于线形腔的UL-FL光放大有显著区别. 对于线形腔而言,FBG典型带宽为 $< 0.5$  nm,受光谱展宽影响,位于FBG带宽的能量被透射,使得激射效率受到一定影响<sup>[28]</sup>.

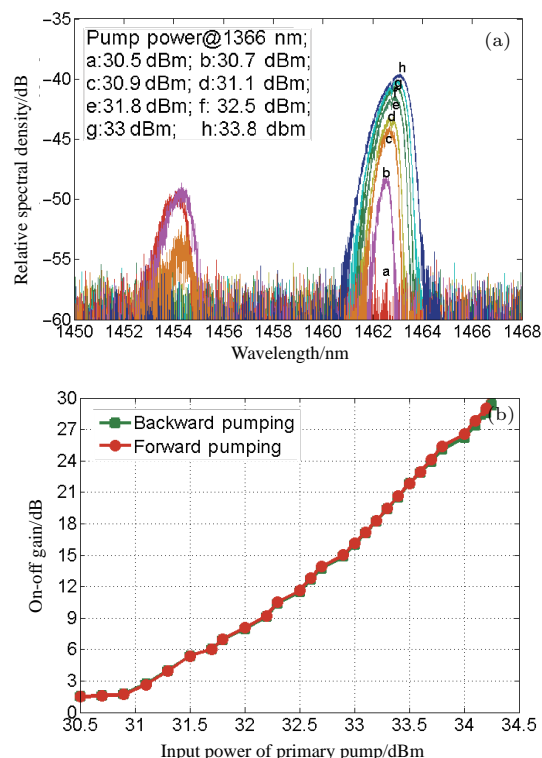


图2 不同抽运功率条件下的RFL激光光谱及开关增益 (a) 激光光谱; (b) 开关增益

Fig. 2. RFL lasing spectrum (a) and on-off gain (b) for different input pumping power.

图2(b)给出了不同抽运功率条件下的开关增益,测量过程中1550 nm输入信号功率为-5 dBm,调节1366 nm抽运功率以达到期望增益. 由图可知,超过激射阈值( $\sim 30.9$  dBm)后,开关增益随抽运功率的增长而增大. 注意到前向与背向抽运条件下,抽运功率一定时,激光光平均功率值相同,因而具有相同的开关增益. 另外,透明传输对应于 $\sim 29$  dB开关增益或 $\sim 34.2$  dBm抽运功率.

以BOTDA为例,探讨该方案在超长距离分布式传感中的应用,实验装置如图3所示. 传感光纤由三段组成,总长为142.2 km,每段具有略微不同的布里渊频移(BFS). 几段光纤的



布里渊频移差远小于布里渊增益谱(BGS)宽度 (~ 39—56 MHz), 以确保SBS最大化. 加热点位于光纤末端142.152 km处, 其温度变化量为40 °C.

将加热前后经洛伦兹拟合的峰值布里渊频移相减, 可得出整段传感光纤温度分布, 如图4(a)所示. 计算标准差分布可知, 最大测量不确定度约为 ±1.5 °C (位于信噪比(SNR)最低的 ~ 110—130 km), 0—94.5 km区间的增益较大, 对应的测量不确定度也较低. 图4(b)示出了约5 m

热点附近的温度分布. 实验得出的40 °C左右温度变化与实际温度符合较好. 分析半值全宽可知, 系统实际空间分辨率约为5 m.

该方案通过合理的系统设置, 使得抽运探测相对强度噪声(RIN)转移得到有效降低; 另一方面, 相对于常规一阶DRA, 受二阶抽运作用, 增益峰值深入至 >40 km处, 显著拓展了系统末端高信噪比的范围.

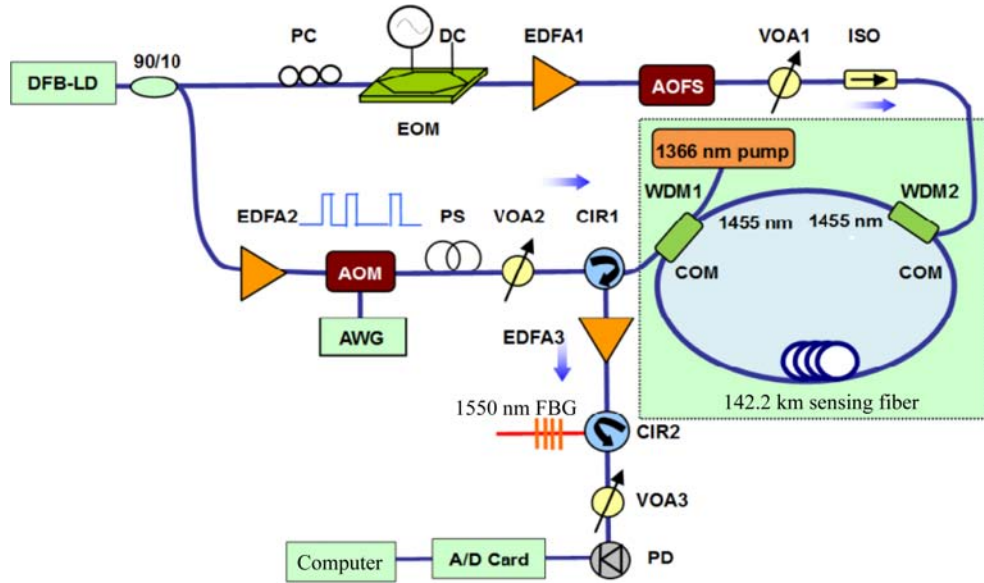


图3 基于环形腔 UL-RFL 抽运的 142.2 km BOTDA 实验装置

Fig. 3. Experimental arrangement of BOTDA using UL-FL based DRA with ring cavity.

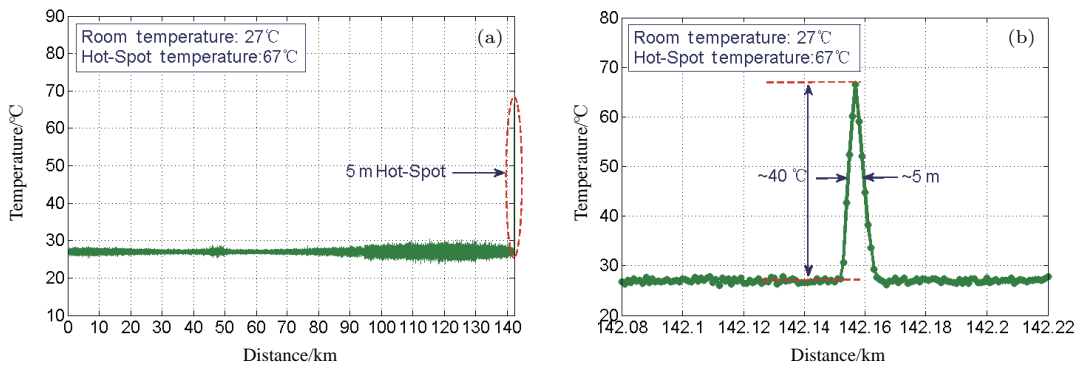


图4 实验提取的光纤温度分布 (a) 整段传感光纤; (b) 5 m 加热点附近

Fig. 4. (a) Retrieved temperature distribution after Lorentzian fitting along sensing fiber; (b) zoomed view of temperature distribution around ~ 5 m hot-spot.

### 1.3 基于随机光纤激光与低噪声LD混合放大的BOTDA

基于单一RFL抽运的前向DRA具有较低的噪声指数, 应用该方案已实现122 km分布式传感. 但由于随机激光的产生由瑞利散射提供分布

反馈, 而标准单模光纤的瑞利散射系数极其微弱 (~  $4.5 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ ), 导致此方案抽运效率较低 (需瓦级抽运功率). 在更长距离的光传输/传感系统中, 过高的抽运功率肯定会引入非线性问题. 为解决该问题, 该小节介绍一种融合随机光纤激光二阶抽运与低噪声激光二极管(LD)一阶抽运的混合

DRA 方案, 并介绍其增益特性. 若将该方案应用于超长距离 BOTDA, 传感距离可延伸至 154.4 km, 并保持空间分辨率为 5 m, 测量精度为  $\pm 1.4^\circ\text{C}$ . 这是目前国际上 BOTDA 的最长无中继传感距离.

融合 RFL 二阶抽运与低噪声 LD 一阶抽运的混合 DRA 方案如图 5 所示. 将两个输出功率相

同的 1455 nm 高功率低噪声 LD 通过偏振合束器 (PBC) 组合, 构成退偏的一阶抽运, 避免偏振相关增益引起的增益起伏. 此处一阶抽运通过 WDM2 注入光纤, 噪声指数及增益分布分别由 OTDR 及 OSA 测得. 下面着重分析混合 DRA 与常规一阶双向 DRA 的区别 [29].

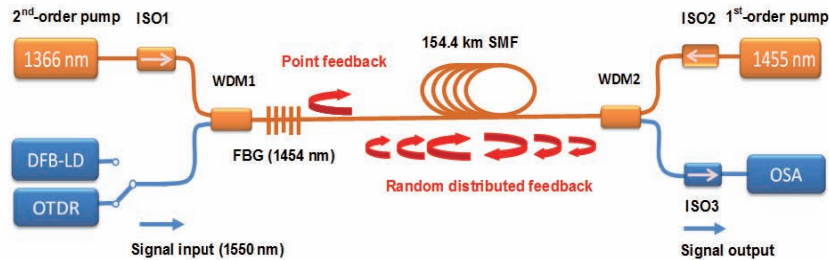


图 5 融合 RFL 二阶与 LD 一阶抽运的混合 DRA 结构与实验装置

Fig. 5. Principle and experimental setup of proposed H-DRA formed by RFL and 1st-order pumping.

