

# 激光与光电子学进展

## 基于散射增强光纤的分布式声波传感研究进展

孙琪真<sup>1,2,3\*</sup>, 李豪<sup>1,2</sup>, 范存政<sup>1,2</sup>, 贺韬<sup>1,2</sup>, 闫宝强<sup>1,2</sup>, 陈俊峰<sup>1,2</sup>, 肖翔鹏<sup>1,2</sup>, 闫志君<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>3</sup>华中科技大学无锡研究院, 江苏 无锡 214174

**摘要** 基于相位敏感光时域反射技术的分布式声波传感(DAS)系统可实现大范围分布式的声波探测,近年来,在油气勘探、地质成像、管道安全、周界安防等领域受到研究关注。本文论述了光纤DAS技术的传感原理,分析了单模光纤的衰落机理和性能瓶颈。针对此问题,分别介绍了多种散射增强光纤的增效机理与声波传感性能。进一步,围绕微结构散射增强光纤DAS系统,综述了其近年来的技术与应用进展,并展望了其未来可能的发展方向。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 相敏光时域反射计; 分布式声波传感; 散射增强光纤

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2100001

## Research Progress of Distributed Acoustic Sensing Based on Scattering Enhanced Optical Fiber

Sun Qizhen<sup>1,2,3\*</sup>, Li Hao<sup>1,2</sup>, Fan Cunzheng<sup>1,2</sup>, He Tao<sup>1,2</sup>, Yan Baoqiang<sup>1,2</sup>, Chen Junfeng<sup>1,2</sup>,  
Xiao Xiangpeng<sup>1,2</sup>, Yan Zhijun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>2</sup>National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>3</sup>HUST-Wuxi Research Institute, Wuxi 214174, Jiangsu, China

**Abstract** Fiber optic distributed acoustic sensing (DAS) based on phase sensitive time domain reflectometry can realize large-scale distributed acoustic detection, which has attracted the research attention in many application fields in recent years, such as oil and gas exploration, geological imaging, pipeline safety and perimeter security. In this paper, the sensing principle of fiber optic DAS is discussed, and the fading mechanism and performance bottleneck of single mode fiber DAS are analyzed. To solve these problems, the acoustic sensing mechanisms and performances of various scattering enhanced fibers are introduced. Furthermore, the recent technologies and applications of the microstructured scattering enhanced optical fiber-based DAS system are briefly reviewed, and the possible development directions of DAS technology in the future is prospected.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; phase sensitive optical time domain reflectometry; distributed acoustic sensing; scattering enhanced fiber

### 1 引言

获取介质内部结构和属性是人类认识自然和探索世界的重要方式,可以通过直接测量或间接测量的方式实现。声波是声音的传播形式,可借助环境中的各种介质向不同方向进行传播。因此,声波场携带着丰富的介质信息,通过对声波场传输的测量和追踪,可帮

助我们认识和分析介质内部的属性<sup>[1-3]</sup>。近年来,声波传感技术已被广泛应用于不同尺度的物质属性分析中,如地质结构探测<sup>[4]</sup>、资源勘探<sup>[5]</sup>、结构健康监测<sup>[6]</sup>和周界安防<sup>[7]</sup>等领域。

声波传感器是人们透过声波信息了解介质的重要工具,随着声波检测范围和尺度的增大,对分布式大容量声波传感器的需求也不断扩大。近年来,光纤分布

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-13

通信作者: \*qzsun@mail.hust.edu.cn

式声波传感(DAS)技术<sup>[8]</sup>由于具有抗电磁干扰、体积小重量轻、耐恶劣环境、灵敏度高优点,已成为当下的研究热点。光纤 DAS 技术是一种利用光纤瑞利后向散射光信息实现光纤沿线声波探测的新技术,其中的无源光纤兼具传输信息和传感介质的双重作用。常见的高灵敏光纤 DAS 系统大多基于相位敏感光时域反射计( $\varphi$ -OTDR),由于瑞利后向散射光相位变化与作用在光纤上的声波呈线性关系,通过解调光相位变化即可线性获取声波信号<sup>[9]</sup>。

常见的 DAS 系统通常采用普通单模光纤(SMF)作为传感光纤,然而其瑞利后向散射光极其微弱,传感光信号信噪比较低,进而导致基于  $\varphi$ -OTDR 的 DAS 系统解调相位信号信噪比较低<sup>[10]</sup>。此外,由于注入光纤的是窄线宽高相干的激光脉冲,一个脉冲内瑞利散射点之间的干涉会产生干涉相消,导致后向散射光相干衰落的出现,进而在传感光纤上形成“死区”<sup>[11]</sup>。因此,基于普通单模光纤的 DAS 系统相位解调信噪比和灵敏度较差,难以满足介质内部微弱声波信号的高精度探测。其次,传感光信号不稳定,单个传感通道测量低噪存在较大波动,长时间多次测量的一致性较差。同时由于光强衰落的影响,多个传感通道之间的测量一致性也较差,难以满足分析介质内部属性时高保真追踪声波传输过程的要求。近年来,也有诸多针对单模光纤 DAS 系统相干衰落等噪声的抑制技术,但同时增加了系统的复杂度和成本,并带来了响应频带、传感距离等的牺牲<sup>[12-18]</sup>。因此,研究适合于 DAS 技术的新型传感光纤及分布式声波探测机理,是实现大尺度、高精度、高一一致性的声波探测的有效路径。

本文从散射增强特种光纤角度出发,分析了微结构散射增强光纤的散射增强机制和衰落抑制机理,介绍了多种光纤的结构设计及增效机理。综述了近年来基于微结构散射增强光纤的 DAS 系统在低频噪声补偿、偏振衰落抑制和响应频带扩展等方面的研究进展,以及在油气资源勘探、地质成像、管道安全和周界安防等应用方面的重要进展,并对 DAS 技术未来可能的发展方向进行了展望。

## 2 传感原理

### 2.1 光纤 DAS 的基本原理

光纤 DAS 是通过测量由光纤轴向应变的改变引起的光相位变化实现声波感知的<sup>[19]</sup>。当声波作用在光纤上时,会使光纤在轴向产生应变,从而改变光纤中瑞利散射信号的相位。根据光弹效应,光纤的轴向应变和光相位改变具有如下的线性关系

$$\Delta\varphi = \beta \left[ 1 - \frac{n^2}{2} (P_{12} + 2P_{11}) \right] \Delta L, \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为光的传播常数; $n$ 为光纤折射率; $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 为光纤的张量系数; $\Delta L$ 为光纤长度的改变量,由  $\Delta L = \epsilon_s l$  得到,其中  $\epsilon_s$  为光纤的轴向应变、 $l$  为光纤长度。这样一来,如图 1 所示,只要提取得到探测光在 AB 两点的相位差的变化,便可得知 AB 两点之间光纤段的轴向应变变化,最终实现声波和振动的定量感知,而光纤不同位置处的相位失真解调则是实现高性能 DAS 的关键所在。

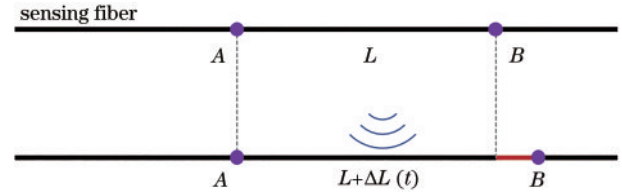


图 1 基于光相位的声波检测原理

Fig. 1 Principle of acoustic wave detection based on optical phase

瑞利散射为弹性散射,不会产生任何非线性效应,且不同位置的瑞利散射光可通过反射回光纤发射端的时间进行区分,因此基于光纤瑞利散射相位提取技术——相位敏感光时域反射技术( $\varphi$ -OTDR)被广泛应用于 DAS 中<sup>[20-21]</sup>。2011 年,利用外差相干探测技术,瑞利散射信号的相位首次被成功解调<sup>[22]</sup>。外差相干探测的方案如图 2 所示,其本振光和 A 点的瑞利散射信号可分别表示为

$$E_{LO} = A_{LO} \exp(j2\pi ft + j\varphi_{LO}), \quad (2)$$

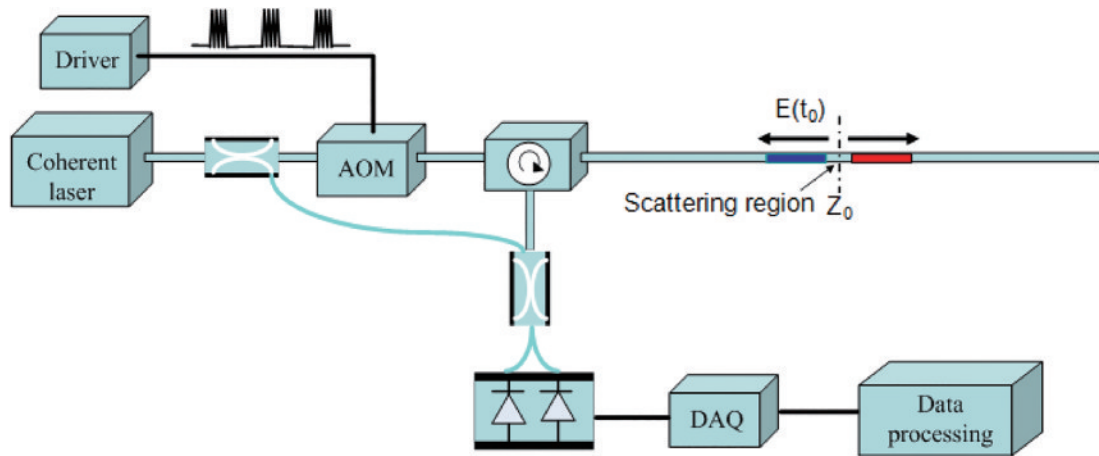
$$E_A = A_A \exp[j2\pi(f + \Delta f)t + j\varphi_A], \quad (3)$$

式中: $A_{LO}$ 和  $A_A$  分别为本振光和 A 点瑞利散射信号的振幅; $f$  为探测光的频率; $\Delta f$  为脉冲调制器的移频; $\varphi_{LO}$  和  $\varphi_A$  分别为本振光和 A 点瑞利散射信号的相位。这两个信号经过 3 dB 耦合器耦合后相遇并发生干涉,干涉信号在平衡光电探测器(BPD)光敏表面被探测,BPD 探测得到的光强可以表示为

$$I \propto 2E_{OL} E_A \cos(\Delta ft + \varphi'_A), \quad (4)$$

式中: $\varphi'_A = \varphi_A - \varphi_{LO}$  为两信号的相位差。然后利用数字相干同相正交(IQ)解调算法,即可得到相位差  $\varphi'_A$ 。同样地,通过解调本振光与 B 点瑞利散射的干涉信号,可以得到相位差  $\varphi'_B$ 。通过对相位进行空间差分,最终可以得到 AB 两点的相位差  $\varphi_{AB}$ ,从而线性表征光纤的轴向应变,并最终实现声波和振动的量化感知。

除了基于外差相干探测方案,相关领域研究人员还提出了各种其他相位解调方案,如基于  $3 \times 3$  耦合器的相位解调方案<sup>[23]</sup>、相位生成载波(PGC)方案<sup>[24]</sup>、基于线性扫频脉冲的相位解调方案<sup>[25]</sup>等,均能实现分布式的光相位解调。

图 2 典型外差相干探测方案<sup>[22]</sup>Fig. 2 Typical heterodyne coherent detection scheme<sup>[22]</sup>

## 2.2 普通单模光纤 DAS 的局限性

由于具有分布式探测、高空间分辨率、高灵敏度等优势,普通单模光纤 DAS 技术已经在地质监测、管线监测、石油勘探等领域得到了应用。但是,这种技术仍然有干涉衰落、信号一致性差等局限性,原因分析如下。

