

## 激光与光电子学进展

## 基于光频域反射仪的分布式光纤传感及应用进展(特邀)

王义平<sup>1,2,3</sup>, 钟华健<sup>1,2</sup>, 单荣毅<sup>1,2</sup>, 梁文发<sup>1,2</sup>, 彭振威<sup>1,2</sup>, 孟彦杰<sup>1,2</sup>, 廖常锐<sup>1,2</sup>, 付彩玲<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>深圳大学射频频质异构集成全国重点实验室, 广东省光纤传感技术粤港联合研究中心, 深圳市物联网光子器件与传感系统重点实验室, 广东 深圳 518060;<sup>2</sup>深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 深圳市超快激光微纳制造重点实验室, 广东 深圳 518060;<sup>3</sup>人工智能与数字经济广东省实验室(深圳), 广东 深圳 518107

**摘要** 光频域反射仪(OFDR)具有高空间分辨率、高精度和高灵敏度等多种分布式传感能力,其在油气资源勘探、结构健康监测,以及医疗微创介入手术等多种场合展示出了巨大的应用潜力。然而,扫频非线性噪声、相干衰落噪声,以及光纤中微弱的瑞利后向散射信号是影响光频域反射仪性能的主要因素。本文介绍了光频域反射仪基本原理和波长、相位两种传感解调方法,详细阐述了多种抑制扫频非线性噪声和相干衰落噪声的方法,同时介绍了光频域反射仪在三维形状、大应变、高温、折射率等4个方面的传感应用进展。

**关键词** 光频域反射仪; 扫频非线性; 相干衰落; 三维形状; 大应变; 高温

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232406

## Distributed Fiber Optic Sensing Based on Optical Frequency Domain Reflectometry and Its Application Progress (Invited)

Wang Yiping<sup>1,2,3</sup>, Zhong Huajian<sup>1,2</sup>, Shan Rongyi<sup>1,2</sup>, Liang Wenfa<sup>1,2</sup>, Peng Zhenwei<sup>1,2</sup>, Meng Yanjie<sup>1,2</sup>, Liao Changrui<sup>1,2</sup>, Fu Cailing<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Shenzhen Key Laboratory of Photonic Devices and Sensing Systems for Internet of Things, Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fiber Sensors, State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;<sup>2</sup>Shenzhen Key Laboratory of Ultrafast Laser Micro/Nano Manufacturing, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education/Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;<sup>3</sup>Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (Shenzhen), Shenzhen 518107, Guangdong, China

**Abstract** The optical frequency domain reflectometer (OFDR) boasts distributed sensing capabilities, including high spatial resolution, precision, and sensitivity. This technology exhibits significant promise across diverse applications, ranging from oil and gas resource exploration to structural health monitoring and minimally invasive medical intervention surgery. Despite its merits, challenges such as sweep frequency nonlinear noise, coherent fading noise, and weak Rayleigh backscatter signals in optical fibers can impact the performance of optical frequency domain reflectors. This article elucidates the fundamental principles of optical frequency domain reflectors and expounds on two sensing demodulation methods: wavelength and phase. Additionally, it delves into various strategies for mitigating sweep frequency nonlinear noise and coherent fading noise. The discussion extends to the progress in sensing applications of optical frequency domain reflectors, encompassing three-dimensional shape, large strain, high temperature, refractive index, and other pertinent aspects.

**Key words** optical frequency domain reflectometry; sweep nonlinearity; coherent fading; 3D shape; large strain; high temperature

收稿日期: 2023-11-01; 修回日期: 2023-11-21; 录用日期: 2023-11-27; 网络首发日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(2021YFE0111400, U22A2088, 62375178)、广东省自然科学基金(2021A1515011925)、深圳市科技创新委员会(JCYJ20220818095800001, JCYJ20200109114020865, JCYJ20200109114201731)、深圳市科技计划资助(ZD-SYS20220606100405013)、中国核工业集团领创项目(CNNC-LCKY-202265)