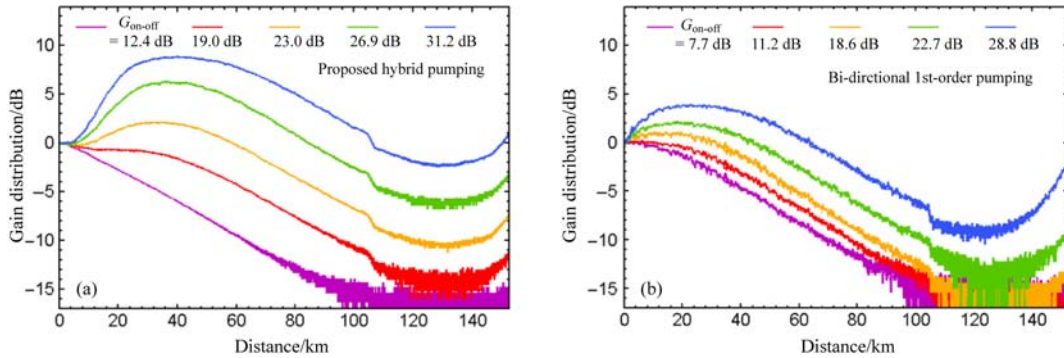


图 6 不同开关增益及抽运方式条件下的增益分布 (a) 混合抽运; (b) 双向一阶抽运

Fig. 6. Gain distribution under various on-off gains: (a) Hybrid pumping; (b) bi-directional 1st-order pumping.

图 6 所示为不同开关增益条件下混合抽运及一阶双向抽运的增益分布, 可以看出, 随着开关增益的增加, 在二阶抽运作用下, 混合抽运峰值增益逐渐深入至光纤约 40 km 处. 而类似开关增益条件下, 常规一阶双向抽运的峰值增益位于约 20 km 处. 这一特点显著提升了光纤末端 SNR, 并延伸传输/传感距离.

图 7 给出了融合随机光纤激光与一阶低噪声 LD 混合抽运的长距离 BOTDA 实验装置, 布里渊抽运光谱结构相对于探测光两边带完全对称, 由于布里渊抽运既受到 Stokes 光损耗, 同时受到反 Stokes 光增益作用, 这样布里渊抽运峰值功率沿光纤的消耗得到有效控制, 从而抑制了非局域效应. 引入 Simplex 编码技术提升 SNR, 编码长度为 255 bits, 编码增益为 9.1 dB.

探测光与低噪声 LD 同向传输可有效抑制抽

运-探测 RIN 转移, 图 8 给出了不同抽运条件下解码前的布里渊轨迹. 两者采用相同平均次数 (256), 其中一阶 DRA 使用高功率 FRL 抽运. 可以看出, 常规一阶双向抽运表现出明显的噪声起伏, 严重影响传感精度; 而采用混合抽运结构, 完全抑制了 RIN 转移引起的强度噪声. 注意尽管 1366 nm 抽运具有较大的强度噪声, 但由于该光束与探测光反向传输, 在群速度走离作用下, RIN 转移带宽得到明显降低 ( $\sim\text{kHz}$  量级) [30]. 实验所用光纤经过重新盘绕, 在附加应变作用下, 图中不同光纤连接处出现幅度变化. 传感光纤由布里渊频移轻微不同 (约 10.882, 10.870, 10.867, 10.870 GHz) 的四段光纤组成, 其熔接点位于  $\sim 11.965, 60.389$  及  $106.772$  km 处. 这里并未使用 FDM 技术 (布里渊频移差值远小于布里渊增益谱 35—60 MHz 半值全宽), 以确保最大 SBS 作用.

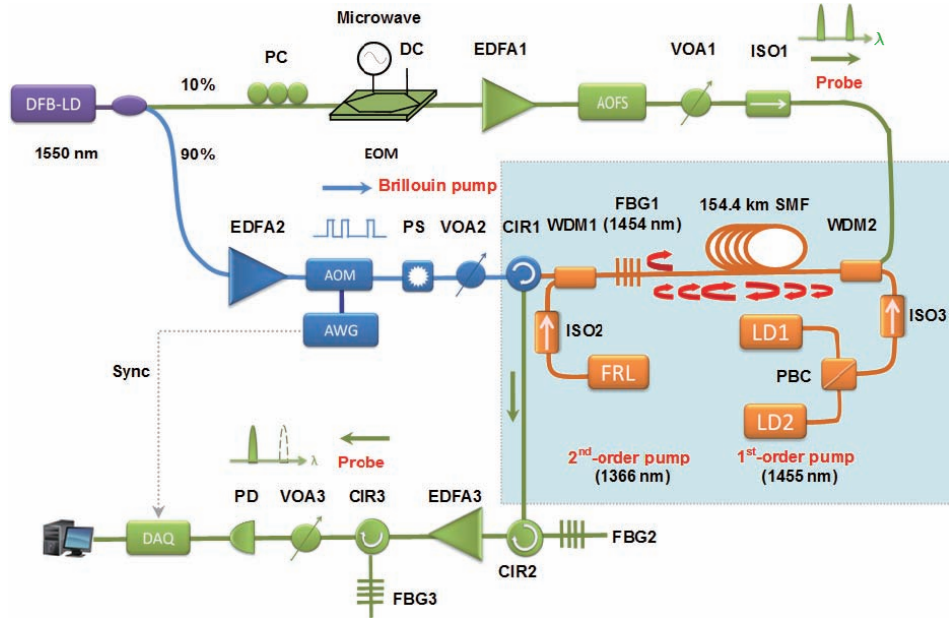


图7 融合随机激光与一阶低噪声LD混合抽运的长距离BOTDA实验装置

Fig. 7. Experimental setup of long-distance BOTDA with H-DRA incorporating RFL and 1st-order pumping.

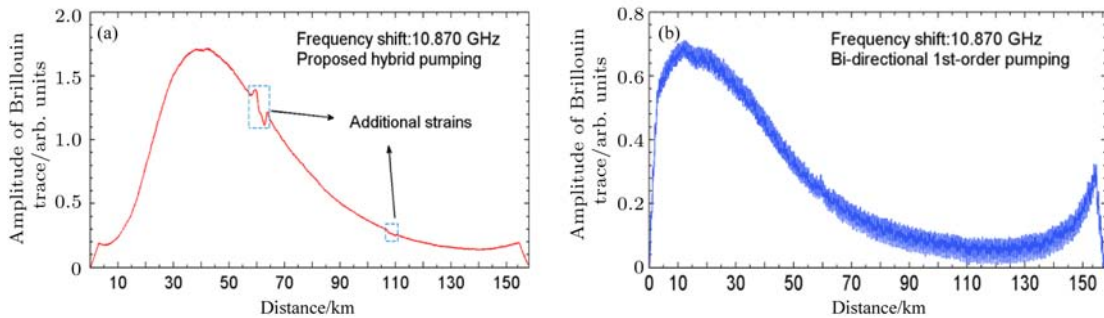


图8 不同抽运下解码前的布里渊轨迹 (a) 混合抽运; (b) 双向一阶抽运

Fig. 8. Brillouin traces without decoding: (a) Hybrid pumping; (b) bi-directional 1<sup>st</sup>-order pumping.

图9(a)给出了传感光纤远端110—154.4 km范围经解码的布里渊增益谱. 测试过程中, 光纤末端154.334 km处约5 m 光纤置于温控箱中, 其温度变化为30 °C, 室温为26.2 °C. 为抑制自相位调制(SPM)及调制不稳定(MI)引起的非线性谱展宽, 布里渊抽运峰值输入功率(~ 2.5 dBm)及拉曼抽运输入功率(1366 nm主抽运为33.7 dBm, 1455 nm LD抽运为26 dBm)均做了优化. 考虑到非局域效应, 探测输入功率(-16 dBm)也做了优化. 采集到的布里渊轨迹解码前做16次预平均, 因此, 等价平均总次数为4080. 可以看出, 整段光纤均表现出较高的信噪比. 此外, 在5 m加热点存在明显的布里渊频移变化.

图9(b)给出了光纤不同位置(10, 30, 50, 70,

90, 110, 130及150 km)经解码的布里渊增益谱. 图例给出了增益谱半值全宽. 可以看出, 布里渊增益谱宽控制在~ 35—60 MHz范围内. 此外, 由于采用了双边带调制及做了输入功率优化, 全程未出现非局域化引起的多峰结构及增益谱变形, 表明抽运消耗得到完全抑制.

单一RDFB-FL抽运的DRA抽运效率较低(需瓦级抽运功率), 主要原因在于SMF的瑞利散射系数较低. 过高的抽运功率注入将引起非线性问题. 为克服这一问题, 本小节将低噪声LD一阶抽运与随机激光二阶抽运融合, 构成一种新型混合DRA结构. 该方案不仅具有较高的抽运效率, 还保留了二阶随机激光抽运较低的噪声指数特性(优于双向一阶抽运~ 0—4 dB). 进一步, 将该方



案应用于超长距离BOTDA, 在不牺牲空间分辨率(5 m)及测量不确定度( $\pm 1.4\text{ }^\circ\text{C}$ )的前提下, 使无中继传感距离延伸至154.4 km, 创造了当时国际上BOTDA的最长无中继传感距离. 这一结果的获取主要归因于: 1) 较高的抽运效率避免了抽运功率过

高引入的非线性问题; 2) 二阶随机激射抽运使峰值增益更深入光纤内部, 确保了光纤远端信噪比; 3) 低噪声LD一阶抽运的引入克服了抽运-探测RIN转移.

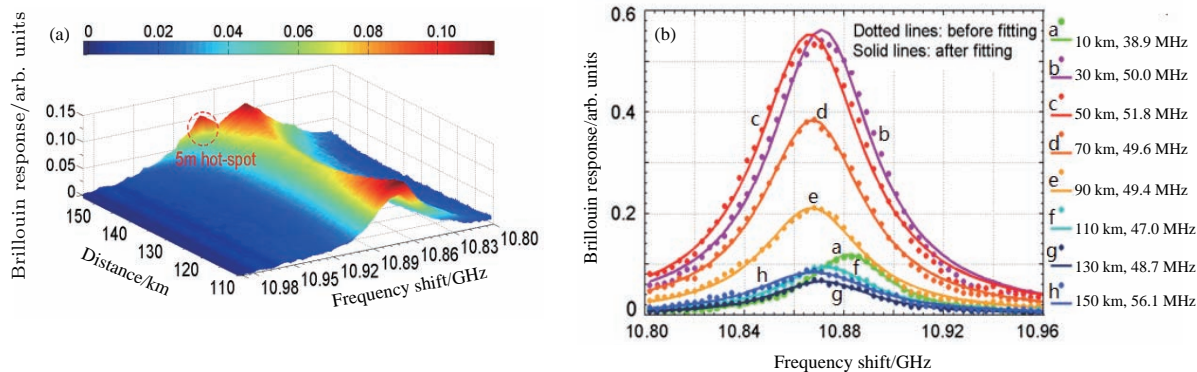


图9 经解码的110-154.4 km 布里渊增益谱: (a) 传感光纤远端; (b) 不同位置处

Fig. 9. (a) Decoded BGS vs distance and frequency shift at the far end; (b) decoded BGS at various positions.