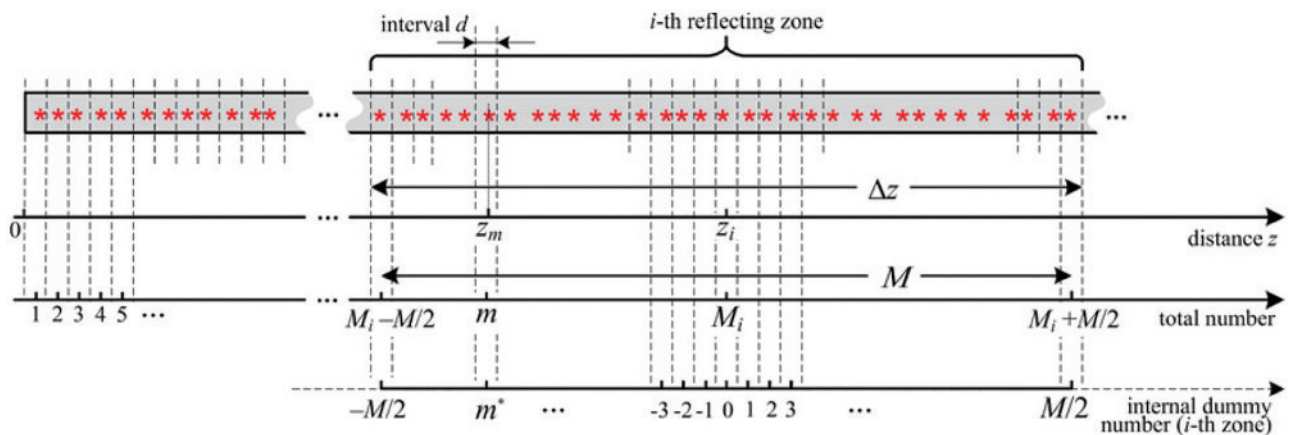
当探测脉冲的脉宽足够窄时,2.1 节中 AB 两点的瑞利散射信号可以根据瑞利散射光的到达时间获得。实际上,由于探测光为高相干度激光,发射的探测脉冲有一定的脉宽,脉宽内的不同散射点的瑞利散射光信号具有相干性,此时只能获得 A 点、B 点附近一段光纤瑞利散射信号之间的干涉结果。由于光纤制备时的不均匀掺杂,瑞利散射的干涉现象具有一定的随机性,这会对相位解调性能产生影响。为了准确地描述普通单模光纤的瑞利散射现象,研究人员建立了普通光纤的瑞利散射模型<sup>[26]</sup>。

瑞利散射模型如图 3 所示,首先,将单模光纤离散化,将由于纤芯中杂质的不均匀分布看作波长量级大小为  $d$  的一系列等效瑞利散射点 (ERSP),分别编号为  $1, 2, 3, \dots, M$ , 每个后向散射系数和散射点的位置可用

$(a_m, z_m)$  来表示,即第  $m$  个散射点在  $z_m$  处,其反射率为  $a_m$ 。由于等效散射点可以看作由更小尺度的散射点叠加而成,所以其位置可表示为  $z_m = md + \Delta d$ , 其中  $\Delta d$  为在  $\left[-\frac{d}{2}, \frac{d}{2}\right]$  内的均匀分布,而其反射率  $a_m$  满足瑞利分布,散射强度需要匹配光纤的损耗系数。根据以上分析,在第  $i$  时刻接收到的瑞利散射信号可以表示为

$$E_i = \sum_{z_{i1} < z_m < z_{i2}} A a_m \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2n z_m\right), \quad (5)$$

式中:  $n$  为光纤有效折射率;  $A$  为入射光功率;  $z_{i1}$ 、 $z_{i2}$  和脉冲宽度有关,其满足  $z_{i2} - z_{i1} = Wc/2n$ , 其中  $W$  为探测脉冲的脉宽,  $c$  为真空中的光速。式(5)表示在  $i$  时刻接收到的信号为一个脉冲内瑞利散射的光场叠加。由于等效散射点位置  $z_m$  具有随机性,每个等效散射点瑞利散射光的相位也在  $[0, 2\pi]$  的范围内随机分布。当一个脉冲内的等效散射点相位的一致性较高时,脉冲内光场干涉表现为干涉相长,此时信号光强  $|E_i|$  较强。相反,当一个脉冲内的等效散射点相位的一致性

图 3 普通光纤的瑞利散射模型<sup>[26]</sup>Fig. 3 Rayleigh scattering model of the standard optical fiber<sup>[26]</sup>



较差时,脉冲内干涉表现为干涉相消,此时信号光强  $|E_i|$  变弱,导致信噪比恶化。当信噪比恶化到一定程度时,干涉信号便无法探测,单模光纤 DAS 会在此处光纤产生探测盲区,这种现象被称为“干涉衰落”。此外,等效散射点的反射率  $a_m$  也存在随机性,这使得不同时刻接收到的信号等效位置不同。以式(5) $i$ 时刻接收到的信号为例,由于式(5) $i$ 时刻的散射信号为多个复数的叠加,其强度  $Aa_m$  为复数的模,和位置  $z_m$  相关的相位  $j\frac{2\pi}{\lambda}\cdot 2nz_m$  为复数的幅角。所以,式(5)可表示为多个矢量叠加的形式,当前端等效散射点的瑞利散

射强度较强时,如图 4 所示, $i$ 时刻接收到信号的可以看作某个靠近  $z_{i1}$  位置的瑞利散射,当后端等效散射点的瑞利散射强度较强时, $i$ 时刻接收到信号的可以看作某个靠近  $z_{i2}$  位置的瑞利散射。由于等效散射点的反射率  $a_m$  在不同时刻具有随机性,等效散射位置也会随着时间发生变化,这一不稳定性也会表征到最终恢复的相位中,导致信号的时间一致性降低。

综上所述,正是由于普通单模光纤瑞利散射的强度和位置均存在随机性,导致了 DAS 存在干涉衰落、信号时间一致性差的问题,难以满足分析介质内部属性时高保真追踪声波的需求。

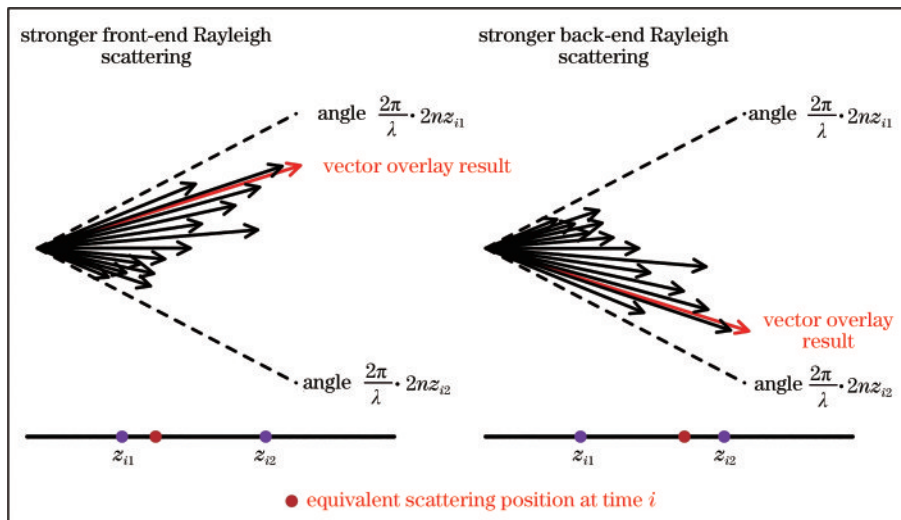


图 4 脉冲内等效散射位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of equivalent scattering position in a pulse interference

### 3 散射增强特种光纤及其 DAS 技术的研究进展

为了解决单模光纤 DAS 干涉衰落、一致性差的问题,相关研究学者进行了一系列的研究<sup>[13, 27-30]</sup>。其中,对光纤进行改进来增强光纤后向散射是非常有效的方式,包括连续散射增强光纤和通过在光纤中引入微结构形成的离散散射增强光纤。此外,针对微结构光纤的特点,研究者们还设计和改进了与其匹配的光学方案,以提升 DAS 系统的性能。

#### 3.1 基于连续散射增强光纤的 DAS 技术

连续散射增强通过增强整条光纤的瑞利散射来实现相干衰落的抑制,其本质是通过在光纤进行掺杂或者刻写连续光栅等方式,增强 2.2 节中模型所述等效散射点的散射强度  $a_m$ ,从而提升干涉叠加后的光强度,最终实现干涉衰落的抑制。

2017 年,美国 OFS 实验室基于相位掩模法通过紫外曝光在单模光纤中刻写连续布拉格光栅,使得光纤后向散射强度增加了 14 dB,其反射谱如图 5(a)所示。其与英国 Fotech 公司合作,将连续散射增强光纤用于 DAS 系统中,在 1 km 的连续散射增强光纤上将信噪

比提升了 15 dB<sup>[31-33]</sup>。这种方式有效地提升了信噪比,但是布拉格光栅反射谱带宽较窄,且反射波长会随着温度和应力漂移,当外界环境出现变化时可能导致入射光波长和光栅反射波长不匹配,从而失去散射增强的效果,所以这种光纤的适用范围有限,难以用于高温、高压等特殊环境。除了刻写连续光栅,改变光纤掺杂也是一种提高瑞利散射强度的方法。2018 年,俄罗斯科研团队使用氮掺杂光纤作为传感光纤,将声波探测的信噪比提升了 3 dB<sup>[34]</sup>。同年中国科学院半导体研究所的研究团队使用铟掺杂光纤进行分布式光纤传感,如图 5(b)、(c)所示,采用相位生成载波的光学方案,使得相位噪声降低了 14 dB,在 1.9 km 的光纤上实现了高信噪比的声波测量<sup>[35]</sup>。

对于以上两种连续散射增强的方案,虽然可以有效地提高散射强度,抑制相干衰落噪声,但是增强光纤散射导致了光的损耗成倍增大,大大限制了探测距离。以光纤掺杂方案为例,若将前端信噪比提升 10 dB,则需要将光纤瑞利散射提高 10 倍,这使得可探测距离缩减为 1/10。更重要的是,对光纤进行连续散射增强并没有从根本上改变脉冲内光干涉的本质,仍然不能消除干涉衰落现象。

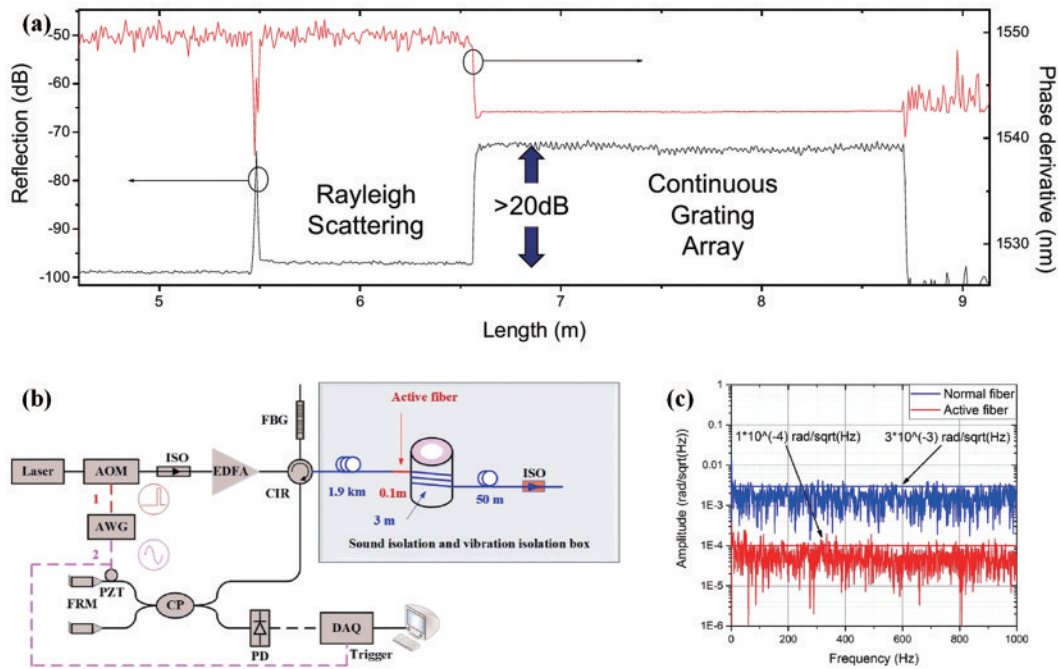


图 5 典型连续散射增强光纤方案<sup>[31-33]</sup>。(a)典型连续散射增强光纤的后向反射信号分布;(b)改变光纤掺杂提高瑞利散射方案;(c)高瑞利散射光纤散射频谱

Fig. 5 Typical scheme of continuous scattering enhanced optical fiber<sup>[31-33]</sup>. (a) Backscattering signal distribution of typical continuous scattering enhanced fiber; (b) scheme for improve the Rayleigh scattering through changing the fiber doping; (c) scattering spectrum of high Rayleigh scattering fiber

### 3.2 离散散射增强光纤的理论分析

除了连续散射增强,更多的研究者将目光投向了离散散射增强光纤在 DAS 上的应用。这种光纤如图 6 所示,其本质为每隔一段距离,对 2.2 节模型中的一个等效散射点的散射强度进行增强,这种散射增强点(SEP)的强度远远大于普通的等效散射点,这样一来,包含散射增强点的瑞利散射干涉光可表示为

$$E_i = \sum_{z_{i1} < z_m < z_{i2}, z_m \neq z_j} A a_m \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2nz_m\right) + A a_k \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2nz_k\right), \quad (6)$$