通信作者: \*fucailing@szu.edu.cn

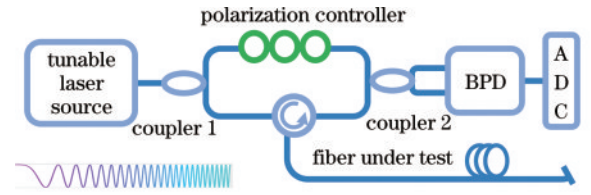
## 1 引言

光纤传感器由于具有耐腐蚀、抗电磁干扰、耐高温等电子传感器不具备的独特优势而被国内外研究人员广泛关注,其在环境监测<sup>[1]</sup>、工业结构健康监测<sup>[2-4]</sup>、航空航天<sup>[5-6]</sup>等领域发挥着重要作用。基于布里渊散射<sup>[7]</sup>、拉曼散射<sup>[8]</sup>,以及瑞利散射<sup>[9]</sup>的分布式光纤传感器可以通过获取光纤中光信号的强度、光频、相位的变化来进行应变、扭转、温度、振动等多种外界信息的分布式测量。其中,瑞利后向散射(RBS)是最容易被光电探测器探测到的光,应用最为广泛。基于光纤 RBS 的分布式光纤传感技术主要分为两类:第一类为光时域反射技术(OTDR),OTDR 的传感距离能达到数十公里,但空间分辨率受限于光脉冲宽度,一般在米级;第二类为光频域反射技术(OFDR),其具有毫米甚至微米级的空间分辨率,其传感距离在百米量级。光频域反射仪于 1981 年由 Eickhoff 等<sup>[10]</sup>提出,主要用于散射和光纤损耗的空间分布测量。而后, Froggatt 等<sup>[11]</sup>扩展出了光频域反射仪的分布式应变测量能力,使得光频域反射仪朝着多种物理量的分布式测量方向快速发展。然而,光频域反射仪在发展过程中遇到了许多挑战:一方面,光频域反射仪本身需要采用扫频光源,而扫频光源固有的扫频非线性给信号带来了极大的相位噪声,这会严重影响系统的空间分辨率、解调精度和传感距离;另一方面,相干探测时会存在明显的衰落噪声,加之光纤中固有的 RBS 信号微弱,最终导致系统的信号幅值波动强烈,进一步降低了系统信噪比。为解决相关问题,研究人员尝试了多种噪声抑制方法,期望提升光频域反射仪空间分辨率、解调精度和传感距离等方面的性能指标。目前,这些方法已取得了良好的效果,并使得光频域反射仪在多方面传感应用中扮演了重要角色。

本文从光频域反射仪的基本模型出发,推导基本理论公式,介绍波长解调和相位解调两种解调方法,并综述多种抑制扫频非线性噪声和相干衰落噪声以提升光频域反射仪信噪比的方法,以及光频域反射仪在三维形状、大应变、高温、折射率传感等方面的应用进展。

## 2 光频域反射仪基本原理

OFDR 基本结构如图 1 所示,由可调谐激光光源(TLS)、非平衡式马赫-曾德尔干涉仪、平衡光电探测器(BPD)和模数转换器(ADC)组成。TLS 输出的线性扫频相干连续光波经过第一个光纤耦合器(coupler 1)后分为两路传播:一路进入参考臂后作为本振信号,偏振控制器(PC)用于调整偏振态;另一路进入探测臂后经光纤环形器进入待测光纤(FUT),FUT 中的瑞利散射光反射回环形器输出为探测信号。本振信号和探测信号在第二个光纤耦合器(coupler 2)中进行拍频干涉,并经平衡光电探测器(BPD)进行光电转换,最终



BPD: balanced photodetector; ADC: analog-to-digital converter

图 1 光频域反射仪基本结构

产生的电压拍频信号由 ADC 采集并用于后续数据处理分析。

本振信号(local signal)和探测信号(probe signal)的线性扫频变化曲线分别如图 2(a)实线和虚线所示。连续光经过探测臂后以 RBS 形式的探测信号沿原路返回。若将 FUT 等效为  $N$  个散射体单元,探测信号则可看作是由一系列相对于本振信号有着时延  $\tau_i$  的扫频信号组成的。第  $i$  个散射体的时延  $\tau_i$  正比于其距离  $L_i$ , 关系式为

$$\tau_i = \frac{2nL_i}{c}, 0 \leq i \leq N, \quad (1)$$

式中:  $c$  为光在真空中的传播速度;  $n$  为光纤有效折射率。以本振信号为例,本振信号扫频频率为

$$\nu(t) = \nu_0 + \gamma t, 0 < t \leq T, \quad (2)$$

式中:  $\nu_0$  为可调谐激光器初始光频率;  $\gamma$  为扫频速率;  $T$  为单次扫频周期。忽略初始相位项,本振信号相位可表示为

$$\varphi(t) = 2\pi \int_0^t \nu(t) dt = 2\pi\nu_0 t + \pi\gamma t^2. \quad (3)$$

进一步,本振信号光场可表示为

$$E_l(t) = E_0 \exp[j(2\pi\nu_0 t + \pi\gamma t^2)], \quad (4)$$

式中:  $E_0$  为参考光振幅;  $j$  为虚数。因此, FUT 中第  $i$  个散射体位置处的探测信号光场可表示为

$$E_{pi}(t) = E_0 \exp\left\{j\left[2\pi\nu_0(t - \tau_i) + \pi\gamma(t - \tau_i)^2\right]\right\}. \quad (5)$$

忽略直流项和常数项后,本振信号与探测信号的拍频信号可以表示为

$$I_i(t) = |E_l(t) + E_{pi}(t)|^2 = E_0^2 \cos\left[2\pi\left(\nu_0\tau_i + \gamma\tau_i t - \frac{1}{2}\gamma\tau_i^2\right)\right]. \quad (6)$$