该方案具有较高的抽运效率, 避免了抽运功率过高引入的非线性损伤; 其有效噪声指数低于常规双向一阶DRA 0—4 dB; 具有更好的增益平坦度以确保全程信噪比均衡性; 能有效抑制抽运-探测RIN转移以提升系统信噪比.

验证了该模型的有效性. 哈尔滨工程大学的吕月兰和行永伟<sup>[35]</sup>研究了影响 $\Phi$ -OTDR波形的各种物理参数(折射率、激光频率和脉宽等)变化时的相应瑞利散射波形, 通过理论分析和实验得到上述诸参数对瑞利散射波形的影响. 在 $\Phi$ -OTDR的关键光学器件研究方面, TAMU的Choi等<sup>[36]</sup>研究了激光器的线宽和频漂对系统传感性能的影响, 而他们研制出的掺铒光纤激光器可基本满足实际需求.

## 2 长距离相位敏感型光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR)

### 2.1 长距离 $\Phi$ -OTDR的国内外发展历程回顾

早在1993年, 美国TAMU的Taylor和Lee<sup>[31]</sup>就发现, 在光纤中注入超窄线宽激光脉冲后, 利用外界振动对后向瑞利散射光相位的调制特性, 可以进行振动测量; 基于此, 他们申请了关于 $\Phi$ -OTDR的首个美国专利. 从专利名字就可以看出, 最初Taylor把 $\Phi$ -OTDR定位为一种入侵监测系统, 而早期的应用探索也确实集中在入侵监测领域<sup>[32-34]</sup>.  $\Phi$ -OTDR的前期研究方向主要集中在其传感机理的研究上. TAMU的Park等<sup>[34]</sup>将 $\Phi$ -OTDR的基本理论模型抽象为: 将光纤分成 $N$ 段, 每小段的宽度为单位 $\Delta L$ , 将 $\Delta L$ 分为 $M$ 个由瑞利散射产生的离散的反射镜, 且每个反射镜的反射率和造成的相位延迟都是随机的独立分布, 该模型解释了 $\Phi$ -OTDR的物理规律, 并通过实验

在解决上述问题之后, 在保持较高空间分辨率的基础上, 如何延伸传感长度成为 $\Phi$ -OTDR研究方向的难题. 由于 $\Phi$ -OTDR利用光纤中的瑞利散射效应, 其散射强度非常微弱, 并且随传感距离的延伸, 传感信号强度呈指数衰减, 使长距离的瑞利散射信号探测更加困难. 传统的 $\Phi$ -OTDR可以通过掺铒光纤放大器(EDFA)提高入纤抽运功率来提高瑞利散射信号强度, 但入纤功率受限于SBS的影响, 必须小于SBS阈值<sup>[37]</sup>. 在此限制下,  $\Phi$ -OTDR的极限长度只能达到25 km (35 m空间分辨率)<sup>[33]</sup>. 为了克服这一限制, 在第20届OFS会议上, 分布式放大的概念被引入到 $\Phi$ -OTDR中, 从前向和后向两个方向上利用一阶拉曼抽运对抽运光和信号光进行放大, 成功地将传感长度延伸到62 km (100 m空间分辨率)<sup>[39]</sup>. 进一步, 西班牙Alcalá大学的Martins等<sup>[38]</sup>利用一阶双向拉曼放大的思路, 利用半导体光放大器(SOA)和光开关提高了入射



脉冲光的光信噪比(OSNR), 并通过平衡探测器减少拉曼抽运RIN转移的影响, 将传感距离延伸到125 km (10 m空间分辨率). 在探测方面, 2010年Ottwa大学Lu等<sup>[40]</sup>将外差检测引入到 $\Phi$ -OTDR中, 大幅度提高了系统的探测信噪比, 从而减少了平均次数, 提高了系统的振动频响能力, 证明外差探测除了能应用于COTDR (静态损耗、温度、应变测量)外, 也可显著提升动态振动信号的检测效果. 在此基础上, Ottwa大学的Qin等<sup>[41]</sup>实现了基于保偏光纤的外差检测 $\Phi$ -OTDR, 由于瑞利散射光偏振态保持不变, 因此可以通过调整本振偏振态的方

法与瑞利散射光同偏振, 从而避免了偏振衰退, 提高了系统的信噪比. 之后, 前向的一阶拉曼放大以及外差检测被应用至 $\Phi$ -OTDR, 将系统的传感距离提升至103 km (15 m空间分辨率)<sup>[42]</sup>, 随后又采用二阶拉曼放大实现了131 km的 $\Phi$ -OTDR<sup>[37]</sup>.

2014年, 分区型分布式光纤放大方法首次被提出, 实现了175 km的 $\Phi$ -OTDR系统<sup>[43]</sup>, 将 $\Phi$ -OTDR无中继传感距离的世界记录大幅提升了约50 km, 这也是目前国际上无中继传感距离最长的分布式光纤传感系统. 表2总结了近年来 $\Phi$ -OTDR性能指标提升的情况.

表2  $\Phi$ -OTDR发展历程  
Table 2. The development history of phi-OTDR.

序号	发表时间	研究人员	关键技术	传感距离/km	空间分辨率/m
1	IEEE, 2003	Choi, et al.	EDFA	25	35
2	OL, 2005	Juarez, et al.	EDFA	12	200
3	OFS, 2009	Rao, et al.	双向一阶拉曼放大	62	400
4	JLT, 2010	Lu, et al.	EDFA、外差检测	1	10
5	ACP, 2011	Pan, et al.	EDFA、数字相干检测	3.5	5
6	MST, 2013	Masoudi, et al.	EDFA、相位解调	1	2
7	OFS, 2014	He, et al.	EDFA、频分复用	1.1	10
8	JLT, 2014	Martins, et al.	双向一阶拉曼放大	125	10
9	OFS, 2014	Wang, et al.	反向布里渊放大、外差检测	124	40
10	OFS, 2014	Martins, et al.	双向二阶拉曼放大	125	10
11	OFC/OE, 2014	Peng, et al.	双向一阶拉曼放大、外差检测	128	15
12	OFS/OL, 2014	Wang, et al.	混合分区放大、外差检测	175	25

## 2.2 基于双向一阶拉曼放大的 $\Phi$ -OTDR

自从1990年代较为成熟的拉曼抽运激光器出现以来, 与EDFA相比, 由于具有更低的噪声指数和更平坦的增益, 拉曼放大技术在光纤通信和光纤传感中得到非常广泛的应用<sup>[27,30,44,45]</sup>. 在光纤传感领域, DRA技术对于多种光纤传感器的距离延伸起到关键性作用. 而在本课题所研究的 $\Phi$ -OTDR技术中, 利用一阶双向DRA可实现62 km (100 m空间分辨率)<sup>[46]</sup>和74 km (20 m空间分辨率)<sup>[47]</sup>的空间分辨率. 但是, 仅仅利用一阶双向DRA进一步提升 $\Phi$ -OTDR的综合传感性能非常困难, 原因就在于: 一方面, 直接探测的探测信噪比不能满足更长距离和更高空间分辨率的 $\Phi$ -OTDR

的要求; 另一方面, 瑞利散射的功率分布和SBS对抽运功率的限制需要被同时兼顾, 同时直接探测时, 散射光中的布里渊散射光无法与瑞利散射光分离, 这也进一步限制了入纤脉冲光功率和拉曼抽运功率.

因此, 综合上述分析, 基于一阶双向拉曼放大和外差探测的组合技术方案被提出, 此方案实现了 $\Phi$ -OTDR在传感距离、空间分辨率、灵敏度三方面的整体提高, 实现传感距离>100 km, 空间分辨率(<10 m)的高灵敏度 $\Phi$ -OTDR系统, 系统原理如图10所示<sup>[37]</sup>.

振动实验可用于验证基于一阶双向拉曼放大和外差检测的 $\Phi$ -OTDR的传感性能, 实验结果如图11所示.

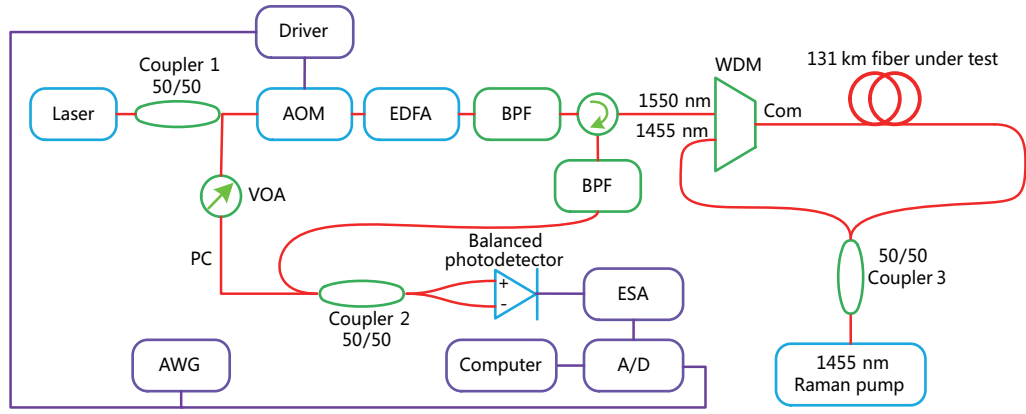


图 10 基于一阶双向拉曼放大和外差检测的  $\Phi$ -OTDR

Fig. 10.  $\Phi$ -OTDR setup based on bidirectional 1<sup>st</sup> order Raman amplifying and heterodyne detection.