式中:第  $k$  个等效散射点为散射增强点。在式(6)中,当散射增强点的散射强度远大于普通等效散射点时,公式前一项可以忽略,这说明瑞利散射信号仅由散射增强点决定,意味着离散散射增强克服了单模光纤瑞利散射强度和位置的随机性。根据 2.2 节中的分析,此方案从根本上解决了单模光纤 DAS 干涉衰落和信号一致性差的问题,通过 2.1 节中的相位解调方法,便可以准确地得到两个散射增强点之间的相位差,获得高稳定性、高信噪比的声波信息。

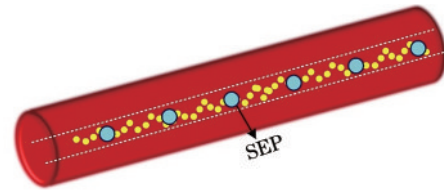


图 6 离散散射增强光纤示意图

Fig. 6 Schematic diagram of discrete scattering enhanced fiber

为了进一步验证其有效性,对离散增强散射模型及单模光纤散射模型进行了理论分析,按照表 1 所示参数仿真,在光纤 3 m、7 m、11 m 处设置了三个散射增强点,图 7(a)、(b)为仿真得到的散射强度分布结果,可以看出离散增强光纤完全抑制了信号幅值的随机变化和干涉衰落。为了探究离散增强光纤对相位噪声的抑制效果,分别求解单模光纤和散射增强光纤 3 m 和 7 m 两点之间的相位差,其结果如图 7(c)所示。在 100 次的重复仿真中,由于单模光纤等效散射点为随机分布,其相位也为随机分布。而散射增强光纤解调相位不受普通等效散射点的随机分布影响,主要由散射增强点的位置决定,大大抑制了相位噪声。

表 1 离散增强散射模型参数

Table 1 Parameters of discrete enhanced scattering model

Fiber length / m	Spacing of SEP / m	Pulse width / ns	Spacing of SEP $d$ / $\mu\text{m}$	Repeat times
13	4	20	1	100

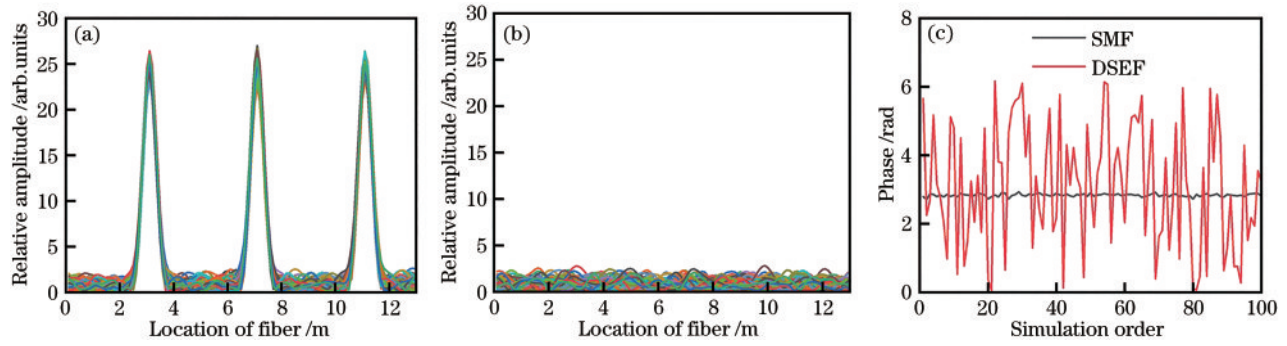


图 7 离散增强散射模型仿真结果。(a) 离散增强光纤反射分布;(b) 单模光纤反射分布;(c) 离散增强光纤和单模光纤的相位解调结果  
Fig. 7 Simulation results of discrete enhanced scattering model. (a) Reflection distribution of discrete enhanced fiber; (b) reflection distribution of single mode fiber; (c) phase demodulation results of discrete scattering enhanced fiber and single mode fiber

### 3.3 离散散射增强光纤的制备与实现

目前离散散射增强光纤的实现方式主要分为两类,一种是通过在光纤中引入周期性的超弱布拉格光栅(UWFBG)阵列<sup>[29, 36]</sup>实现离散散射增强,另一种是在光纤中引入局部无色弱反射阵列实现离散散射增强<sup>[37-39]</sup>。

UWFBG 通常是使用紫外光<sup>[40-42]</sup>或飞秒激光<sup>[43-44]</sup>对光纤折射率调制,使其形成永久性的周期变化,从而实现特定波长光的后向反射,其最经典的制备系统如图 8(a)所示<sup>[45]</sup>。在光纤的拉丝过程中,通过严格的动

力控制,使用相位掩模版在光纤中实现 UWFBG 阵列的刻蚀,其制备结果如图 8(b)所示<sup>[46]</sup>,其散射增强阵列散射率远高于单模光纤。但是,UWFBG 作为一种布拉格光栅,其具有对温度和应力敏感的特性。当环境的温度和应变发生改变时,UWFBG 的反射波长会产生漂移<sup>[47-48]</sup>,如图 8(c)所示,由于 UWFBG 的带宽较窄,在高温、低温、高压等特殊环境中,UWFBG 的反射谱和探测光波长出现失配现象,UWFBG 反射会退化为瑞利散射,最终产生传感盲区。UWFBG 的这一特点阻碍了其在井下、水下等特殊环境下的应用。

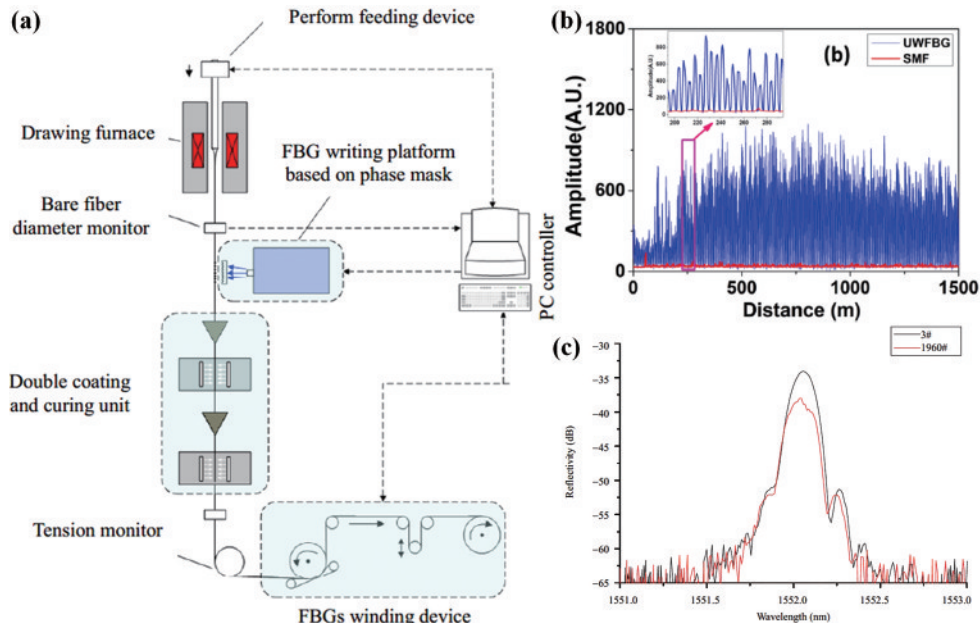


图 8 典型 UWFBG 制备方法。(a) 在线 UWFBG 制备系统<sup>[45]</sup>; (b) UWFBG 阵列的 OTDR 测量结果<sup>[46]</sup>; (c) UWFBG 的反射光谱<sup>[45]</sup>  
Fig. 8 Typical UWFBG preparation method. (a) Online UWFBG preparation system<sup>[45]</sup>; (b) OTDR measurement results of UWFBG array<sup>[46]</sup>; (c) reflection spectrum of UWFBG<sup>[45]</sup>

近几年,局部无色弱反射阵列的增强方案也被用于 DAS 中<sup>[49-50]</sup>。为了制备具有更强普适性的离散散射增强阵列,华中科技大学团队提出了一种无色反射点的微结构光纤制备方法,制备系统如图 9(a)所示<sup>[51]</sup>,其不借助相位掩模版,直接通过紫外光曝光在光纤中引入局部折射率改变。其制备结果如图 9(b)~(d)所

示<sup>[52]</sup>,实现了 5 m 间隔的 15 dB 离散散射增强阵列,其微结构光纤的带宽覆盖了整个放大自发辐射(ASE)谱宽,当温度变化时,微结构的散射强度极为稳定。此外,英国南安普敦大学等单位也利用飞秒激光实现了弱反射阵列的制备<sup>[39]</sup>,其制备系统、方案、结果如图 10 所示。相比于 UWFBG 刻写时只能使用相位掩模板



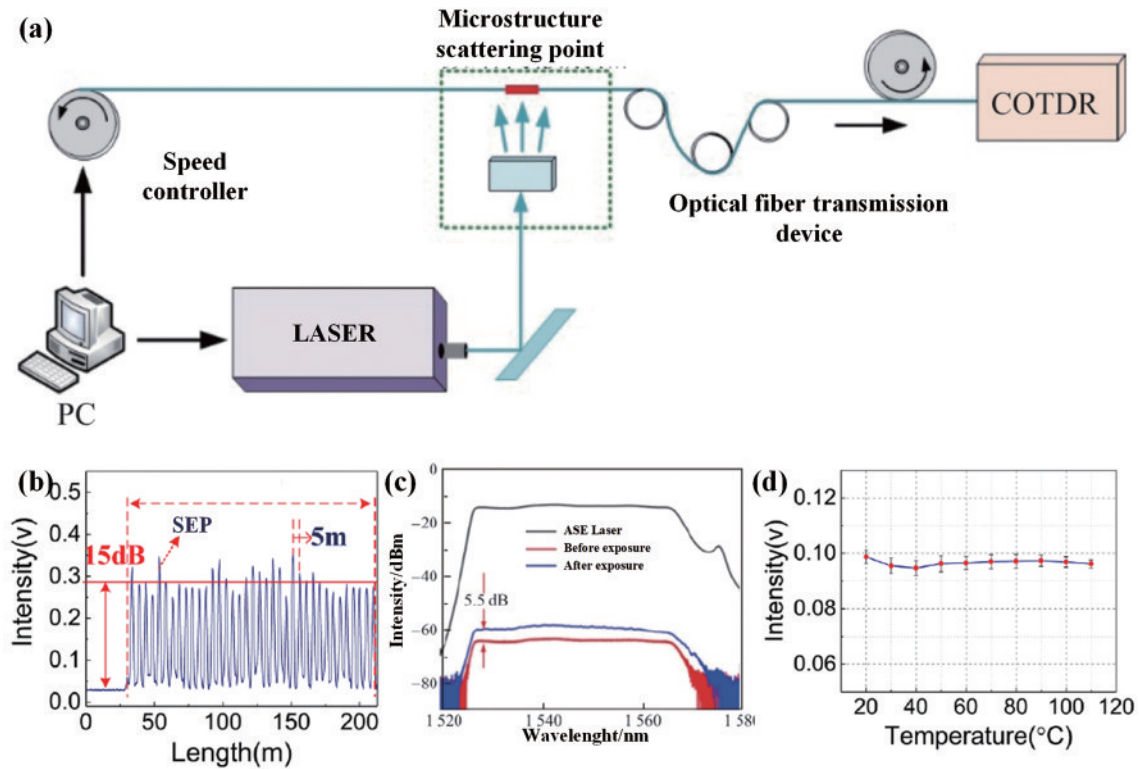


图9 基于紫外曝光的无色微结构阵列制备方法。(a)自动化无色微结构制备系统<sup>[50]</sup>；(b)无色微结构阵列的OTDR测量结果<sup>[52]</sup>；(c)无色微结构阵列的光谱<sup>[50]</sup>；(d)无色微结构阵列的温度稳定性<sup>[52]</sup>

Fig. 9 Preparation method of colorless microstructure array based on UV exposure. (a) Automatic colorless microstructure preparation system<sup>[50]</sup>; (b) OTDR measurement results of colorless microstructure array<sup>[52]</sup>; (c) spectra of colorless microstructure arrays<sup>[50]</sup>; (d) temperature stability of colorless microstructure arrays<sup>[52]</sup>