从式(6)可知,每一个散射体处的探测信号与本振信号拍频后得到频率为  $\gamma\tau_i$  的拍频信号,如图 2(b)所示,沿光纤链路上分布着一系列频率与时延一一对应且线性增大的拍频信号。这样,由 ADC 最终采集到的信号则是拍频信号( $I_1, \dots, I_N$ )叠加而成的,其表达式为

$$I(t) = \sum_{i=1}^N E_0^2 \cos\left[2\pi\left(\nu_0\tau_i + \gamma\tau_i t - \frac{1}{2}\gamma\tau_i^2\right)\right]. \quad (7)$$

因此,光频域反射仪中拍频信号的频率与 FUT 的延迟时间成正比,即与散射体的位置有关。通过算法

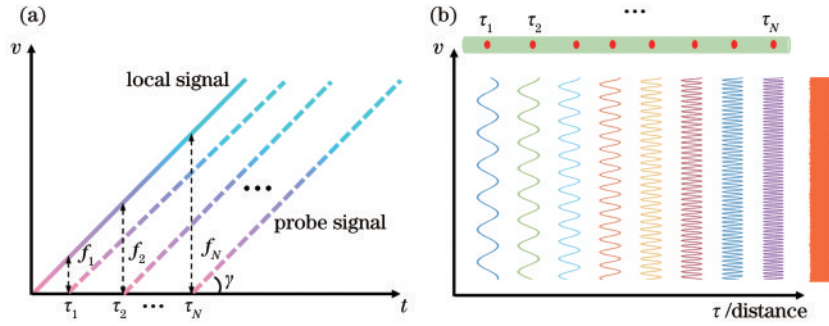


图 2 光频域反射仪拍频原理。(a)本振信号和探测信号的线性扫频;(b)各延时处对应的拍频信号

Fig. 2 The beat principle of optical frequency domain reflectometry. (a) Linear sweep frequency of local and probe signals; (b) corresponding beat signals at each delay

将不同位置处的信号分离出来,即可获取 FUT 上 RBS 信号的分布信息,进而实现分布式传感。当外界应变或温度等参量作用于 FUT 某区域使其长度、折射率发生变化时,RBS 相位受到调制,通过计算波长或相位变化量即可线性解调出外界应变或温度的变化。下面详细介绍光频域反射仪的两种传感解调方法。

### 3 光频域反射仪传感解调方法

目前,OFDR 传感解调的方法主要分为两种:波长解调法和相位解调法。波长解调法原理与光纤布拉格光栅类似<sup>[11]</sup>。当温度或应变作用于光栅时,其反射波长会发生红移或蓝移,通过光谱拟合和寻峰算法即可确定其波长漂移量。瑞利散射光谱虽然无规则形状,但具有独立且唯一的特征,通过互相关等算法即可获得其瑞利散射光谱的波长漂移量,进而实现分布式传感。相位解调法则通过计算沿 FUT 上的相位变化量

来确定对应的温度或应变变化量。

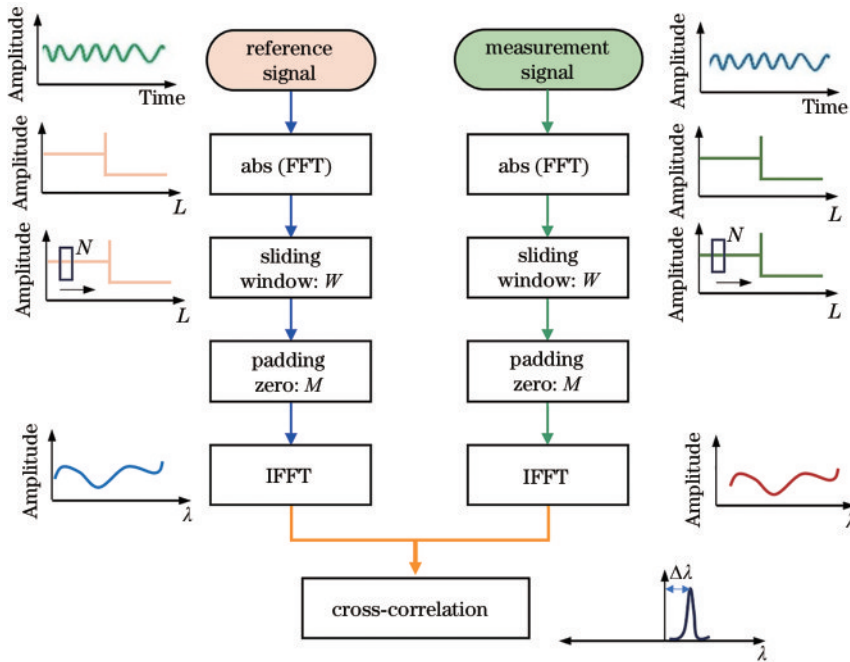
#### 3.1 波长解调法

瑞利散射光谱的波长漂移量可通过温度或应变前后参考和测量信号的互相关运算获得,即分别采集外界环境变化前后的两组拍频信号,一组作为参考信号,另一组作为测量信号。波长解调法运算流程如图 3 所示,具体步骤如下:

1)对参考信号和测量信号进行快速傅里叶变换(FFT),将其从光频域转换到距离域后得到 FUT 的 RBS 散射强度分布。假设频域中频率分辨率为  $\Delta f$ ,则距离域上相邻两个采样点的空间距离为

$$\Delta l = \frac{c}{2n} \cdot \frac{\Delta f}{\gamma} = \frac{c}{2n\Delta F}, \quad (8)$$

式中: $\Delta F$ 为 TLS 扫频范围。由此可见,光频域反射仪的采样空间分辨率仅与扫频范围有关,且增大扫频范围可提升系统空间分辨率。



FFT: fast Fourier transform; IFFT: inverse fast Fourier transform

图 3 波长解调法流程图

Fig. 3 Flow chart of wavelength demodulation method

2) 利用宽度为  $W$  的矩形滤波器滑动窗口对参考信号和测量信号距离域的信号进行加窗截取。矩形滤波器对应的距离宽度为

$$\Delta L = W\Delta l, \quad (9)$$

式中:  $\Delta L$  为光频域反射仪传感空间分辨率。从式(9)可知, 减小滑动窗口距离  $W$ , 传感空间分辨率将提高, 但  $W$  并不能无限减小。一方面, 减小  $W$  会使滑动窗口内信号信噪比下降, 进而影响后续传感解调精度; 另一方面, 减小  $W$  会使波长分辨率降低, 进而减小传感分辨率<sup>[12]</sup>。因此, 光频域反射仪的空间分辨率与波长分辨率相互制约, 存在“不确定性原理”<sup>[12-13]</sup>, 无法同时提升两者。为解决这一矛盾问题, Cui 等<sup>[14]</sup>提出距离域插值算法, 在不降低空间分辨率的同时提高波长分辨率, 即对矩形滑动窗口插值补充  $M$  个零点来细分波长。插值后的波长分辨率提高为

$$\Delta\nu = \frac{\Delta F}{W + M}. \quad (10)$$

3) 对步骤 2) 中插值补零后的数据进行傅里叶逆变换 (IFFT) 转换到光频域, 从而得到两组 RBS 光谱。

4) 对两组 RBS 光谱进行互相关运算, 即可得到互相关峰的波长漂移。通过温度或应变灵敏度系数, 即可得到对应的变化量, 其中, 单模光纤温度和应变灵敏度系数分别约为  $11.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ <sup>[15]</sup>。重复执行上述步骤, 即可实现整根 FUT 上的传感解调。

需要注意的是, 步骤 2) 中距离域插值法虽然有效提高了波长分辨率, 但由于数据量的增加, 多次互相关运算需花费大量时间。最近, 深圳大学王义平团队<sup>[16]</sup>针对数据解调插值补零带来的数据冗余问题, 在基于不同空间分辨率下光纤应变传感特性基础上提出了自

适应补零算法, 通过优化插值补零个数, 减少了互相关运算数据冗余, 提高了运算效率。在  $1.5 \text{ mm}$  空间分辨率下, 和传统补零算法相比, 自适应补零算法在不影响应变传感性能的同时, 其解调时间从  $139 \text{ s}$  缩短至  $0.48 \text{ s}$ , 效率提升了 300 倍。

### 3.2 相位解调法

相位解调法运算过程更简便, 对拍频信号执行 FFT 后, 可直接得到与 FUT 延时距离相关的初始拍频相位, 其相位表达式为

$$\varphi = 2\pi\left(\nu_0\tau - \frac{1}{2}\gamma\tau^2\right). \quad (11)$$

应变作用于光纤时, 其长度会被拉伸或压缩, 进而改变延时和光纤折射率, 通过相位变化即可解调出应变变化。运算流程如图 4 所示, 具体步骤如下:

1) 同样, 采集两组拍频信号作为参考信号和测量信号, 进行 FFT 变换后得到的参考和测量信号的初始拍频相位分别为

$$\varphi_r = 2\pi\left(\nu_0\tau_r - \frac{1}{2}\gamma\tau_r^2\right), \quad (12)$$

$$\varphi_m = 2\pi\left(\nu_0\tau_m - \frac{1}{2}\gamma\tau_m^2\right). \quad (13)$$

当光纤状态不发生改变而 TLS 初始光频存在波动时, 参考相位和测量相位的差值如下:

$$\Delta\varphi_\nu = 2\pi\left(\frac{2nL}{c} \cdot \Delta\nu_0\right), \quad (14)$$

式中:  $\Delta\nu_0$  为初始光频波动量。为避免初始光频不稳定导致测量结果不准确, 通常使用波长校准滤波器<sup>[17]</sup>来保证初始光频恒定, 使初始拍频相位不受光源影响。