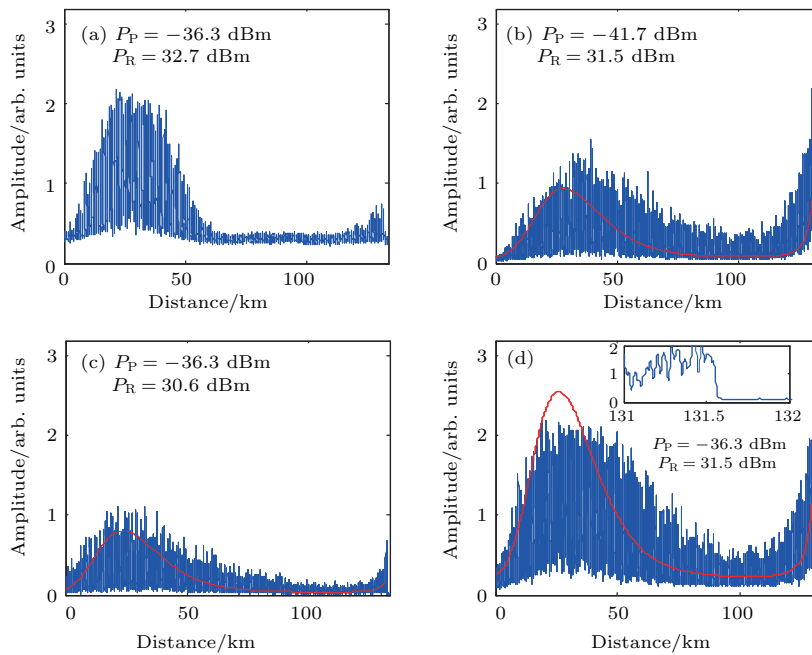


图 11 在不同探测光和拉曼抽运功率组合下的瑞利散射曲线，其中 (b), (c), (d) 中的曲线为仿真结果

Fig. 11. Rayleigh scattering signals with different combination of probe and pump light, where the curves in (b), (c), and (d) are the results of simulation.

在振动实验中，为尽可能地减小系统的触发周期，脉冲的重复频率设置为 770 Hz，与光纤长度匹配较好。系统工作在优化功率组合下，由图 11 (d)，系统信噪比最低的位置位于 100 km 附近，因此在本节的振动实验和下一节的入侵实验中，选取 97.51 km 作为测试位置。为了验证该系统的最大响应频率，97.51 km 处的 5 m 缠绕在柱状压电陶瓷 (PZT) 上的光纤被用于进行振动测试。PZT 的驱动信号为正弦波，频率范围为 25—375 Hz，加入的电致伸缩约为 3  $\mu$ m。测试点处在不同频率下的自功率谱如图 12 所示，与加入的驱动信号频率对应较好。因此该系统的最大频率响应为 375 Hz，接近

该系统的理论极限响应频率 385 Hz。

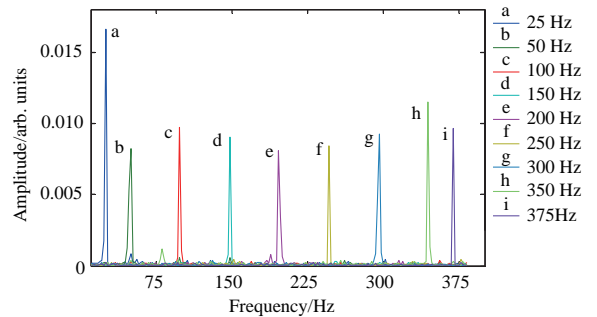


图 12 97.51 km 处不同频率振动信号下的自功率谱

Fig. 12. Auto-power spectrum in different vibration frequencies at the location of 97.51 km.

### 2.3 基于分区型混合放大的 $\Phi$ -OTDR

光纤布里渊放大 (FBA) 技术是一种基于 SBS 的新型分布式放大技术, 由于布里渊增益系数远高于拉曼增益系数 (三个数量级), 因此若要实现相同的放大效果, FBA 所需抽运功率将远低于光纤拉曼放大 (FRA) 所需抽运功率. 2014 年, 本课题组首次将 FBA 技术引入到光纤传感系统中, 仅使用 6.4 dBm 的背向布里渊抽运就实现了传感距离为 100 km、空间分辨率为 10 m 的  $\Phi$ -OTDR, 相比使用 28.0 dBm 的背向拉曼抽运而言, 获得信号的信

噪比更高 [48].

为了最大限度地延伸  $\Phi$ -OTDR 的传感距离, 提出了一种新型的分区型分布式放大 (HDA) 技术, 结合使用了三种不同的抽运方式, 把  $\Phi$ -OTDR 的传感距离延长到了创世界纪录的 175 km (空间分辨率为 25 m, 往返光纤损耗约为 70 dB).

图 13 简要展示了 HDA 技术的原理. 根据光纤的 BFS 的不同, 所使用的传感光纤可以分成三段: 第一光纤 (Seg. 1)、第二光纤 (Seg. 2)、第三光纤 (Seg. 3). 第二光纤的 BFS 与第一光纤、第三光纤相差较大.

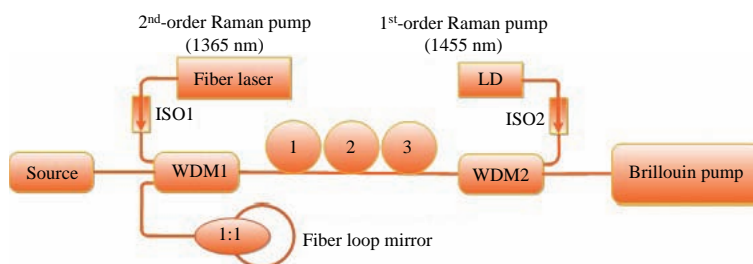


图 13 HDA 技术原理框图

Fig. 13. Technical principle diagram of HDA.

通过调整布里渊抽运源输出的布里渊抽运光功率, 使得受激布里渊放大效应主要发生在第二光纤中. 第一光纤中的信号光 (1550 nm) 主要由前向二阶拉曼抽运光 (1365 nm) 放大, 第三光纤中的信号光则由后向一阶拉曼抽运光 (1455 nm) 放大而不会被布里渊抽运放大, 布里渊抽运光 ( $\sim 1550$  nm, 频率上与信号光相差一个布里渊频移) 在本段光纤中会受到一阶拉曼放大, 使得布里渊抽运能量被推送至第二光纤, 第二光纤内的信号光主要由增益系数更高的布里渊抽运放大. 每一种抽运方式都各自为一段光纤中的信号光提供放大, 于是全程光纤中的信号光均受到分布式放大, 从而可以获得更长的无中继传输距离. 这种分区型分布式放大技术可以应用于分布式光纤传感系统中的延长系统传感距离.

1455 nm 一阶拉曼抽运光的放大作用.

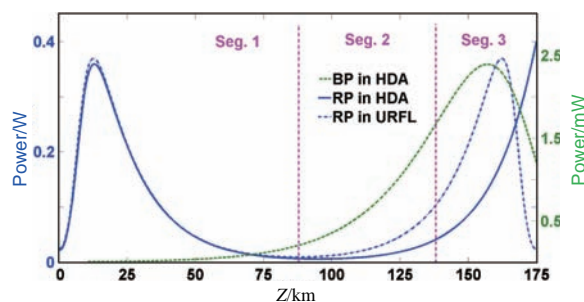


图 14 采用 HDA 技术时拉曼抽运 (RP) 与布里渊抽运 (BP) 功率分布以及采用 URFL 技术时的 RP 分布

Fig. 14. Power distribution of 1455 nm RP and 1550 nm BP with HAD and URFL, respectively.

下面从仿真上说明 HDA 方案的优越性. 采用超长距离拉曼光纤随机激光器 (URFL, 基于二阶拉曼随机激光放大) 作为放大抽运源的系统被用于与 HDA 方案做对比. 抽运功率仿真结果如图 14 所示, 由图可知, 相比于 URFL 系统, 布里渊抽运光的强度从 175 km 处开始不断增大, 直到约 155 km 处达到最大, 然后缓缓减弱, 体现了从 175 km 处注入

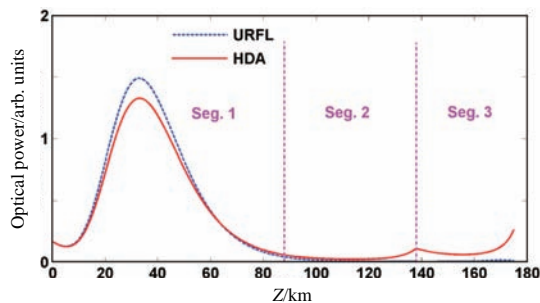


图 15 使用 URFL 及 HDA 方案的瑞利散射轨迹仿真对比

Fig. 15. Rayleigh backscattering trace comparison between URFL and HDA schemes in simulation.

图 15 为采用两种不同方案得到的探测脉冲光的瑞利散射轨迹仿真图. 由图 15 可知, 在使用 URFL 放大方案的模型中, 瑞利散射光强度在约 37 km 处达到最大值, 随后由于拉曼增益不能完全补偿信号光在传播过程中受到的光纤损耗, 散射光强度不断下降. 虽然整个光纤的前半程有反向传播的拉曼抽运作用, 瑞利散射强度还是持续下降直到非常微弱, 与之形成鲜明对比的是, 在 HDA 方案中, Seg. 2 中信号光强度被布里渊抽运快速拉升, 信号光传播到 Seg. 3 中时受到背向一阶拉曼抽运

放大, 进一步提高了瑞利散射信号功率. 从图 15 所示的仿真图可以看出, HDA 技术方案可以用来实现超长距离的 OTDR 系统.

基于 HDA 技术及外差探测技术, 搭建了一套传感光纤总长为 175 km 的  $\Phi$ -OTDR 实验系统; 对比了不同的抽运情况下的传感信号; 由于受激布里渊效应与温度有关, 在获得最优信号的基础上改变布里渊抽运光频率, 测试了系统的温度稳定性; 进行单点及多点同时侵扰实验, 检测系统的入侵检测传感性能. 实验系统框架如图 16 所示 [49].

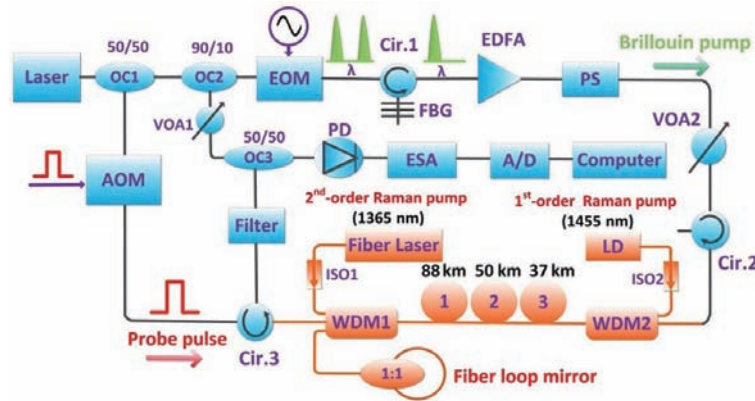


图 16 基于 HDA 的  $\Phi$ -OTDR 实验装置图  
Fig. 16.  $\Phi$ -OTDR experimental setup based on HDA.