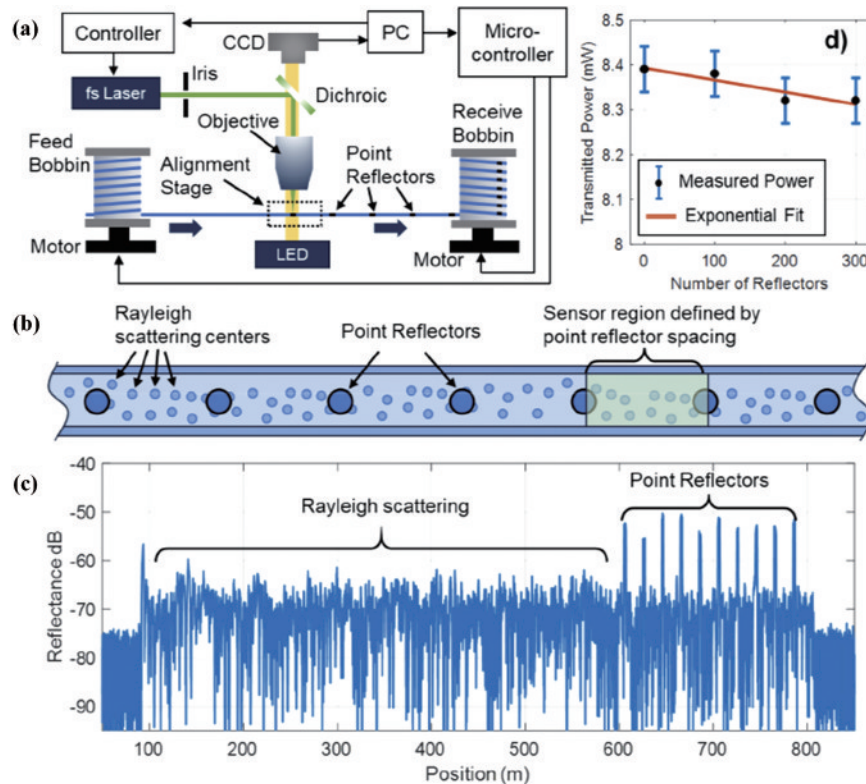


图10 基于飞秒激光的弱反射阵列制备方法<sup>[39]</sup>。(a)弱反射阵列制备系统；(b)弱反射阵列制备示意图；(c)弱反射阵列的OTDR测量结果；(d)弱反射阵列的透射功率随反射器数量的变化。

Fig. 10 Preparation method of weak reflection array based on femtosecond laser<sup>[39]</sup>. (a) Weak reflection array preparation system; (b) schematic diagram of weak reflection array preparation; (c) OTDR measurement results of weak reflection array; (d) change of transmitted power with the number of reflectors.

等途径聚焦,反射带宽受限,在光纤中直接刻写弱反射点则没有波长选择性,避免了温度和应变带来的影响<sup>[53]</sup>。

### 3.4 离散散射增强光纤 DAS 的研究进展

如图 11 所示,研究人员前期主要关注如何将离散散射增强光纤用于各种 DAS 方案中。2015 年,山东省科学院激光研究所将 UWFBG 用于基于 3×3 耦合器

解调的 DAS 中,并将其用于水声测试<sup>[54]</sup>。随后,华中科技大学等多家科研机构先后将离散散射增强光纤用于双脉冲、相干探测、PGC 解调等各种方案的 DAS 中<sup>[29, 38, 49, 55-58]</sup>。近年来,人们更多关注的是利用离散散射增强光纤的优势对 DAS 方案针对性地改进,从低频相位漂移补偿、偏振衰落抑制、脉冲宽度压缩、系统响应带宽扩展等多个维度提升 DAS 系统性能。

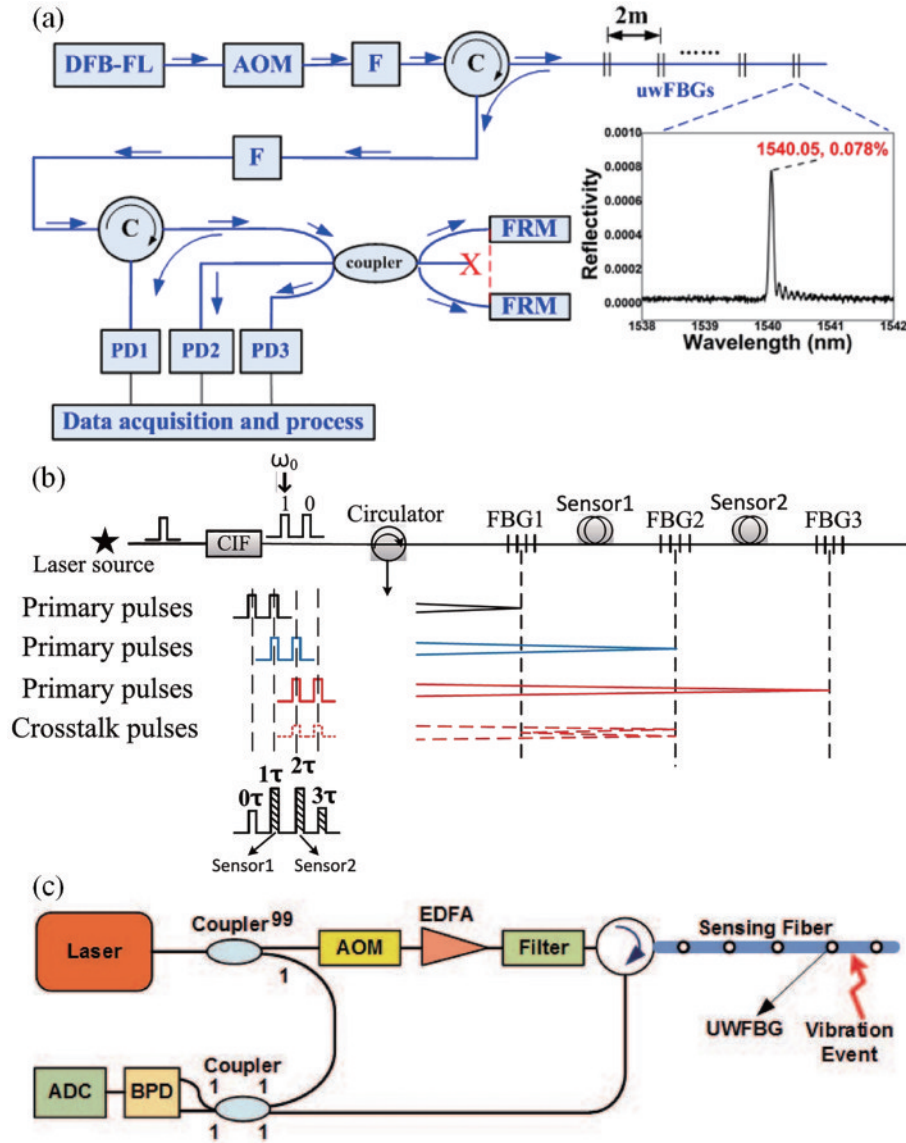


图 11 基于 UWFBG 的典型 DAS 方案。(a) 3×3 耦合器方案<sup>[54]</sup>; (b) PGC 方案<sup>[55]</sup>; (c) 相干外差方案<sup>[29]</sup>

Fig. 11 Representative DAS scheme based on UWFBG. (a) 3×3 coupler scheme<sup>[54]</sup>; (b) PGC scheme<sup>[55]</sup>; (c) heterodyne coherent detection scheme<sup>[29]</sup>

#### 3.4.1 低频相位漂移补偿技术

离散散射增强光纤 DAS 系统信号一致性好,且不受瑞利随机散射的影响,使其有了极低频探测的潜力。然而,在 DAS 系统中,激光器相位的低频漂移和外界温度的缓慢变化会对系统带来较大的低频噪声,限制了低频探测的精度<sup>[59]</sup>。激光器相位漂移可通过辅助干涉仪进行补偿,如图 12(a)所示,通过辅助干涉仪实时测量激光器的相位噪声,在测量结果中补偿,实现了低

频噪声的抑制。上海交通大学研究团队通过这种方式在 10 Hz 的频率上实现了  $3.84 \text{ } \mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[60-61]</sup> 的应变分辨率。华中科技大学研究团队则是利用无色散射增强光纤的特性提出了参考光纤补偿方案,其方案如图 12(b)所示,可同时对激光器漂移和温度变化进行补偿,在 0.01 Hz 的频率上实现了  $0.57 \text{ } \mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$  的最小可测应变<sup>[62]</sup>,在 10 Hz 的频率上实现了  $3.4 \text{ } \mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$  的最小可



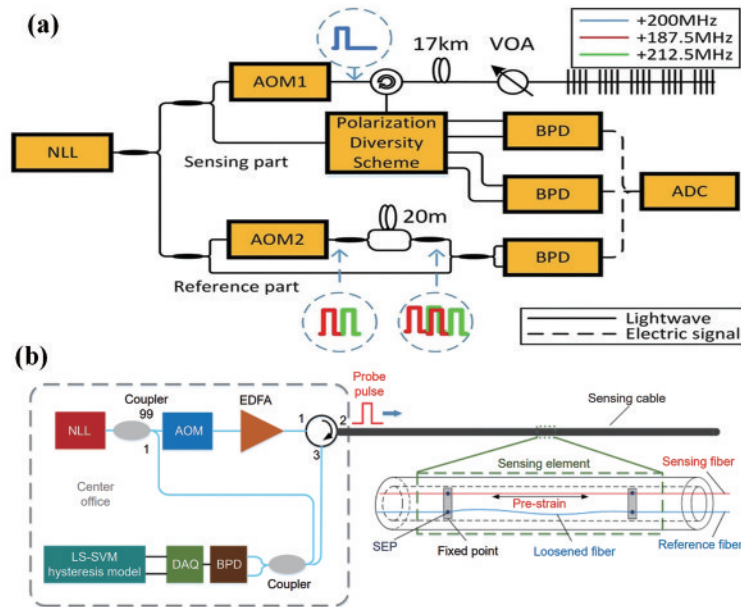


图 12 离散散射光纤 DAS 的低频噪声抑制方案。(a) 辅助干涉仪补偿<sup>[60-61]</sup>; (b) 参考光纤补偿<sup>[62]</sup>

Fig. 12 Low frequency noise suppression scheme for discrete scattering fiber DAS. (a) Auxiliary interferometer compensation<sup>[60-61]</sup>; (b) reference fiber compensation<sup>[62]</sup>

测应变<sup>[50]</sup>。进一步地,华中科技大学团队在解调中引入最小二乘-支持向量机(LS-SVM)算子,追踪和补偿温度的迟滞效应,实现了 0.001 Hz 频带处的声波高精度测量<sup>[63]</sup>。

### 3.4.2 偏振衰落抑制技术

在 DAS 中,信号衰落分为干涉衰落和偏振衰落两种。不同于单模光纤 DAS 中干涉衰落更加影响信号质量,在离散散射增强光纤 DAS 系统中,由于相干衰落被完全抑制,偏振随机衰落成为了亟须解决的问题<sup>[64]</sup>。偏振随机衰落是两束干涉光偏振状态随机变化导致的,当两束干涉光偏振方向平行时,干涉光信号最大,相位噪声最小,当两束干涉光偏振方向正交

时,干涉光强度为 0,相位信息完全被噪声淹没。为了解决这一问题,南京大学研究团队对双波长 DAS 方案进行改进,如图 13 所示,采用偏振复合双脉冲作为探测脉冲,实现了偏振噪声的抑制<sup>[64-65]</sup>。对于相干探测 DAS 方案,华中科技大学团队利用偏振分束器将反射光分为两个正交的偏振态分别与本振光干涉,使得偏振随机噪声降低 9.5 dB<sup>[66]</sup>。但是,这种方案当本振光和偏振分束器的偏振状态不匹配时,仍有可能出现衰落。为了解决这一问题,华中科技大学团队通过发射双波长探测脉冲,利用不同波长参量偏振状态随机机的特性,大大降低了偏振衰落几率,使得偏振噪声降低 19.2 dB<sup>[67]</sup>。