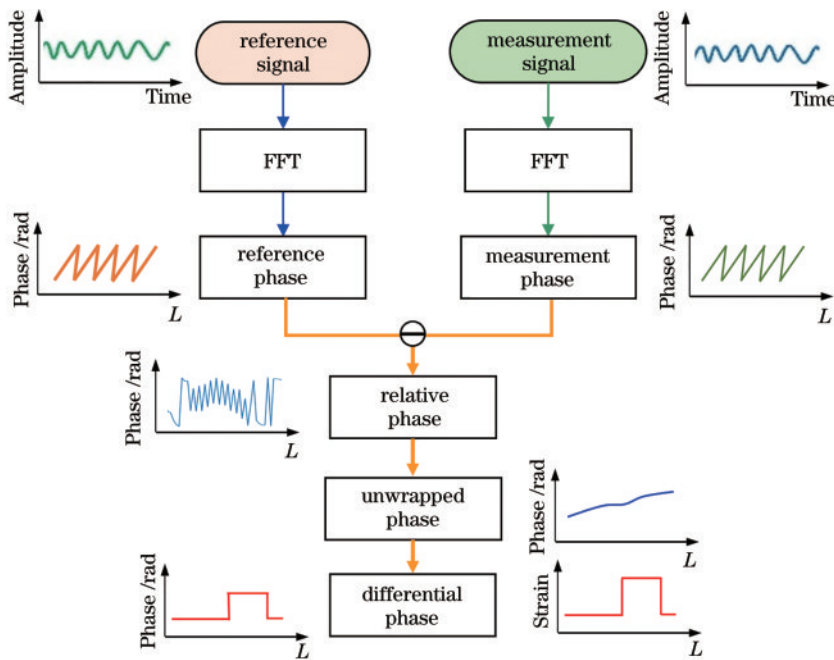


图 4 相位解调法流程图

Fig. 4 Flow chart of phase demodulation method

2) 初始光频稳定情况下, 光纤受到拉伸或者压缩应变时, 由光纤变形引起的相位差<sup>[18]</sup>为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda_0} (1 - P_e) \bar{n} \Delta L, \quad (15)$$

式中:  $\lambda_0$  为初始波长;  $P_e$  为弹光系数;  $\bar{n}$  为光纤有效折射率;  $\Delta L$  为光纤长度变化量。通过式(12)、(13)得到的参考相位和测量相位是缠绕的。因此, 要对式(15)的相位差进行解缠绕并差分求导, 有

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dl} = \frac{d(\Delta L)}{dl} \cdot \frac{4\pi}{\lambda_0} \cdot (1 - P_e) \bar{n}_0. \quad (16)$$

这样, 应变为

$$\epsilon = \frac{d(\Delta\varphi)}{dl} \cdot \frac{\lambda_0}{4\pi(1 - P_e) \bar{n}}. \quad (17)$$

根据式(17)可知, 当中心波长为 1550 nm 时, 其应变灵敏度为 108.31  $\text{ne}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。因此, 相位解调法的应变灵敏度较高, 其在测量微小应变如声波<sup>[19-21]</sup>传感方面具有重要应用前景。不同于波长解调法, 相位解调法不需要多次滑窗后进行 IFFT 并进行互相关计算, 使其运算时间大大缩减, 为光频域反射仪实时传感提供了有力的解决方案。但是, 相位解调法的应变量程受限于最大相位变化。

## 4 光频域反射仪噪声抑制方法

上述 OFDR 基本原理和传感解调方法中的信号模型均是以忽略系统噪声为前提进行叙述和推导的。实际上, 光频域反射仪性能受光源扫频非线性噪声、相干衰落噪声等多种噪声影响。其中: 扫频非线性噪声会影响波长和相位解调方法; 而相干衰落噪声对相位解调法的影响较为明显。针对该问题, 许多研究学者开展了相应研究并提出了多种噪声抑制方法, 以不断提高光频域反射仪空间分辨率和传感精度等关键性能指标。

### 4.1 扫频非线性噪声抑制方法

可调谐激光器通过内部温度调谐、电流调谐和压电元件调制等方式快速改变输出波长, 以便在短时间内输出宽带扫频激光。然而, 调谐过程的不均匀会使输出的激光频率无法完全线性变化, 最终产生扫频非线性噪声, 如图 5(a) 所示, 实际采集的本振信号(实线)与探测信号(虚线)存在明显非线性, 与图 2(a) 中理想线性扫频不同。因此, 式(7)的拍频信号修改为

$$I(t) = \sum_{i=1}^N E_{0i}^2 \cos \times \left[ 2\pi \left( \nu_0 \tau_i + \gamma \tau_i t - \frac{1}{2} \gamma \tau_i^2 + \phi(t) - \phi(t - \tau_i) \right) \right]. \quad (18)$$

从拍频光强信号可知,  $\gamma \tau_i$  是随时延变化的线性拍频相位,  $\phi(t) - \phi(t - \tau_i)$  是与时间和延时相关的随机相位变化项, 即扫频非线性噪声。扫频非线性噪声会使扫频周期内的本征信号与探测信号之间的频率差不再固定, 在频域(距离域)上表现为频谱展宽, 即 FUT 内某个散射体处对应的拍频信号频率被分散在两侧,