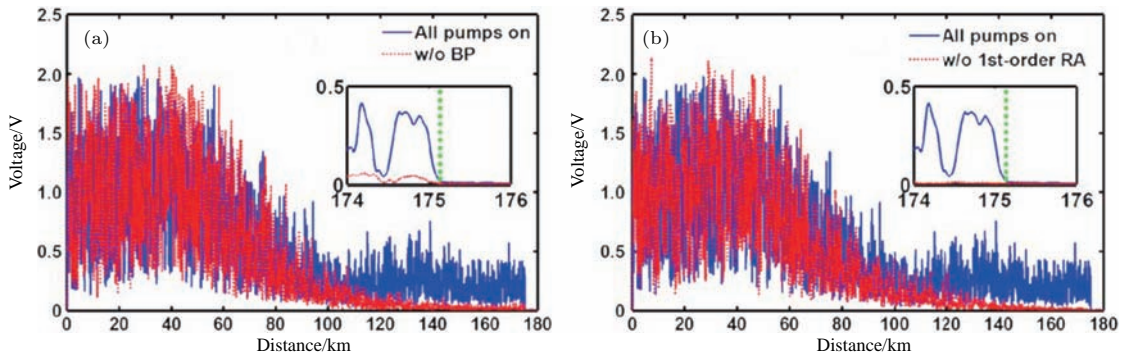


图 17 不同抽运下的  $\Phi$ -OTDR 曲线 (a) 抽运全开与未加布里渊抽运; (b) 抽运全开与未加背向一阶拉曼抽运  
Fig. 17.  $\Phi$ -OTDR traces: (a) All pumps on vs BP off; (b) all pumps on vs 1455 nm semiconductor RP off.

基于上述实验系统, 首先进行了不同抽运对于  $\Phi$ -OTDR 信号放大效果的对比实验. HDA 方案中, 布里渊抽运光与探测脉冲光的频率差首先被设置为 11.034 GHz, 使得 Seg. 2 中发生最强的受激布里渊作用. 系统在不同抽运条件下获得的  $\Phi$ -OTDR 曲线 (平均 32 次, 对应的系统带宽为 7.8 Hz) 如图 17 所示.

由图 17 (a) 可知, 与没有加布里渊抽运 (BP) 的情况相比, 可以看出布里渊抽运会对获得的信号强度产生重大影响. 另外, 由图 17 (b) 可知, 在没有

加反向一阶拉曼抽运时, 布里渊抽运基本上不会发挥作用, 在这种情况下, 布里渊抽运传输到 Seg. 2 时已经过于微弱, 无法为探测脉冲光提供足够的增益, 因此反向一阶拉曼抽运也是不可或缺的.

外界温度的改变会引起传感光纤的布里渊增益谱发生改变, 影响光纤中受激布里渊作用的放大效果. SMF 的 BFS 随温度变化的漂移率约为 1 MHz/ $^{\circ}$ C. 在本实验中, 通过改变布里渊抽运光的频率, 对比探测器获得的干涉曲线以检测系统对外环境温度变化的敏感性. 实验结果如图 18 所示.



图 18(a) 是未加布里渊抽运与布里渊抽运频移设置为 11.022 GHz 的散射曲线对比图, 图 18(b) 是为加布里渊抽运与布里渊抽运频移设置为 11.047 GHz 的散射曲线对比图. 从这两幅图可以看出, 布里渊抽运的频率确实会在一定程度上影响放大效果, 然而即使布里渊抽运频率从 11.022 GHz 变化到 11.047 GHz, 即变化 25 MHz 对应环境温度变化 25 °C, 布里渊抽运的放大效果依然非常显著, 通过与未加布里渊抽运的情况对比可以看出布里渊抽运是不可或缺的. 通过这两组对比实验可以看出, 使用 HDA 技术的  $\Phi$ -OTDR 对温度变化(光纤 BFS 变化)的环境有较好的适应性.

由于环境温度变化较为缓慢的, 在必要时可以采用一种频率漂移自适应控制算法(基于环境温度变化, 对应调整布里渊抽运光频率), 将可更好地补偿较大的光纤布里渊频移漂移.

为了测试所搭建系统的入侵检测能力, 在传感光纤的 87.3, 136.6 以及 174.7 km 处分别盘出一小卷长约 10 m 的光纤作为测试点. 测试所采用的侵扰方式是用手轻拍测试点处光纤. 在信号处理方面, 采用了小波变换技术以更加准确地提取侵扰信息, 提高  $\Phi$ -OTDR 系统的检测性能. 单点入侵及多点同时入侵实验解调效果如图 19 所示.

图 19(a) 所示为单点入侵效果图, 在 174.7 km 处测试点施加侵扰时, 获得的解调出来信号的 SNR 为 12.1 dB, 在本节中 SNR 是指信号峰值强度与背景噪声强度的均方根比值; 图 19(b) 体现了了系统的多点监测能力, 在 87.3 km 与 136.6 km 处进行的侵扰被同时检测到, SNR 分别为 11.6 dB 与 12.6 dB. 由以上侵扰测试结果可知, 实验系统性能优良.

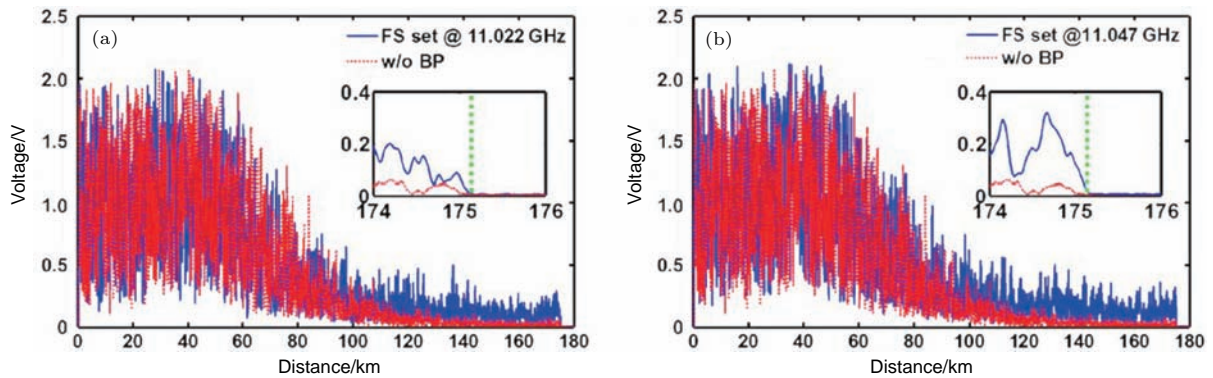


图 18 不同布里渊抽运频率与未加布里渊抽运时的  $\Phi$ -OTDR 曲线 (a) 布里渊抽运频移设置为 11.022 GHz 与未加布里渊抽运获得的散射曲线; (b) 布里渊抽运频移设置为 11.047 GHz 与未加布里渊抽运获得的散射曲线  
Fig. 18.  $\Phi$ -OTDR traces: (a) BP frequency shift at 11.022 GHz vs without BP; (b) BP frequency shift at 11.047 GHz vs without BP. Insets: comparison of the signal inside the fiber and the noise outside the fiber.

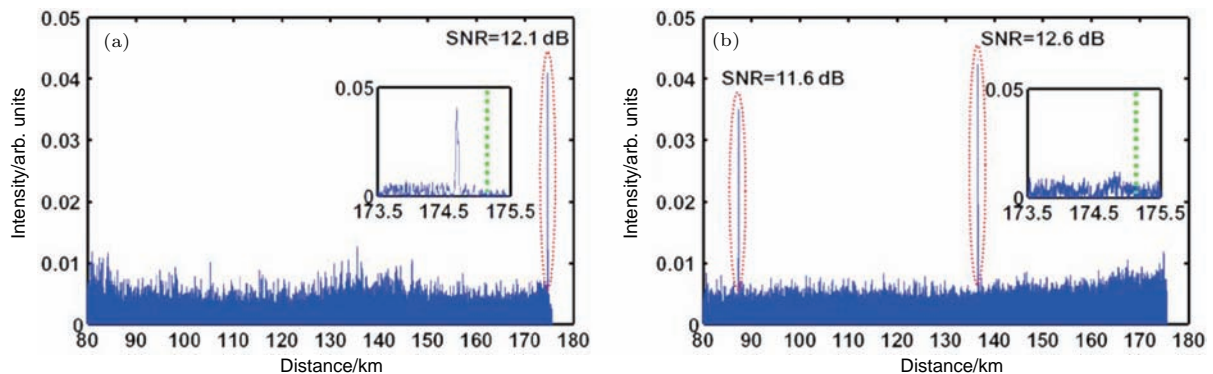


图 19 测试点侵扰解调效果图 (a) 174.7 km 处侵扰; (b) 87.3 km 与 136.6 km 处同时侵扰  
Fig. 19. Demodulated intrusion signal at different locations: (a) Single-point perturbation at 174.7 km; (b) two-point perturbation at 87.3 and 136.6 km. Insets: comparison of the signal inside the fiber and the noise outside the fiber.

与之前的传感距离纪录相比, 虽然本文中更宽的脉冲宽度为获得的信号提供了约 5 dB 的增益, 但是本文所实现系统的往返损耗比前记录大了约 18 dB, 由此可看出本文所搭建的系统更加难以实现. 进一步优化该系统, 将可实现更长的传感距离更高的空间分辨率, 该方案也可以被用在其他的分布式光纤传感系统中延长传感距离.

### 3 长距离分布式光纤传感系统的应用

#### 3.1 基于 $\Phi$ -OTDR 的列车定位与测速系统

目前的铁路领域通过基于通信的列车控制系统 (CBTC) 实时获取列车的位置和速度来保证列车的安全运行 [50], 而 CBTC 通过轨道电路获知列车的实时位置. 虽然轨道电路采取了防雷电措施, 但是在一些极端天气情况, 比如强雷电下, 轨道电路仍然有可能失效, 导致列车调度的失败, 进而导致列车运行安全事故 [51]. 2011 年的甬温线特别重大铁路交通事故的部分原因就是频繁的雷击导致轨道电路失效, 事故造成巨大的生命财产损失 [52]. 因此, 在轨道交通领域, 研究能够抗电磁干扰的新型列车定位与测速系统具有重要意义. 该系统必须同时满足以下三个特性: 1) 长距离测量, 通常情况下, 两车站间距 > 10 km, 如果测量距离较短, 需要的设备较多, 系统结构复杂, 成本和稳定性都难以保证; 2) 实时性好, 必须能够实时获取列车的位置和速度, 如果不能满足实时性要求, 对于高速运行的列车来说就失去了应用的价值; 3) 抗电磁干扰, 在满足前面两条的基础上, 必须能够抗电磁干扰 (雷击), 否则与目前的轨道电路相比, 就失去了技术优势, 同样没有应用的价值.