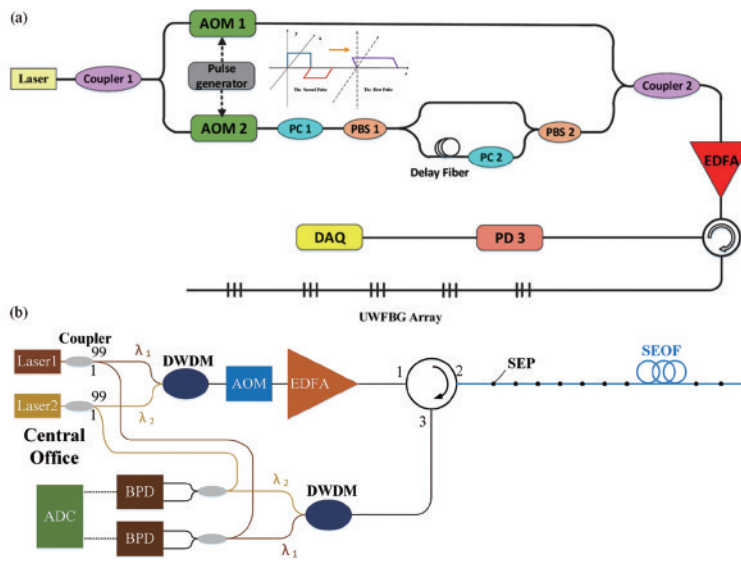


图 13 代表性偏振噪声抑制方案。(a) 正交偏振法<sup>[64-65]</sup>; (b) 多参量法<sup>[67]</sup>

Fig. 13 Representative scheme for polarization noise suppression. (a) Orthogonal polarization scheme<sup>[64-65]</sup>; (b) multi-parameter scheme<sup>[67]</sup>

### 3.4.3 脉冲宽度压缩技术

在 DAS 系统中, 散射增强点的间隔确定了系统的分辨率, 也限制了探测脉冲的宽度。假设散射增强点的间隔为  $d$ , 则探测脉冲被限制小于  $2dn/c$  (其中  $n$  为光纤折射率,  $c$  为真空中光速)。在雷达系统中, 通常发射较长的探测脉冲并在接收端对脉冲进行压缩, 从而在保证分辨率的前提下得到高信噪比的信号, 其常用

的方案有脉冲线性扫频、脉冲编码两种<sup>[68-70]</sup>。这些技术也被研究人员借鉴运用在离散散射增强光纤 DAS 系统中。上海交通大学的研究团队采用发射扫频脉冲, 接收端通过匹配滤波压缩脉冲的方案, 在 500~2500 Hz 实现了  $-93.16 \text{ dB re rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  的噪声水平<sup>[71-72]</sup>。电子科技大学团队将脉冲编码技术用于基于 UWFBG 的 DAS 系统中, 将系统信噪比提升了 6.9 dB<sup>[73]</sup>。

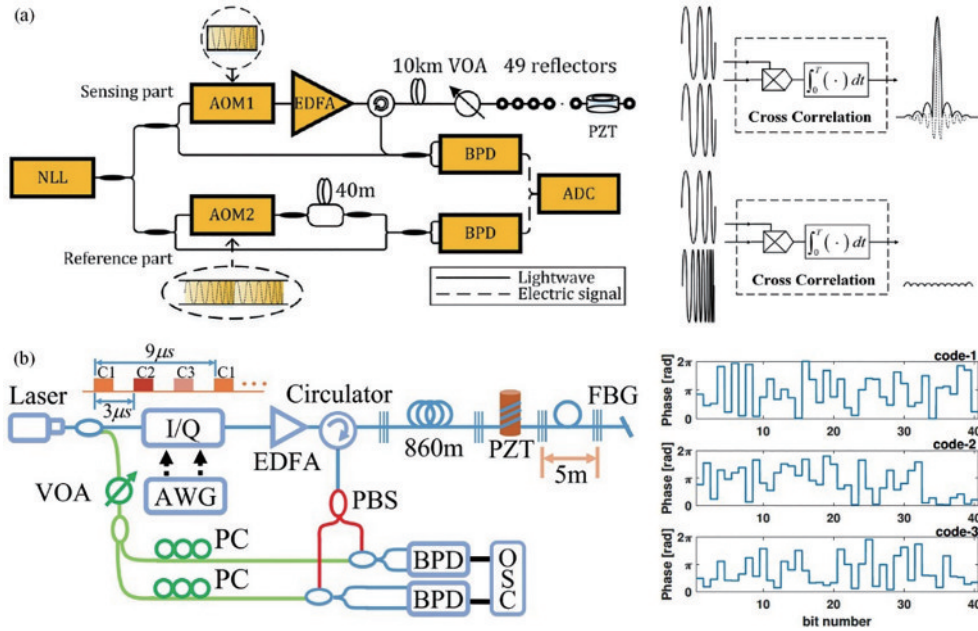


图 14 代表性脉冲宽度压缩方案。(a) 扫频脉冲方案<sup>[71-72]</sup>; (b) 脉冲编码方案<sup>[73]</sup>

Fig. 14 Representative scheme for pulse width compression. (a) Swept frequency pulse scheme<sup>[71-72]</sup>; (b) pulse coding scheme<sup>[73]</sup>

### 3.4.4 采样频率拓展技术

在 DAS 系统中, 系统采样率主要受限于传感光纤的长度。当系统向光纤发射探测脉冲后, 需要保证脉冲传至最远端的瑞利散射信号反射回接收端后才能发射下一个脉冲, 否则将产生串扰。但是, 在铁路安全检测、电网局部放电探测等应用领域中, 需要兼顾长距离

和高频率探测。解决这一问题的思路为发射多个探测光并行, 并通过某一特征将其区分, 以避免串扰。南京大学研究团队通过向光纤中发射频率不同的脉冲, 通过脉冲的频率不同进行区分, 在 330 m 的光纤上实现了 440 kHz 的采样率, 将距离带宽积扩展了 3 倍<sup>[74]</sup>。华中科技大学研究团队提出了时隙复用扩频方案, 如图 15

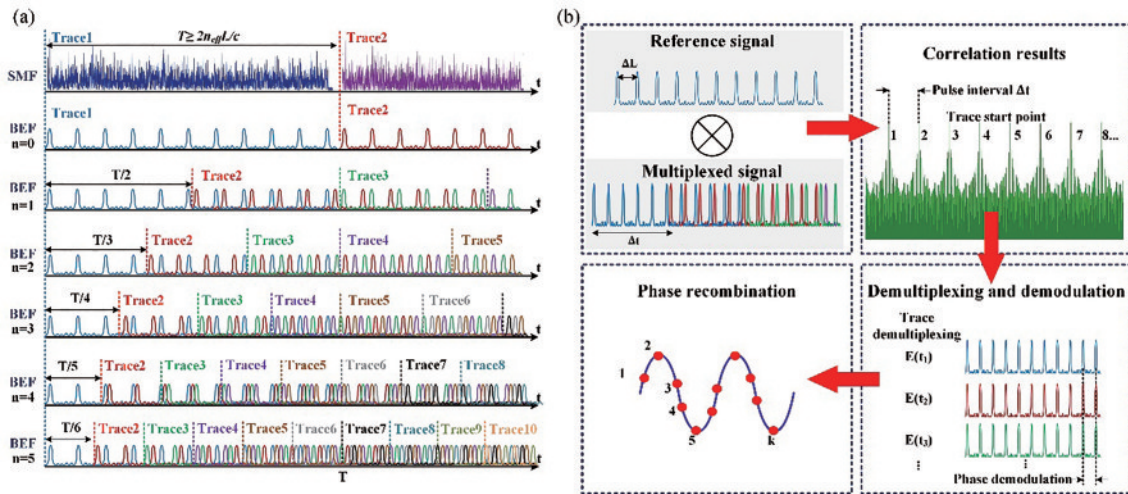


图 15 时隙复用方案<sup>[75]</sup>。(a) 原理; (b) 解调算法

Fig. 15 Time-slot multiplexing scheme<sup>[75]</sup>. (a) Principle; (b) demodulation algorithm



所示,在光纤的 UWFBG 之间的空隙中插入其他脉冲,最终在 1020 m 的光纤上实现了 300 kHz 的采样率,将距离带宽积扩展了 6 倍<sup>[75]</sup>。

#### 4 散射增强特种光纤及其 DAS 技术的应用进展

随着基于微结构散射增强光纤 DAS 系统的不断完善与发展,研究者们已开展了其在多个工程领域的应用探索,包括地质和资源勘探、结构健康监测和水下探测等。

##### 4.1 地质和资源勘探

垂直地震剖面法(VSP)是常用的一种石油勘探地震观测方法。传统的 VSP 采用点式电子检波器,其受高温高压等恶劣环境影响,大规模测试效率较低。随着 DAS 技术的发展,光纤测井已经成为时下研究热点。特别地,微结构散射增强光纤具有稳定的后向散射信号,高信噪比的传感光信号使得相位解调稳定性

较高,进而确保地震波较高的保真度和多道信号一致性。

华中科技大学研究团队利用自制的微结构光纤 DAS 系统进行了 walkaway VSP 实验<sup>[76]</sup>。将微结构光纤垂直布设于测试井中,在地面人为引入炸药震源产生地震波,其沿着地层进行传输产生直达波和反射波。图 16 为在“0 偏”位置和在 2.5 km 远“非 0 偏”位置所记录到的 VSP 结果图。图 16(a)为“0 偏”时微结构光纤 DAS 系统记录的地震波传输图,将其局部放大为图 16(b),可观察到清晰的 p 波和 s 波直达波传递,多道信号波峰波严格对应,仅存在由传递时间带来的相位差,证明了微结构光纤 DAS 系统测量的高度一致性。此外,如图 16(c)所示,对于 2.5 km 远的“非 0 偏”信号,微结构光纤 DAS 同样能记录到信噪比较高的直达波和反射波。基于微结构光纤的 DAS 系统拥有信噪比高、信号一致性高以及高可靠性的优势,可成为石油资料采集高效快速可靠的工具,推进资源勘探的智能化进程。

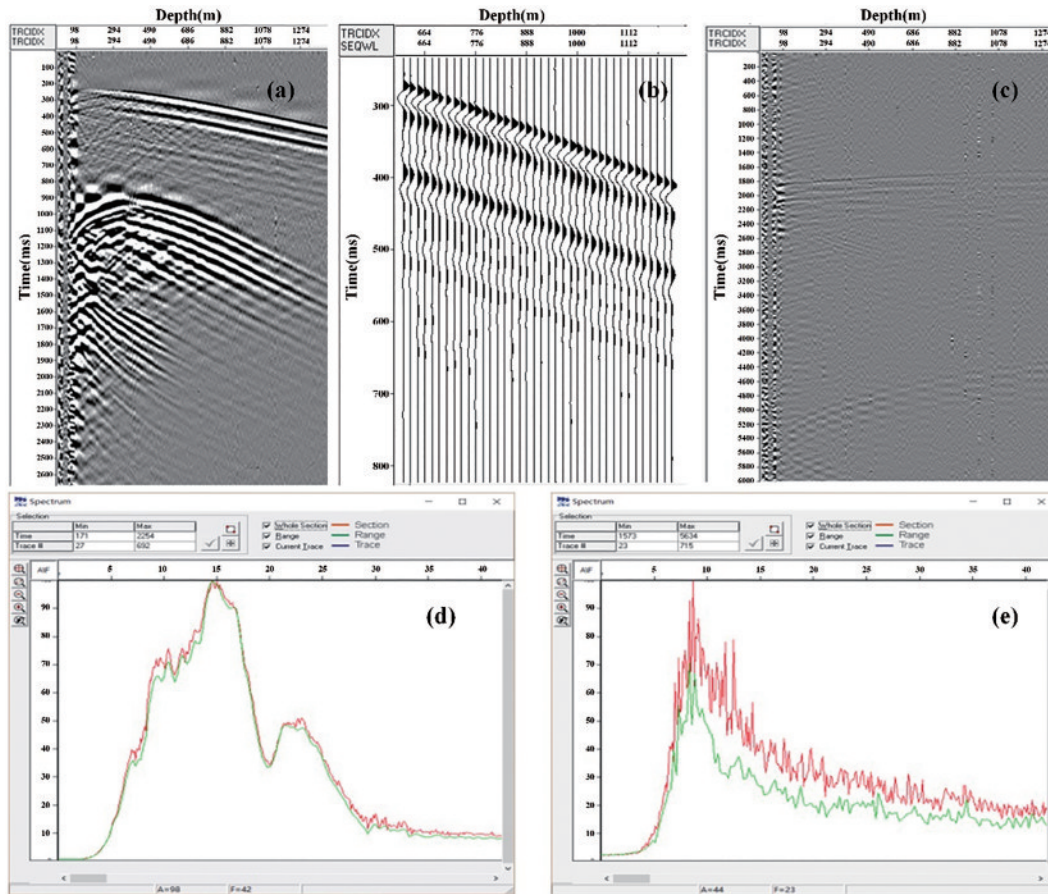


图 16 微结构光纤 DAS 系统 VSP 测试结果。(a)“0 偏”测试结果; (b)信号一致性示意图; (c)“非 0 偏”测试结果; (d)“0 偏”频谱图; (e)“非 0 偏”频谱图<sup>[76]</sup>