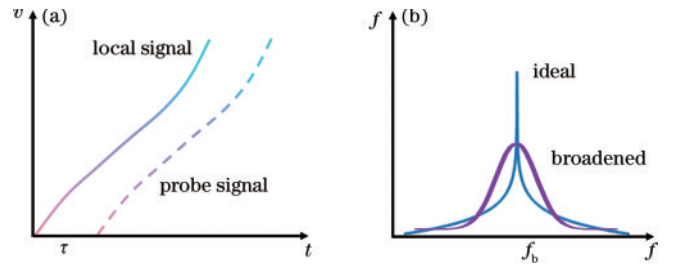


图 5 扫频非线性噪声的影响。(a) 非线性扫频曲线; (b) 拍频信号的频率

Fig. 5 The influence of sweep nonlinear noise. (a) Nonlinear sweep curve; (b) frequency of beat signal

且功率也随之降低, 如图 5(b) 所示。和理想状态下的拍频信号相比, 扫频非线性噪声的存在会使光频域反射仪空间分辨率降低<sup>[22]</sup>。

因此, 如何抑制光源扫频非线性噪声是光频域反射仪发展中的重点研究内容之一。目前, 研究人员提出了多种扫频非线性噪声抑制方法, 分别适用于短距离(几米到百米)和长距离(几千米到上百千米)光频域反射仪, 如图 6 所示。短距离光频域反射仪通常采用内部调制且宽范围波长调谐的光源, 其理论空间分辨率高达数十微米, 但光源相位噪声随传感距离增加而恶化, 加之有限的线宽, 故其传感距离被限制在百米范围。短距离光频域反射仪通常采用外部时钟采样法<sup>[12, 23-26]</sup>和重采样法<sup>[27-39]</sup>来抑制光源扫频非线性噪声。长距离光频域反射仪则通常采用长相干距离、窄扫频范围, 以及高线性度的光源, 其空间分辨率通常在厘米量级, 一般采用窄线宽激光器的外部调制法<sup>[40-49]</sup>、相位噪声补偿法<sup>[50-53]</sup>, 以及设计滤波器法<sup>[54-56]</sup>来抑制光源扫频非线性噪声和提升传感距离。

外部时钟采样法又称硬件采样法, 是 Takada<sup>[23]</sup>于 1992 年提出的一种光纤频率编码器方法。该方法在图 1 光频域反射仪基本结构上增加了一个辅助干涉仪, 其中, 连接 FUT 的干涉仪为主干涉仪, 其结构如图 7 所示。辅助干涉仪产生的拍频信号等效为等频率间隔时钟脉冲, 并将其作为 ADC 的外部时钟输入信号, 这样即可在采样过程中消除主干涉仪拍频信号的扫频非线性噪声。采用该方法, 实现了传感距离 35 m 下光纤器件的偏振测量, 其空间分辨率为 22  $\mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>。随后, Moore 等<sup>[25]</sup>发现该方法存在一定误差, 主要来源为干涉触发固有的采样误差和数据采集硬件的传输延迟。2016 年, Feng 等<sup>[26]</sup>提出通过增加扫频速率降低采样误差的方法, 在扫频速率和传感距离为 2500 GHz/s 和 310 m 的条件下, 实现了空间分辨率高达 4.8 cm、定位精度达 0.15 m 的应变传感。然而, 为满足奈奎斯特采样定理, 外部时钟采样法中辅助干涉仪延时光纤的长度要大于 FUT 的 4 倍以上才能有效抑制扫频非线性噪声。