研究发现, 连接埋设在铁轨下方或附近的通信光纤,  $\Phi$ -OTDR 可以对振动源——火车实时定位. 进一步地, 对实时获知的列车位置进行微分, 就能实时探测列车的速度 [53].  $\Phi$ -OTDR 具备长距离、实时性好、抗电磁干扰的特性, 因此基于  $\Phi$ -OTDR 振动探测的高速列车定位与测速系统, 就具有实用的可能性.

监控中心的  $\Phi$ -OTDR 主机连接埋设于铁轨侧下方的 12.1 km 的单模光缆. 该  $\Phi$ -OTDR 主机的系统结构如图 20 所示. 一个超窄线宽 ( $\sim 3$  kHz)、低频漂 ( $< 1$  MHz/min) 的半导体光源首先被声光

调制器 (AOM) 调制, 驱动信号的重复频率和脉冲宽度分别为 1 kHz 和 200 ns. 这样对应的空间分辨率为 20 m. 调制的光脉冲被 EDFA 放大后, 通过环形器后进入待测光纤中. 光纤中的瑞利散射信号首先被 EDFA 放大, 并通过带通滤波器滤除 EDFA 带来的放大器自发发射噪声 (ASE 噪声), 最后放大的瑞利散射信号被 10 MHz 带宽的光电探测器探测. 利用采样率为 50 MSamples/s 的 A/D 将光电探测器输出的电信号转换为数字信号, 并最终在计算机中进行处理最终的光电转换后的信号.

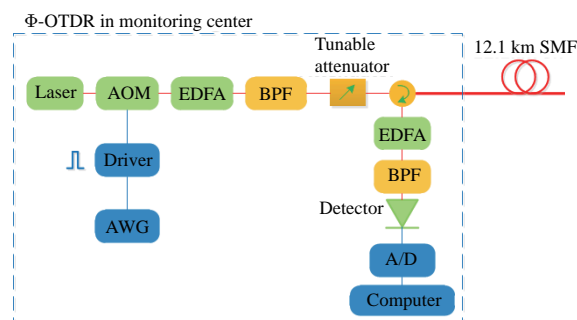


图 20 基于  $\Phi$ -OTDR 的列车定位与测速系统框图  
Fig. 20. Schematic diagram of  $\Phi$ -OTDR used in position and speed monitoring of trains.

现场的光缆、铁轨、列车之间的相对关系如图 21 所示. 12.1 km 的光纤埋地深度为 0.7—1.5 m, 光缆与两铁轨互相平行, 且离最近的铁轨距离大约 15—20 m, 其中有 10.2 km 的光缆在监控范围内. 两列列车以较为固定的速度相向而行, 列车产生的振动通过土壤传递到光缆, 对光缆施加应变. 监控中心中的  $\Phi$ -OTDR 不断探测整条光缆链路的振动情况.

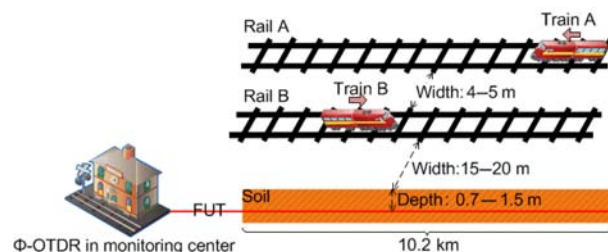


图 21 光缆、铁轨、列车相对位置关系示意图  
Fig. 21. Relative positions between the optical cable, trains and railways.

由于采用的是直接探测方案, 因此需要平均的次数较多, 原始的瑞利散射曲线首先平均 25 次以降低探测器的热噪声的影响, 从而提高瑞利散射信号的探测信噪比. 当两辆列车分别经过 5.53 km 时,

探测到的原始振动信号如图 22 (a) 所示, 经过小波去噪后的振动信号如图 22 (b) 所示, 经过去噪后的振动信号的信噪比提升非常明显, 并且可以看到列车接近-经过-远离该位置, 信号从无到有, 并逐渐变强, 最后逐渐减弱的过程.

在通过小波去噪并获得信噪比较高的振动信号后, 通过均方根来对每个定位周期内所有位置的振动信号的振动水平进行量化. 以第 70 s 和 378 s 为例, 经过量化, 所有位置处的振动水平如图 23 所示. 图中箭头间的空间长度代表这两个定位周期内受到火车影响出现振动的范围, 分别约为 1100 m 和 960 m, 该空间长度略长于火车长度, 因此可以通过该长度估计两列火车的长度.

整个列车运行过程, 获得的振动水平-时间-空间强度如图 24 (a) 所示, 进一步通过均方根量化振动水平-滑动方差-峰值检测, 得到每个定位周期的列车产生振动的上升沿和下降沿, 获得的上升沿和下降沿分别与列车的首尾对应, 如图 24 (a) 所示. 最终, 对列车的位移曲线求导, 得到列车的速度曲线, 如图 24 (b) 所示.

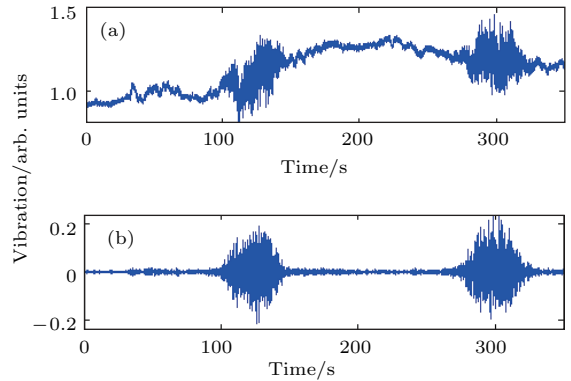


图 22 5.53 km 处的 (a) 原始振动信号, (b) 小波去噪后的振动信号

Fig. 22. (a) Original time series of vibrations; (b) vibration signals after wavelet denoising.

由图 24 (b), 列车的整个运行状态为: 当列车 A 在 10 km 处以 115 km/h 的速度向左运行, 列车 B 还未进入监控区域. 当列车 B 在约 174 s 时以约 105 km/h 速度进入监控区域. 在 194 s 左右, 两车在约 3.9 km 处相汇. 在相汇时, 两车由于共振, 使振动的区域非常宽, 如图 24 (a) 中交叉区域所示. 两车分别约在 420 s 和 255 s 时驶离监控区域, 整段光纤趋于平静.

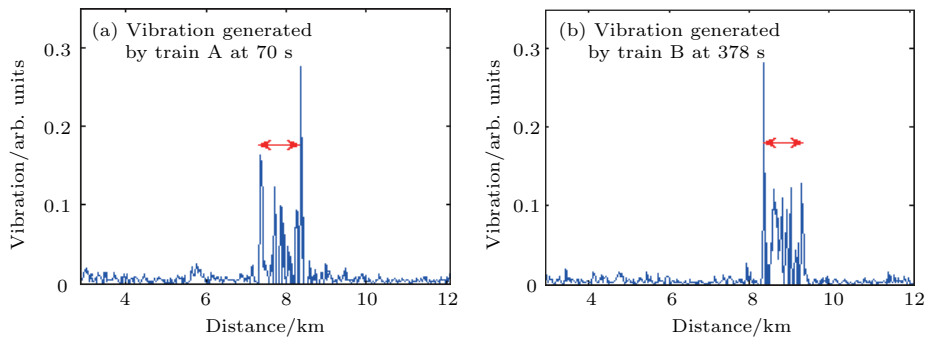


图 23 不同点振动信号图 (a)  $t = 70$  s 时的原始振动信号; (b)  $t = 378$  s 时的原始振动信号

Fig. 23. Vibration signals of train A and B at two different time points: (a)  $t = 70$  s; (b)  $t = 378$  s.

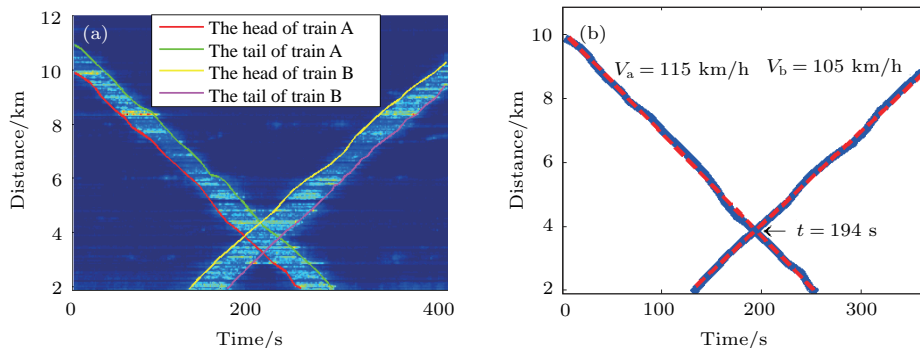


图 24 列车振动信号分布图 (a) 振动幅度时间空间图; (b) 两列车运行轨迹图

Fig. 24. (a) Vibration intensity vs space and time and the edges of every location period; (b) the two edges of the two trains' heads (blue lines). The red lines are the fitting traces of the two trains.



上述实验结果足以说明  $\Phi$ -OTDR 在该领域应用的可行性和未来的应用潜力:  $\Phi$ -OTDR 可以作为目前 CBTC 的有效补充和备选方案, 在极端恶劣的雷电天气下, 与目前的轨道电路相比, 其测量结果的有效性更高, 可有效避免由于轨道电路失效导致的列车调度事故. 同时  $\Phi$ -OTDR 在轨道交通的应用类型远远不仅限于此. 我们只关注了列车的振动水平随时间的变化, 而未对其振动模式进行分析(列车引起地面振动的其他信号特征), 而这类振动模式往往可以反映铁轨和路基的安全状况. 因此,  $\Phi$ -OTDR 未来可望在轨道交通中的结构健康安全监测上发挥重要作用.