Fig. 16 VSP test results of micro structure fiber DAS system. (a) “Zero bias” test results; (b) schematic diagram of signal consistency; (c) “non-zero bias” test results; (d) “zero bias” spectrum diagram; (e) “non-zero bias” spectrum diagram<sup>[76]</sup>

2019 年,武汉理工大学 Li 等<sup>[77]</sup>搭建了基于 UWFBG 阵列的 DAS 系统,利用 UWFBG 增强光纤后向散射信号强度(图 17)。实验中,将光纤所测结果与

地震检波器所测波形对比,其时频结果较好吻合。进一步地,将其应用于 VSP 测井中,在不进行任何数据处理条件下获得了清晰高信噪比的 VSP 波形图。



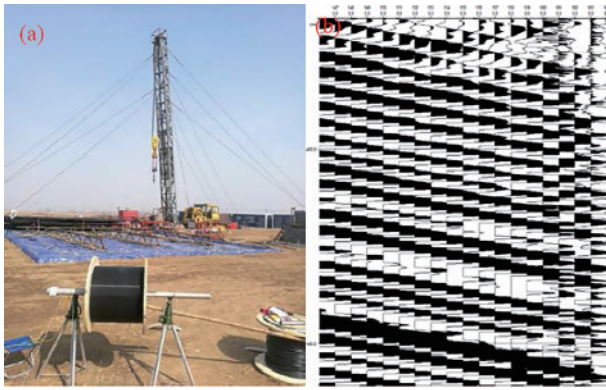


图 17 基于 UWFBG 阵列的 DAS 系统。(a) VSP 测试现场图；(b) VSP 测试结果图<sup>[77]</sup>  
Fig. 17 DAS system based on UWFBG array. (a) VSP test site; (b) VSP test result<sup>[77]</sup>

## 4.2 结构健康监测

铁路、隧道、管道等基础建筑设施的健康状态,关乎人身财产、国家经济、社会生产等运行安全。基于微

结构散射增强光纤的 DAS 系统由于其高可靠性的特点,已被应用于结构健康监测领域。

### 4.2.1 管道监测

石油和天然气等资源运输与国民经济、人民生活息息相关,但其传输管道可能会由外部入侵、腐蚀等原因而发生失效事故,威胁人身经济财产安全。基于离散增强光纤的分布式声波传感系统由于其高信噪比高稳定性的特点,已被应用于管道安全监测<sup>[78-79]</sup>。

Peng 等<sup>[80]</sup>采用飞秒刻写技术人为引入光纤散射增强点,如图 18 所示,基于高信噪比的 DAS 系统对声波在管道中的传播特性进行追踪,结合基于神经网络的机器学习算法对 DAS 系统采集到的数据进行分析,实现对管道外部入侵事件和内部腐蚀状态的监测与识别。系统对不同外部入侵事件的识别准确率超过 85%,在监督学习条件下缺陷识别准确率超过 94%,而在无监督学习条件下识别准确率达到 71%。

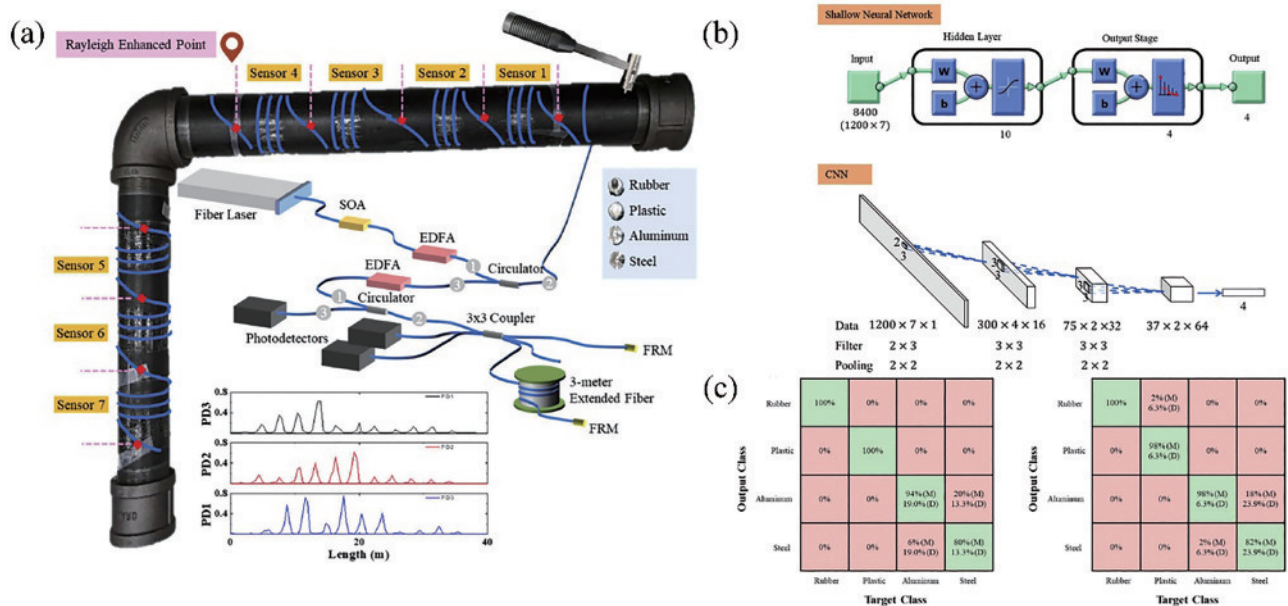


图 18 管道测量示意图及结果图<sup>[80]</sup>。(a) DAS 系统结构及散射增强光纤布设图;(b)神经网络示意图;(c)四类事件的混淆矩阵  
Fig. 18 Schematic diagram and result diagram of pipeline measurement<sup>[80]</sup>. (a) DAS system structure and layout of scattering-enhancing fibers; (b) architectures of neural network; (c) confusion matrix of four acoustic events

### 4.2.2 轨道缺陷检测

随着高铁技术的不断发展,铁路损伤检测变得愈发重要,当前已经发展了多种成熟检测手段,但多为电磁类传感器,易受恶劣环境影响。2019年,华中科技大学团队开展了基于微结构散射增强光纤 DAS 系统的铁路缺陷检测研究<sup>[81]</sup>。如图 19 所示,将微结构散射增强传感光纤布设于铁轨中部位置,在产生缺陷的位置,轮轨之间会产生相互作用,从而形成撞击声信号,沿着轨道两个方向传输,利用 DAS 系统追踪该传输信号,进而再通过定位算法实现缺陷位置的精准定位,其结果表明缺陷最大误差仅为 2.1 m。该方法可为铁轨

健康状态监测提供有效可靠的解决方案。

### 4.2.3 隧道安全监测

此外,隧道等基础设施健康关乎交通运行安全,光纤 DAS 系统同样可服务于地铁、公路等隧道安全检测。隧道结构中存在管片加固钢环实效的问题,管片和钢环的局部分离导致钢环无法对管片起到有效的支撑作用,造成安全隐患。该分离使得管片和钢环之间形成谐振腔,其不同失效程度对应不同的谐振频率。2021年,华中科技大学团队报道了一种基于微结构散射增强光纤 DAS 系统的隧道钢环结构智能监测系统<sup>[82]</sup>。如图 20 所示,将传感光纤铺设在钢环结构上来

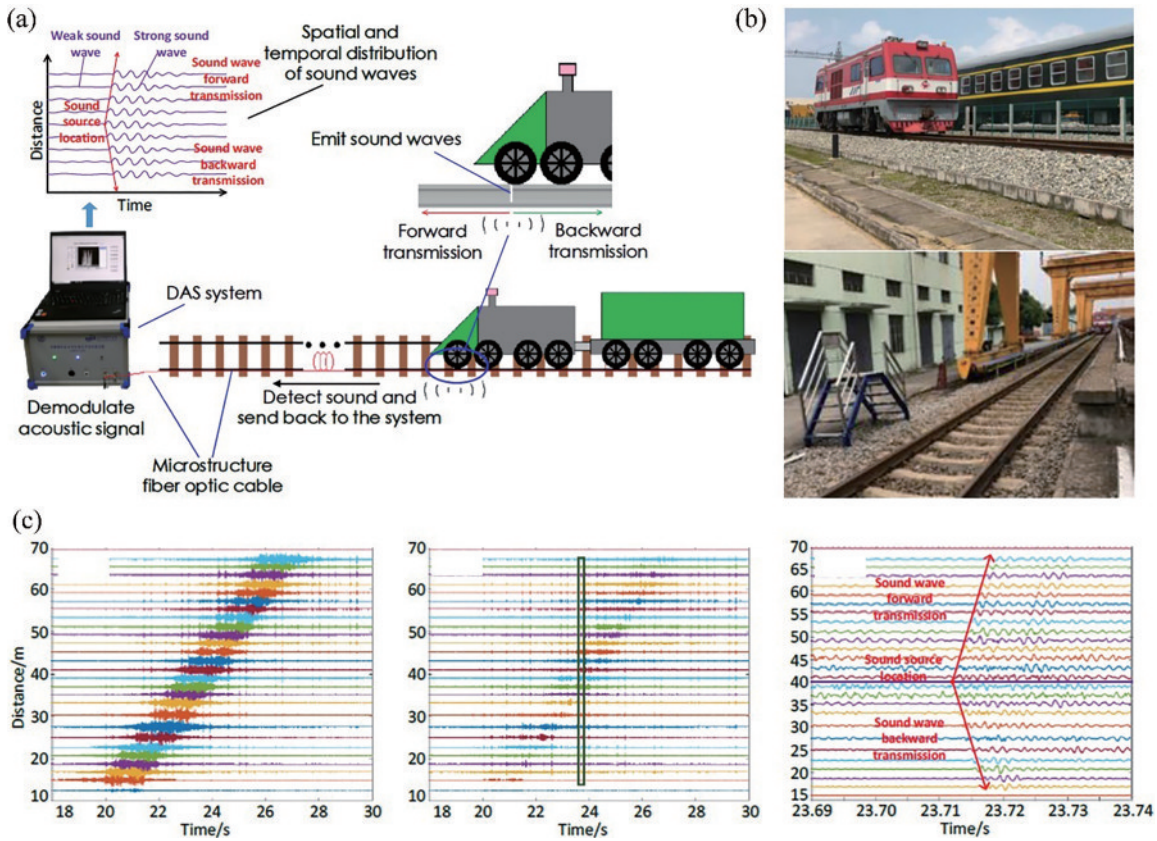


图 19 基于 DAS 系统的铁轨缺陷检测<sup>[81]</sup>。(a) 基于 DAS 的检测及分析声信号过程示意图；(b) 现场测试环境；(c) 声信号测量结果分布图  
 Fig. 19 Rail defect detection based on DAS system<sup>[81]</sup>. (a) Process of detecting and analyzing sound waves based on fiber DAS; (b) photographs of the field test environment; (c) sound distribution measured by DAS