重采样法与外部时钟采样法所需的硬件结构一

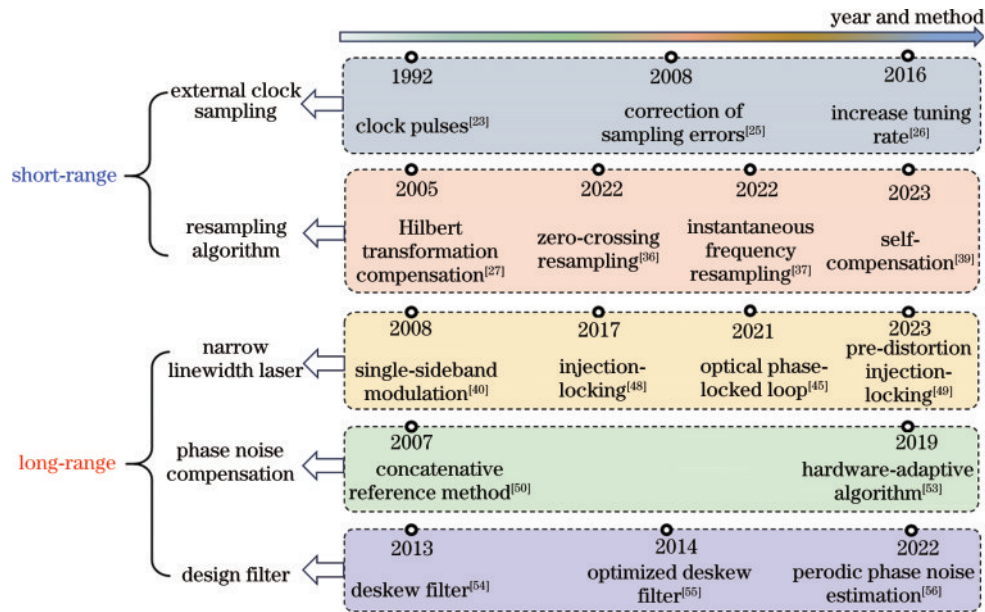


图 6 扫频非线性噪声的抑制方法分类

Fig. 6 Classification of methods for suppressing noise of sweep nonlinearity

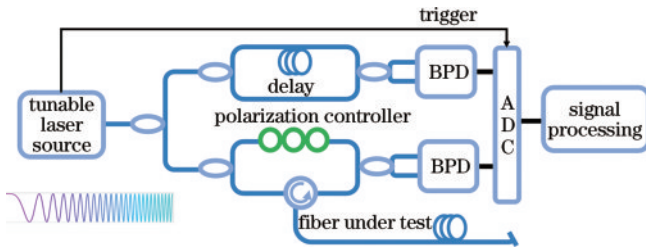


图 7 外部时钟采样法的配置

Fig. 7 Configuration of external clock sampling method

样。不同的是,重采样法中辅助干涉仪信号不作为外部时钟输入,而是与主干涉仪信号一起被 ADC 同步采集,并用于后续的算法补偿,该方法无需满足辅助干涉仪延时光纤长度大于主干涉仪 4 倍这一要求。若不考虑外界因素的干扰,辅助干涉仪中扫频非线性噪声与主干涉仪是近似相等的。因此,Ahn 等<sup>[27]</sup>于 2005 年利用希尔伯特变换从辅助干涉仪中直接获取扫频信息,并将其用于主干涉仪信号插值重采样,实现对扫频非线性噪声的抑制。2009 年,Yuksel 等<sup>[29]</sup>进一步简化该方法,将光频域反射仪空间分辨率提升 30 倍。Song 等<sup>[32]</sup>采用三次样条插值重采样法,实现了 300 m 传感距离下扫频非线性噪声的补偿,并结合波长解调法实现了 7 cm 空间分辨率的温度和应变传感。2022 年,深圳大学王义平团队<sup>[37]</sup>提出了一种瞬时光频率重采样法,通过辅助干涉仪的拍频信号计算出可调谐光源的非线性瞬时频率,将其重新排列为线性序列用于对主干涉仪信号进行插值,有效消除了光源非线性噪声,并利用标准单模光纤实现了传感距离为 100 m、空间分辨率为 2.5 mm 的分布式高温传感(600 °C)。不同于过零点重采样中存在的较大零点提取误差,且在辅助干涉仪小于主干涉仪延时长度的 4 倍时需要进一步采

用倍频处理等问题,该研究中的瞬时频率重采样方法即使在辅助干涉仪小于主干涉仪延时长度的时候依然能实现噪声消除。

值得注意的是,重采样法和外部时钟采样法均需额外添加辅助干涉仪,这不仅复杂化了系统硬件结构,而且增加了数据采集的负担。为此,Sagiv 等<sup>[31]</sup>提出了一种不需要辅助干涉仪的替代方案,即在 FUT 内部设置先验已知空间位置的脉冲反射器(光栅),并用其响应实现相位偏差的补偿。此外,一种将辅助干涉仪与主干涉仪集成于同一通道的新型光频域反射仪被提出,利用该结构实现了数据采集时间和计算负荷的减少以及 50 m 的传感距离。但受辅助干涉仪信号的影响,该系统牺牲了 FUT 前端部分的长度<sup>[34]</sup>。2023 年,深圳大学王义平团队<sup>[39]</sup>也提出了一种单干涉仪的简化光频域反射仪,如图 8 所示,利用电弧放电方式将 FUT 末端反射面加工为一个弧形反射面:一方面,不同于文献<sup>[34]</sup>,该反射面的反射信号不影响沿 FUT 上其余位置的 RBS 信号;另一方面,其起到了等

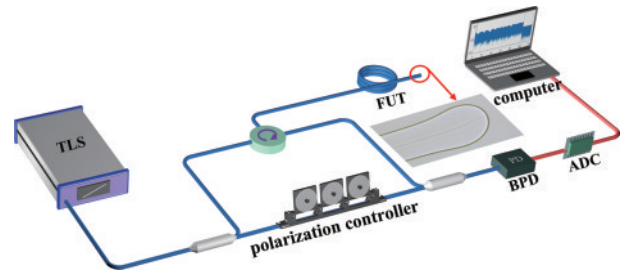


图 8 基于单干涉仪的简化光频域反射仪<sup>[39]</sup>

Fig. 8 Simplified optical frequency domain reflectometry based on single interferometer<sup>[39]</sup>