### 3.2 基于 DAS 的石油管道安全监测系统

当  $\Phi$ -OTDR 采用相位解调时,  $\Phi$ -OTDR 具备探测外界振动和声波变化的能力, 包括声波的幅度、频率、相位信息. 在石油工业界, DAS 已经展现出前所未有的应用前景. 在国外, 率先开展 DAS 应用的是英国的 Optasense 和 Silixa 公司, 应用的类型主要分为两类: 地震波检测和石油管道安全监测, 覆盖了石油工业的勘探、生产、运输三个过程, 具有重要的经济意义和社会意义 [54,55]. 国内虽然开展  $\Phi$ -OTDR 的研究虽然较早, 但是 DAS 的研究与应用较晚, 相比国外仍有较大差距.

早在 2008 年, Optosense 就致力于 DAS 在石油管道安全监测的应用, 提出了“zero pipeline incidents”(零管道事故) 的口号, 主要致力于管道安全的两个方面: 一是第三方干扰 (TPI), 也就是对于潜在的或者正在实施的对管道的第三方破坏行为, 包括对于管道的机械挖掘、人为挖掘、重型车辆等进行提前预报或报警; 二是提供新型的多个模式的管道泄漏探测, 比如管道的腐蚀导致的管道泄漏.

由于国内的大部分石油管道安全事故主要是由偷盗油对管道的破坏造成的, 因此对于泄漏检测的需求要远远大于对于 TPI 检测的需求. 石油管道的盗油活动, 不仅造成石油产品的损耗, 带来直接的经济损失, 更重要的是, 由于盗油者对管道的破坏很可能造成环境的污染, 带来严重的生态灾难 [55]. 盗油活动所有的过程, 均会在管道形成地震波, 而目前国内的管道增压站之间的通信, 均采用光纤通信, 而光纤通信链路与石油管道是并行铺设, 且相隔较近, 因此 TPI 入侵动作产生的地震波会较好地传递到通信光纤上. 因此, DAS 从增压站

点的通信光缆接入, 就能够完成长距离入侵监测的目的.

现场利用 DAS 进行管道 TPI 监测的具体实施方案如图 25 所示. 光缆埋地深度从 1—2 m 不等. DAS 置于增压站 A 处, 连接与石油管道并行的传感光缆, 管道总长为 50 km. 现场的石油管道的情况较为复杂, 靠近公路和铁路的地方较多, 车辆的振动对监测系统产生较多的干扰, 因此需要对各种振动信号进行识别, 以区分不同振动信号的类型, 最终达到屏蔽绝大多数的干扰, 只对 TPI 入侵动作有报警响应.

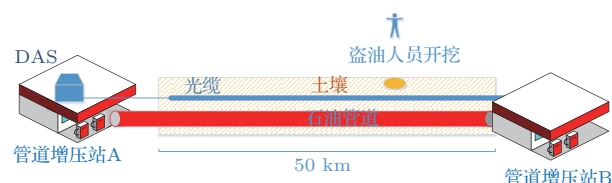


图 25 基于 DAS 的石油管道安全监测系统的实施方案图  
Fig. 25. Schematic diagram of the oil pipeline safety monitoring system based on DAS.

为了验证该系统的效果, 在光纤的尾端约 47 km 处, 利用本实验室研发的 DAS, 采集管线附近的各种动作, 包括挖掘、走路、跑步、车辆产生的振动信号. 测试位置离路边较近, 各类车辆, 特别是重型车辆在经过该处管道时, 产生非常大的振动信号, 容易造成误报警.

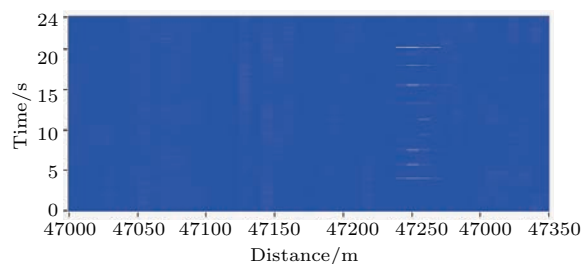


图 26 距光缆垂直距离 1 m 处刨地时, 振动幅度-时间-距离的瀑布图  
Fig. 26. Waterfall figure of vibration amplitude-time-distance when digging the ground at 1 m vertical distance away from the optical cable.

在测试点附近进行挖掘时, 得到的振动幅度时间距离的瀑布图如图 26 所示, 在 47250—47270 m 之间, 振动信号的幅值较大, 在瀑布图上体现为随挖掘动作节奏出现亮点. 对上述空间位置处的信号进行叠加, 得到在不同入侵动作时的振动时域信号、自功率谱、短时傅里叶变换 (STFT) 如图 27 所示.



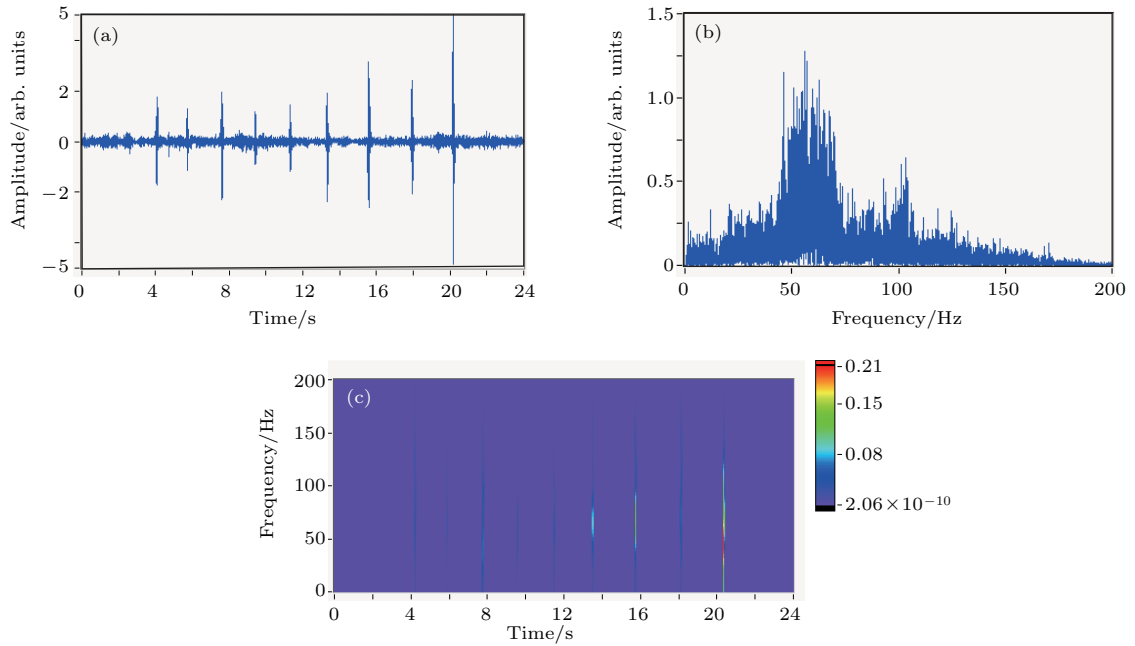


图 27 距光缆垂直距离 1 m 处刨地得到的 (a) 时域波形, (b) 频谱, (c) STFT

Fig. 27. (a) Time-domain waveform, (b) frequency spectrum, (c) STFT when digging the ground at 1 m vertical distance away from the optical cable.

除了系统需要报警的挖掘动作, 在现场本课题组对其他产生振动的常见动作(跑跳、走路)也进行了采集分析, 根据测试结果, 总结得到各类振动信号的模式特性如下.

1) 时域幅度特征: 挖掘和跳跃等动作, 都可以产生较大幅度的振动信号, 而人走路产生的振动明显小很多, 这一点可以通过时域信号的比较容易得出.

2) 时域的持续性特征: 对于车辆等产生的信号, 从较长时间尺度(秒级)上, 延续时间较长. 以图 28 为例, 火车经过时, 产生的振动信号虽然较大, 但是其持续时间非常长, 形成连续不断的持续振动波.

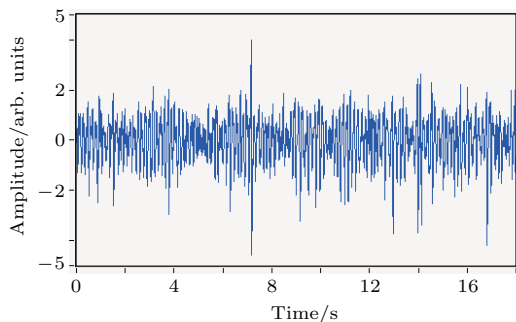


图 28 火车产生的振动时域波形

Fig. 28. Time-domain waveform of vibrations generated by the train.

3) 功率频谱特征: 挖掘产生的振动的主要频率成分在  $(50 \pm 15)$  Hz 以内, 与人的跑跳产生振动的主要频率成分存在较大区别.

4) 瞬时频率特征: 通过图 29 (a) 和图 29 (b) 的比较可以看到, 挖掘产生的振动信号能量主要集中在 50—100 Hz 较高频段内, 而对于跳跃产生的信号, 能量从 0—60 Hz 有非常好的延续.

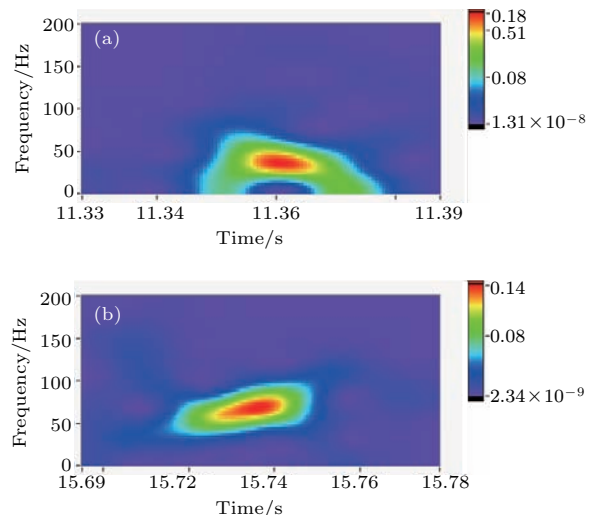


图 29 距光缆垂直距离 1 m 处 (a) 刨地, (b) 人跑跳的 STFT

Fig. 29. STFT figure of (a) digging, (b) running or jumping at 1 m vertical distance away from the cable.