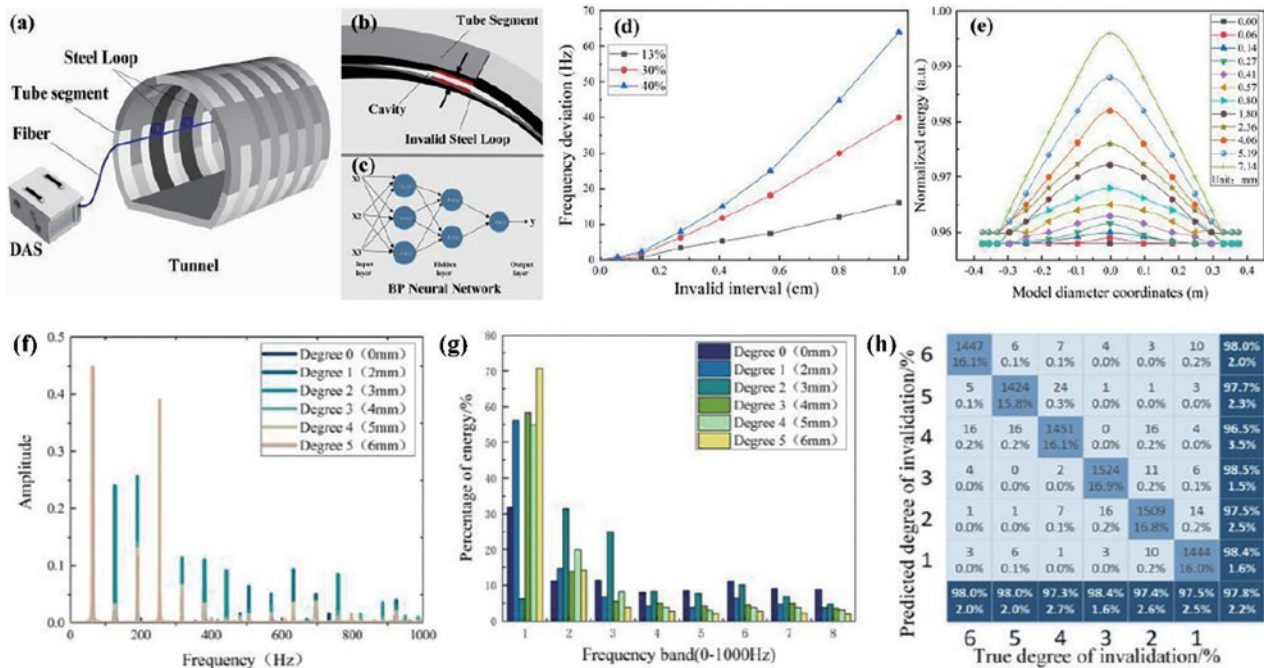


图 20 实验结果。(a) 基于 DAS 技术的隧道钢环检测系统；(b) 实效钢环示意图；(c) BP 神经网络；(d) 失效等级与频率偏差关系仿真结果；(e) 失效等级与能量分布关系仿真结果；(f) 不同失效等级下的功率谱；(g) 不同失效等级下的小波能量变换；(h) 识别率  
 Fig. 20 Experimental results. (a) Tunnel steel loop detection system based on DAS; (b) schematic of invalid steel loop; (c) BP neural network; (d) relationship between invalid degree and frequency deviation; (e) relationship between invalid degree and energy distribution; (f) power spectrum under different invalid degrees; (g) wavelet energy transformation under different invalid degrees; (h) recognition rate



追踪主动声源诱发的谐振频率变化。进一步地,通过基于反向传播(BP)神经网络的机器学习算法来对不同失效等级进行有效分类,从而最终达到在线检测加固钢环贴合状态的效果,实验结果表明,该系统对实效程度的识别率高达 97.8%。

### 4.3 水下探测

海洋探测对于国土安全、资源勘探等有着重要的意义,声波介质可携带丰富的信息并能在水下进行长距离传输,因此水听器是水下信息获取的重要工具。光纤传感器由于其独特的优势已被初步应用于水声测量领域,基于FBG和干涉仪等单点和阵列式水听器是早期光纤水听器的常见方式,然而由于其组阵容量受限,难以实现海洋等应用环境的大规模探测的应用需求。近年来,DAS系统已经广泛地应用于陆地声波探测领域,由于其具有分布式、长距离、高灵敏的特点,人们也已开始关注能否将DAS系统引入到水听器领域,使其成为新一代分布式光纤水听器。初步阶段,研究者在实验室中测试光纤的水声灵敏度等参数与指标,通常基于

UWFBG以及非平衡干涉仪解调结构搭建分布式水声传感系统<sup>[54,83]</sup>,通过解调两个相邻UWFBG之间的相位差变化实现水声信号的获取,其测试得到的灵敏度通常达到 $-160\sim-150$  dB re rad/ $\mu$ Pa左右。

2021年,华中科技大学研究团队设计了一种轻量化全分布式的水声传感光缆<sup>[84]</sup>。内部芯轴层外叠加一层声波增敏层,传感光纤缠绕于增敏层上,并在最外层增加一层保护层。其中,传感光纤为微结构散射增强光纤,其无衰落、稳定增强的后向散射光信号保证了DAS系统的稳定可靠性。其利用相干探测系统进行了水下声传感实验,结果表明水声探测灵敏度高达 $-127.97$  dB re rad/ $\mu$ Pa,平坦频响范围为 $100\sim 2000$  Hz。

2021年,Lu等<sup>[85]</sup>搭建了基于相干探测的DAS系统,并设计了如图22所示的水声传感光缆,进行了现场湖试。实验结果表明,该系统的相位灵敏度达到 $-146$  dB re rad/ $(\mu$ Pa $\cdot$ m),同时实现了水下声源的定位应用。

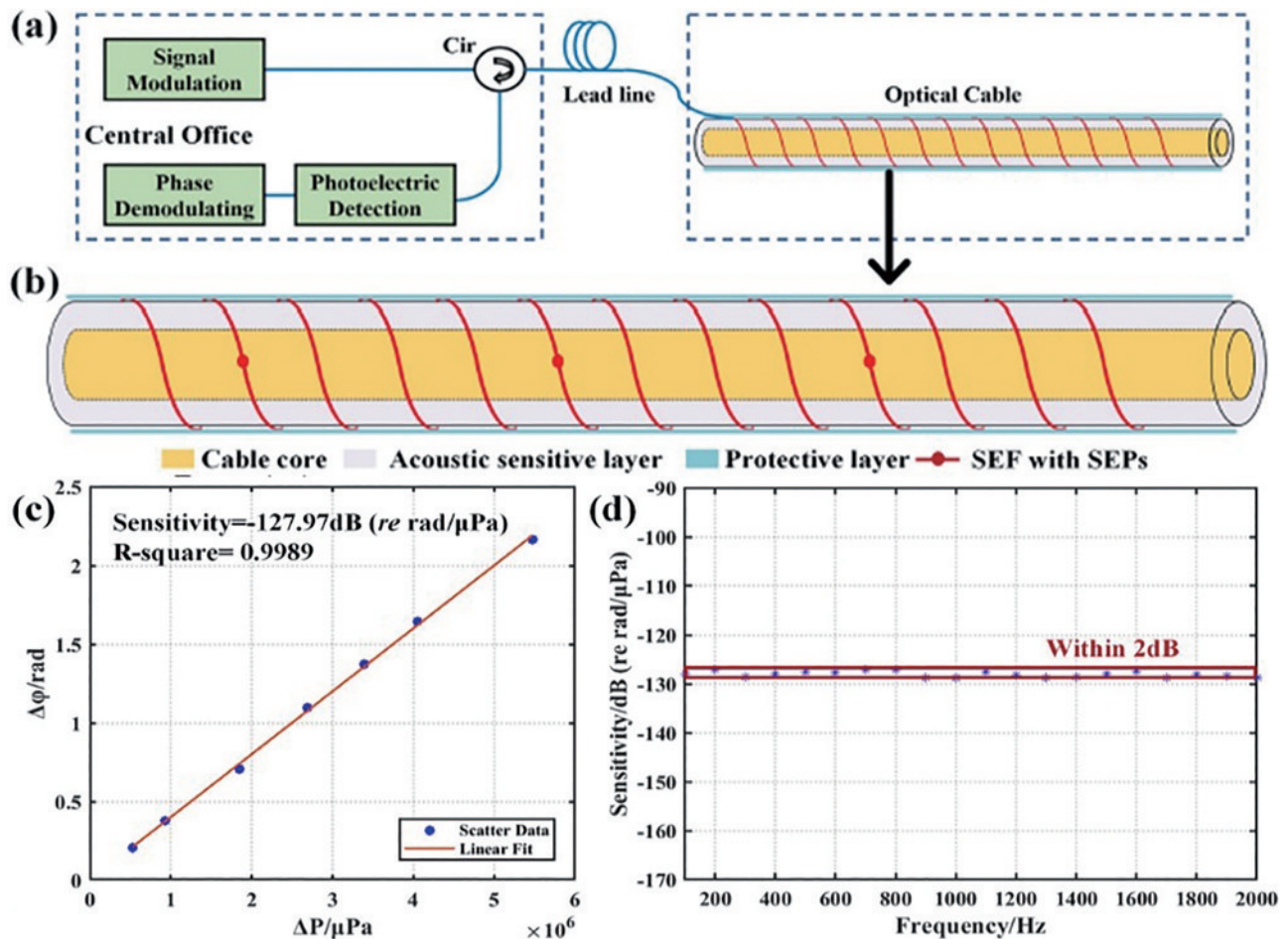


图 21 实验结果。(a)全分布式水下声传感系统;(b)基于微结构散射增强光纤的轻量化全分布水声光缆;(c)光相位和声压变化关系;(d)100~2000 Hz频率响应曲线<sup>[84]</sup>

Fig. 21 Experimental results. (a) Fully distributed underwater acoustic sensor system; (b) lightweight fully distributed underwater acoustic fiber optic cable based on microstructure scattering enhanced fiber; (c) relationship between the demodulated phase change and acoustic pressure; (d) frequency response curve within the frequency range of 100~2000 Hz<sup>[84]</sup>



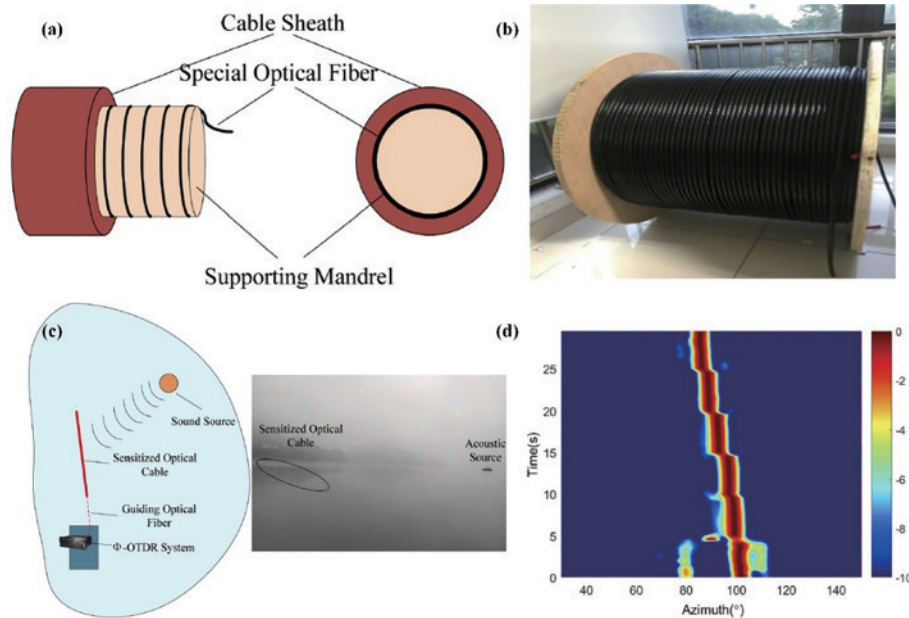


图 22 水声测试示意图及结果图<sup>[85]</sup>。(a) 传感光缆结构；(b) 传感光缆照片；(c) 现场测试图；(d) 声源定位追踪结果图

Fig. 22 Schematic diagram and result diagram of underwater acoustic test<sup>[85]</sup>. (a) Structure of sensitized optical cable; (b) picture of sensitized optical cable; (c) setup of the field test; (d) motion trajectory tracking of the sound source

## 5 结束语

光纤 DAS 技术具有高灵敏、全分布的优势,在国内外研究者的共同努力下,已经逐渐迈向实用化。然而,传统单模光纤 DAS 系统存在传感信噪比较差、相干衰落导致传感盲区、多个传感通道间的测量一致性较差等问题。基于散射增强特种光纤的 DAS 系统可有效解决上述问题,本文对其散射特性及噪声抑制机理进行了分析,重点介绍了离散散射增强光纤的类型与制备技术。基于离散散射增强光纤,本文总结了 DAS 系统相关的改进技术,论述了低频相位补偿、偏振衰落抑制、脉冲宽度压缩、系统采样率扩展等多个方面的性能提升。进一步,基于微结构光纤的 DAS 系统的独特优势,已经在资源勘探、结构健康监测、分布式水听器等多个领域展示出极大的应用潜力。展望未来,基于散射增强光纤的 DAS 技术仍可以从诸多方面进行提升与应用拓展,如散射增强光纤的材料参数优化与制备工艺改进、光纤散射特性辅以机器学习算法以优化相位解调精度、智能管线综合监测与光纤分布式水听器的全面应用推广。相信未来随着机理研究和工艺技术的进一步发展,基于散射增强光纤的分布式声波传感系统将会获得更深入的科学研究和更广泛的应用拓展。

### 参 考 文 献

- [1] Yatman G, Üzumcü S, Pahsa A, et al. Intrusion detection sensors used by electronic security systems for critical facilities and infrastructures: a review[C]//WIT Transactions on The Built Environment, Safety and Security Engineering VI, May 6-8, 2015, Opatija, Croatia. Southampton: WIT Press, 2015: 131-141.
- [2] Shelef E. Deformation processes adjacent to active faults: examples from eastern California[D]. Chapel Hill: The University of North Carolina at Chapel Hill, 2008.
- [3] Mu D, Lee E J, Chen P, et al. Seismic imaging, fault damage and heal[M]. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2014.
- [4] Thun J, Lokmer I, Bean C J, et al. Micrometre-scale deformation observations reveal fundamental controls on geological rifting[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 36676.
- [5] Hartog A, Frignet B, Mackie D, et al. Vertical seismic optical profiling on wireline logging cable[J]. Geophysical Prospecting, 2014, 62(4): 693-701.
- [6] Javier T, Ahlen C H, Miguel G H, et al. Real field deployment of a smart fiber-optic surveillance system for pipeline integrity threat detection: architectural issues and blind field test results[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1052-1062.
- [7] Lv C G, Huo Z Q, Cheng X, et al. Distributed optical fiber sensing intrusion pattern recognition based on GAF and CNN[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 4174-4182.
- [8] 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.  
Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
- [9] Zhou L, Wang F, Wang X I, et al. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [10] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5648-5651.

- [11] Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 30-32.
- [12] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for  $\Phi$ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [13] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a  $\Phi$ -OTDR with a multi-frequency source[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2947-2954.
- [14] Ren M Q, Lu P, Chen L, et al. Theoretical and experimental analysis of  $\Phi$ -OTDR based on polarization diversity detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(6): 697-700.
- [15] Mompo J J, Shiloh L, Arbel N, et al. Distributed dynamic strain sensing via perfect periodic coherent codes and a polarization diversity receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4597-4602.
- [16] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based  $\Phi$ -OTDR using a composite double probe pulse approach[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [17] 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.
- [18] He X G, Zhang M, Gu L J, et al. Performance improvement of dual-pulse heterodyne distributed acoustic sensor for sound detection[J]. Sensors, 2020, 20(4): 999.
- [19] 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.
- [20] Rao Y J, Luo J, Ran Z L, et al. Long-distance fiber-optic  $\Phi$ -OTDR intrusion sensing system[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75031O.
- [21] Juarez J C, Taylor H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3284-3286.
- [22] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8311: 83110S.
- [23] Zhang X P, Sun Z H, Shan Y Y, et al. A high performance distributed optical fiber sensor based on  $\Phi$ -OTDR for dynamic strain measurement[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 16871042.
- [24] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [25] Chen D, Liu Q W, Fan X Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 2037-2043.
- [26] Liokumovich L B, Ushakov N A, Kotov O I, et al. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(17): 3660-3671.
- [27] Zhang J D, Wu H T, Zheng H, et al. 80 km fading free phase-sensitive reflectometry based on multi-carrier NLFM pulse without distributed amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4748-4754.
- [28] Li H, Liu Y J, He T, et al. Dual-pulse complex superposition based noise suppression for distributed acoustic sensing[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [29] Sun F A Q, Zhang W, Liu T, et al. Wideband fully-distributed vibration sensing by using UWFBG based coherent OTDR[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [30] 林圣淘, 王子南, 熊吉, 等. 光纤瑞利散射传感抗干涉衰落技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306008.
- Lin S T, Wang Z N, Xiong J, et al. Progresses of anti-interference-fading technologies for Rayleigh-scattering-based optical fiber sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306008.
- [31] Westbrook P S, Feder K S, Ortiz R M, et al. Kilometer length low loss enhanced back scattering fiber for distributed sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103239Q.
- [32] Jason J, Popov S M, Butov O V, et al. Sensitivity of high Rayleigh scattering fiber in acoustic/vibration sensing using phase-OTDR[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10680: 106801B.
- [33] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Improving distributed sensing with continuous gratings in single and multi-core fibers[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [34] Handerek V A, Karimi M, Nkansah A, et al. Improved optical power budget in distributed acoustic sensing using enhanced scattering optical fibre[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: TuC5.
- [35] Feng S W, Xu T W, Huang J F, et al. Enhanced SNR phase-sensitive OTDR system with active fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10849: 108490C.
- [36] 黄俊斌, 丁朋, 唐劲松. 弱反射光纤光栅阵列制备、解调与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700005.
- Huang J B, Ding P, Tang J S. Progress in fabrication, demodulation and application of weak-reflection fiber Bragg grating array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700005.
- [37] Wu M S, Fan X Y, Zhang X P, et al. Frequency response enhancement of phase-sensitive OTDR for interrogating weak reflector array by using OFDM and

- vernier effect[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(17): 4874-4882.
- [38] Hicke K, Eisermann R, Chruscicki S. Enhanced distributed fiber optic vibration sensing and simultaneous temperature gradient sensing using traditional C-OTDR and structured fiber with scattering dots[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4114.
- [39] Redding B, Murray M J, Donko A, et al. Low-noise distributed acoustic sensing using enhanced backscattering fiber with ultra-low-loss point reflectors[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14638-14647.
- [40] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [41] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [42] Zheng Y, Yu H H, Guo H Y, et al. Analysis of the spectrum distortions of weak fiber Bragg gratings fabricated in-line on a draw tower by the phase mask technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2670-2673.
- [43] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1170-1172.
- [44] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306002.
- Chen Z Y, He J, Xu X Z, et al. High-temperature sensor array based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser point-by-point method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306002.
- [45] Yang M H, Bai W, Guo H Y, et al. Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(1): 26-41.
- [46] Tang J G, Cai L B, Li C L, et al. Distributed acoustic sensors with wide frequency response based on UWFBG array utilizing dual-pulse detection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61: 102452.
- [47] Ai F, Li H, He T, et al. Simultaneous distributed temperature and vibration measurement with UWFBG based coherent OTDR[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [48] Yang M H, Li C L, Mei Z H, et al. Thousands of fiber grating sensor array based on draw tower: a new platform for fiber-optic sensing[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: FB6.
- [49] Peng Z Q, Jian J N, Wen H Q, et al. Fiber-optical distributed acoustic sensing signal enhancements using ultrafast laser and artificial intelligence for human movement detection and pipeline monitoring[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10937: 109370J.
- [50] 刘德明, 贺韬, 许志杰, 等. 新型微结构光纤分布式声波传感技术及应用[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(2): 296-309.
- Liu D M, He T, Xu Z J, et al. New type of microstructure-fiber distributed acoustic sensing technology and its applications[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2020, 38(2): 296-309.
- [51] 艾凡. 基于离散增强光纤的分布式传感关键技术与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- Ai F. Investigation on discrete enhanced fiber based distributed sensing technologies and their applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [52] Li H, Sun Q Z, Liu T, et al. Ultra-high sensitive quasi-distributed acoustic sensor based on coherent OTDR and cylindrical transducer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 929-938.
- [53] Wu M S, Li C, Fan X Y, et al. Large-scale multiplexed weak reflector array fabricated with a femtosecond laser for a fiber-optic quasi-distributed acoustic sensing system[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3685-3688.
- [54] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [55] Jiang P, Ma L N, Wang W, et al. Crosstalk reduction and demodulation stability promotion in inline fiber Fabry-Pérot sensor array using phase generated carrier scheme[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(3): 1006-1014.
- [56] Peng Z, Wen H, Jian J, et al. Identifications and classifications of human locomotion using Rayleigh-enhanced distributed fiber acoustic sensors with deep neural networks[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 21014.
- [57] 丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0506002.
- Ding P, Wu J, Kang D, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0506002.
- [58] 唐健冠, 刘宇哲, 李成立, 等. 基于超弱光纤布拉格光栅的高信噪比分布式振动传感系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306014.
- Tang J G, Liu Y Z, Li C L, et al. Distributed vibration sensing system with high signal-to-noise ratio based on ultra-weak fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306014.
- [59] Fan X Y, Yang G Y, Wang S, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from optical reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3281-3288.
- [60] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Highly sensitive quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system by interrogating a weak reflector array[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3594-3597.
- [61] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensor using ultra-weak reflecting point array[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne,



- Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: WF19.
- [62] Liu T, Li H, Ai F, et al. Ultra-high resolution distributed strain sensing based on phase-OTDR[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, California. New York: IEEE Press, 2019.
- [63] He T, Liu Y J, Zhang S X, et al. High accuracy intrusion pattern recognition using a dual-stage-recognition network for fiber optic distributed sensing system[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 9-14, 2021, San Jose, California. New York: IEEE Press, 2021.
- [64] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based  $\Phi$ -OTDR using a composite double probe pulse approach[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [65] Liu Y, Wang F, Zhang X P, et al. High performance interrogation by a composite-double-probe-pulse for ultra-weak FBG array[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11048: 110483U.
- [66] Liu Y J, Li H, Liu T, et al. Polarization dependent noise suppression for fiber distributed acoustic sensor with birefringence estimation[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: JW2E.18.
- [67] Liu T, Li H, He T, et al. Fading noise free distributed acoustic sensor assisted with double wavelength lasers [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: JW2E.10.
- [68] 刘忠, 陈登伟, 谢晓霞, 等. LFM 脉冲压缩雷达抗移频干扰的方法研究[J]. 现代雷达, 2006, 28(11): 84-86.  
Liu Z, Chen D W, Xie X X, et al. A countering technique for LFM PC radar against shift-frequency jamming[J]. Modern Radar, 2006, 28(11): 84-86.
- [69] 周艳宗, 王冲, 魏天问, 等. 基于 Golay 脉冲编码技术的相干激光雷达仿真研究[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0810004.  
Zhou Y Z, Wang C, Wei T W, et al. Simulation research of coherent lidar based on golay coding technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0810004.
- [70] Jiang J L, Xiong J, Wang Z N, et al. Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing with MIMO technology[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(20): 15284-15291.
- [71] Wu M S, Fan X Y, He Z Y. Phase noise compensation for ultra-highly sensitive fiber-optic quasi-distributed acoustic sensing system[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: SF3L.4.
- [72] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system based on pulse compression technique and phase-noise compensation[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 5969-5972.
- [73] Yang W, Fu X L, Wang J Q, et al. Demodulation method of identical ultra-weak fiber Bragg grating array based on golay code[C]//2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), April 28-29, 2019, Qiqihar, China. New York: IEEE Press, 2019: 256-260.
- [74] Zhang Y X, Fu S Y, Chen Y S, et al. A visibility enhanced broadband phase-sensitive OTDR based on the UWFBG array and frequency-division-multiplexing[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 101995.
- [75] Li H, Fan C Z, Liu T, et al. Time-slot multiplexing based bandwidth enhancement for fiber distributed acoustic sensing[J]. Science China Information Sciences, 2021, 65(1): 119303.
- [76] Li Y P, Karrenbach M, Ajo-Franklin J B. Distributed acoustic sensing in geophysics: methods and applications [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2021.
- [77] Li C L, Mei Z H, Cheng C, et al. Draw tower grating-based distributed acoustic sensing system and its applications[C]//Asia Communications and Photonics Conference (ACPC), November 2-5, 2019, Chengdu, China. Washington, D.C.: OSA, 2019: T2A.5.
- [78] Li T D, Fan C Z, Li H, et al. Nonintrusive distributed flow rate sensing system based on flow-induced vibrations detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 20192170.
- [79] Jiang J P, Liu F, Wang H H, et al. Lateral positioning of vibration source for underground pipeline monitoring based on ultra-weak fiber Bragg grating sensing array[J]. Measurement, 2021, 172: 108892.
- [80] Peng Z Q, Jian J N, Wen H Q, et al. Distributed fiber sensor and machine learning data analytics for pipeline protection against extrinsic intrusions and intrinsic corruptions[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 27277-27292.
- [81] Fan C Z, Ai F, Liu Y J, et al. Rail crack detection by analyzing the acoustic transmission process based on fiber distributed acoustic sensor[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [82] Hu D, Tian B, Li H, et al. Intelligent structure monitoring for tunnel steel loop based on distributed acoustic sensing[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 9-14, 2021, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2021: OPTICA.
- [83] Zhou C M, Pang Y D, Qian L, et al. Demodulation of a hydroacoustic sensor array of fiber interferometers based on ultra-weak fiber Bragg grating reflectors using a self-referencing signal[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2568-2576.
- [84] Chen J F, Li H, Liu T, et al. Fully distributed hydroacoustic sensing based on lightweight optical cable assisted with scattering enhanced fiber[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [85] Lu B, Wu B Y, Gu J F, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on  $\Phi$ -OTDR and its field test[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3147-3162.