综上,在保证长距离DAS信噪比的基础上,对该系统采集得到的信号的振动模式进行了分析,并总结出管道安全中关注的挖掘动作相比其他干扰(人的正常活动跑、跳、走等动作以及车辆的干扰)的信号特征,证明了基于DAS的长距离管道安全监测系统的优越性能.从上述四个信号特征,形成多维的判据,一方面形成对石油管道安全监测中感兴趣的特定振动——开挖(刨土)动作的有效检测,另一方面对于外界干扰,比如人的正常活动(走动、跑步)以及车辆产生的振动,能够有效屏蔽,减少系统的误报警,从而为后续形成真正实用化的长距离石油管道安全监测系统打下了良好的基础.

## 4 总 结

本文系统回顾了长距离布里渊光时域分析仪(BOTDA)和相位敏感型光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR)的国内外研究进展及相关关键技术.重点阐述了本团队在长距离BOTDA和 $\Phi$ -OTDR取得的研究进展,包括基于环形腔随机光纤激光放大的BOTDA、基于随机光纤激光与低噪声LD混合放大的BOTDA、基于双向一阶拉曼放大的 $\Phi$ -OTDR、基于分区型混合放大的 $\Phi$ -OTDR以及长距离分布式光纤传感系统在列车定位与测速和石油管道安全监测方面的应用研究.随着分布式光纤传感技术在传感距离和传感精度上的突破,其在周界安防、石油电力、大型结构等领域的安全监控方面将发挥愈发重要的作用.

## 参考文献

- [1] Horiguchi T, Tateda M 1989 *IEEE J. Lightwave Technol.* **7** 1170
- [2] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M 1990 *Opt. Lett.* **15** 1038
- [3] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M 1990 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2** 352
- [4] Bao X, Dhliwayo J, Heron N, Webb D J, Jackson D A 1995 *IEEE J. Lightwave Technol.* **13** 1340
- [5] Geinitz E, Jetschke S, Ropke U, Schroter S, Willsch R, Bartelt H 1999 *Measur. Sci. Technol.* **10** 112
- [6] Pasquale D 2008 *Opt. Express* **16** 19097
- [7] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 450
- [8] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, Thevenaz L 2010 *Opt. Lett.* **35** 259
- [9] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F 2010 *Opt. Express* **18** 14878
- [10] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, Thevenaz L 2010 *Measur. Sci. Technol.* **21** 094024
- [11] Soto M A, Sahu P K, Bolognini G, Di Pasquale F 2008 *Pasquale F IEEE Sensors J.* **8** 225
- [12] Liang H, Li W H, Linze N, Chen L, Bao X Y 2010 *Opt. Lett.* **35** 1503
- [13] Jia X H, Rao Y J, Chang L, Zhang C, Ran Z L 2010 *IEEE J. Lightwave Technol.* **28** 1624
- [14] Rao Y J, Jia X H, Deng K, Yang Z X, Chang L, Zhang C, Ran Z L 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 435
- [15] Rodriguez-Barrios F, Martin-Lopez S, Carrasco-Sanz A, Corredera P, Diego Ania-Castanol J, Thevenaz L, Gonzalez-Herreraez M 2010 *IEEE J. Lightwave Technol.* **28** 2162
- [16] Martin-Lopez S, Alcon-Camas M, Rodriguez F, Corredera P, Diego Ania-Castanon J, Thevenaz L, Gonzalez-Herreraez M 2010 *Opt. Express* **18** 18769
- [17] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F 2011 *Opt. Express* **19** 4444
- [18] Wang Z N, Jia X H, Rao Y Z, et al. 2012 *Proc. SPIE* **8351** 835142
- [19] Dong Y, Chen L, Bao X 2012 *IEEE J. Lightwave Technol.* **30** 1161
- [20] Dong Y, Chen L, Bao X 2011 *Opt. Lett.* **36** 277
- [21] Zornoza A, Minardo A, Bernini R, Loayssa A, Zeni L 2011 *IEEE Sensors J.* **11** 1067
- [22] Soto M A, Ramirez J A, Thevenaz L 2016 *Nature Communications* **7** 10870
- [23] Buades A, Coll B, Morel J M 2005 *Multisc. Model. Simul.* **4** 490
- [24] Qian X, Wang Z N, Wang S, Xue N, Sun W, Zhang L, Zhang B, Rao Y J 2016 *Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'2016)* Ireland, May 31–June 3, 2016 p99162S
- [25] Qian X, Wang Z N, Sun W 2016 *International Conference on Optical Communications and Networks T4* Hangzhou, September 24–27, 2016 pT4-O-14
- [26] Nielsen T N, Hansen P B, Stentz A J, Aquari V M 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 1492
- [27] Jia X H, Rao Y J, Wang Z N, Zhang W L, Yuan C X, Yan X D, Li J, Wu H, Zhu Y Y, Peng F 2013 *Opt. Express* **21** 21208
- [28] Karalekas V, Ania-Castanon J D, Harper P, Babin S A, Podivilov E V, Turitsyn S K 2007 *Opt. Express* **15** 16690
- [29] Jia X H, Rao Y J, Yuan C X, Li J, Yan X D, Wang Z N, Zhang W L, Wu H, Zhu Y Y, Peng F 2013 *Opt. Express* **21** 24611
- [30] Headley C, Agrawal G P 2005 *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems* (San Diego: Academic Press) pp13-366
- [31] Taylor H F, Lee C E 1993 *US Patents* 5194847
- [32] Gorshkov B G, Paramonov V M, Kurkov A S, Kulakov A T, Zazirnyi M V 2006 *Quantum Electron.* **36** 963
- [33] Juarez J C, Taylor H F 2007 *Appl. Opt.* **46** 1968

- [34] Park J, Lee W, Taylor H F 1998 *International Society for Optics and Photonics* Beijing, China, September 16, p49
- [35] Lü Y L, Xing Y W 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 819001 (in Chinese) [吕月兰, 行永伟 2011 光学学报 **31** 819001]
- [36] Choi K N, Taylor H F 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 386
- [37] Peng F, Wu H, Jia X H, Rao Y J, Wang Z N, Peng Z P 2014 *Opt. Express* **22** 13804
- [38] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, Filograno M, Frazão O, Gonzalez-Herraez M 2014 *J. Lightw. Technol.* **32** 1510
- [39] Martins H F, Martín-López S, Filograno M, Corredera P, Frazão O, Gonzalez-Herraez M 2014 *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS 2014)* Spain, June 2–June 6, 2014 p91576K
- [40] Lu Y, Zhu T, Chen L, Bao X Y 2010 *J. Lightw. Technol.* **28** 3243
- [41] Qin Z, Zhu T, Chen L, Bao X Y 2011 *IEEE Photon Technol. Lett.* **23** 1091
- [42] Peng Z P, Rao Y J, Peng F, Wu H J, Jia X H, Li X Y 2014 *J. Optoelectron-Laser* **04** 724 (in Chinese) [彭正谱, 饶云江, 彭飞, 吴慧娟, 贾新鸿, 李小玉 2014 光电子·激光 **04** 724]
- [43] Wang Z N, Zeng J J, Li J, Fan M Q, Wu H, Peng F, Zhang L, Zhou Y, Rao Y J 2014 *Opt. Lett.* **39** 5866
- [44] Rao Y J, Feng S, Jiang Q, Ran Z L 2009 *20th International Conference on Optical Fibre Sensors* Edinburgh, UK, October 5, 2009 p75031Q
- [45] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1321
- [46] Rao Y J, Luo J, Ran Z L, Yue J F, Luo X D, Zhou Z 2009 *20th International Conference on Optical Fibre Sensors* Edinburgh UK October 5, 2009 p75031O
- [47] Wang J, Jia X H, Rao Y J, Wu H J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044212 (in Chinese) [王杰, 贾新鸿, 饶云江, 吴慧娟 2013 物理学报 **62** 044212]
- [48] Li Y, Bao X Y, Ravet F, Ponomarev E 2008 *Appl. Opt.* **47** 99
- [49] Wang Z N, Zeng J J, Li J, Peng F, Zhang L, Zhou Y, Wu H, Rao Y J 2014 *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors* Spain, June 2, 2014 p9157D5
- [50] Pascoe R, Eichorn T 2009 *IEEE Veh. Technol. Mag.* **4** 16
- [51] Ripamonti P 1984 *Google Patents* 4432517
- [52] Ramzy A 2011 <http://world.time.com/2011/07/24/deadly-crash-adds-to-worries-about-chinas-high-speed-trains/> [2011-7-10]
- [53] Peng F, Duan N, Rao Y J, Li J 2014 *IEEE Photon Technol. Lett.* **26** 2055
- [54] Zhao S H, Zhang Q, Ye H 2009 *Modern Sci.* **2** 86 (in Chinese) [赵述合, 张权, 叶辉 2009 今日科苑 **2** 86]
- [55] Zhan Y 2008 *Environ. Pollut. Control* **30** 91 (in Chinese) [詹研 2008 环境污染与防治 **30** 91]

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

# Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing\*

Rao Yun-Jiang<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications (Education Ministry of China), University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

( Received 19 January 2017; revised manuscript received 10 March 2017 )

## Abstract

Distributed fiber-optic sensing (DFOS) is one of the most important parts in the fiber-optic sensing field, due to the following advantages: 1) there is no need to manufacture sensors on the fiber; 2) fibers are able to realize transmission and detection simultaneously; 3) long-distance/large-scale sensing and networking can be accomplished prospectively; 4) the spatial distribution and measurement information of physical parameters such as temperature, strain and vibration, can be obtained continuously along the fiber link, and the number of sensing points on a single fiber can be up to several tens of thousands. Due to the above tremendous superiority, DFOS has found wide application prospects, including perimeter security, oil/gas exploration, electrical facilities and structure monitoring, etc. This paper overviews recent progress in ultra-long distributed fiber-optic static (Brillouin optical time-domain analyzer) and dynamic (phase-sensitive optical time-domain reflectometer) sensing at Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, UESTC. This paper summarizes our work on both basic and application studies.

**Keywords:** fiber optics, fiber-optic sensors, fiber lasers, random lasers

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Pa, 42.55.Wd, 42.55.Zz

**DOI:** [10.7498/aps.66.074207](https://doi.org/10.7498/aps.66.074207)

---

\* Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61290312, 41527805), Innovation Team of Ministry of Education, China (Grant No. IRT1218) and the “111” Project, China (Grant No. B14039).

† Corresponding author. E-mail: [yjrao@uestc.edu.cn](mailto:yjrao@uestc.edu.cn)