同于传统辅助干涉仪拍频信号的作用,能有效用于扫频非线性信息的提取。因此,使用合适的滤波器将弧形反射面信号滤出并结合自补偿算法,实现了传感距

离为 100 m 的噪声补偿,空间分辨率达到  $82 \mu\text{m}$ ,且简化后的光频域反射仪在 170 m 的长传感范围中依然能保持较高的互相关系数,如图 9 所示。

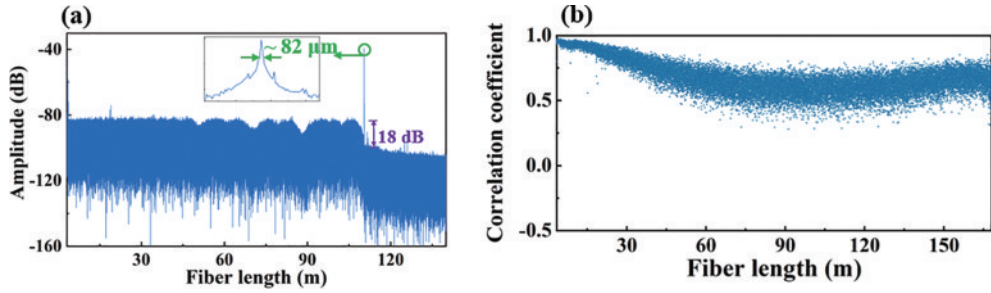


图 9 基于单个干涉仪的光频域反射仪传感结果<sup>[39]</sup>。(a)测得的 100 m 距离域信号;(b)170 m 范围内的互相关系数  
Fig. 9 Sensing results of optical frequency domain reflectometry based on single interferometer<sup>[39]</sup>. (a) Measured 100 m distance domain signal; (b) cross correlation coefficient within 170 m range

为了满足大型结构更长距离分布式测量需求,近年来研究人员也在为实现长距离光频域反射仪不断探索新的途径。2008年,Koshikiya等<sup>[40]</sup>提出单边带调制激光扫频方法,结合级联相位噪声补偿方法<sup>[51]</sup>,实现了 5 km 传感距离下厘米级空间分辨率的测试<sup>[40]</sup>,如图 10 所示,窄线宽激光器输出的单波长光输入单边带调制器,扫频信号源驱动调制器,最终将单波长光调制为扫频光,得到的扫频光兼具扫频噪声小和线宽窄的优点。随后,多种伺服环路光相位锁定的方法也被相继报道以减小外调制过程中的扫频误差<sup>[42-45]</sup>。

带,实现了光扫频范围 5 倍的放大。随后,通过锁定高射频驱动功率调制器产生的第 8 阶边带,实现了具有 24 GHz 扫频范围的扫频光,获得了传感距离长达 10 km 的光频域反射仪<sup>[48]</sup>。2023年,深圳大学王义平团队<sup>[49]</sup>提出基于驱动电压预失真方法的注入锁定系统,过去的注入锁定方案中并未对锁定激光器的非线性调谐问题给出补偿措施,这将造成大带宽锁定时边带和锁定激光器之间产生超出锁定区域的波长差,导致锁定失效。该团队借助干涉仪测量出锁定激光器的波长调谐响应,结合预失真处理有效地将其调谐线性度提高,从而保证了注入锁定过程的稳定性,最终优化后的系统锁定第 4 阶边带获得了扫频范围和扫频速率分别为 60 GHz 和 15 THz/s 的超线性宽带扫频光。在不需要噪声后处理情况下,该系统在 2 km 的传感距离下实现了 1.71 mm 的高空间分辨率,分别如图 11、12 所示。此外,针对长距离光频域反射仪中噪声残留的问题,Ding等<sup>[54]</sup>引入激光雷达领域中的去斜滤波器实现了数十千米的噪声补偿。但由于噪声估算不够准确,去斜滤波效果并未达到最优。近年,基于泰勒展开的二阶<sup>[55]</sup>和三阶<sup>[56]</sup>噪声估算法有效提高了其准确性,结合一个移动平均滤波器将噪声水平进一步降低<sup>[56]</sup>,实现了传感距离千米量级和微米级空间分辨率的光频域反射仪。

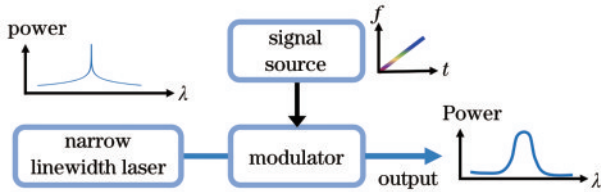


图 10 外调制光扫频原理  
Fig. 10 Principle of external modulation optical sweeping

但是,单边带调制方法获得的扫频光扫频范围有限。为了进一步提升外调制激光的扫频范围,Wei等<sup>[46]</sup>提出高阶边带调制注入锁定技术,通过锁定第 5 阶边

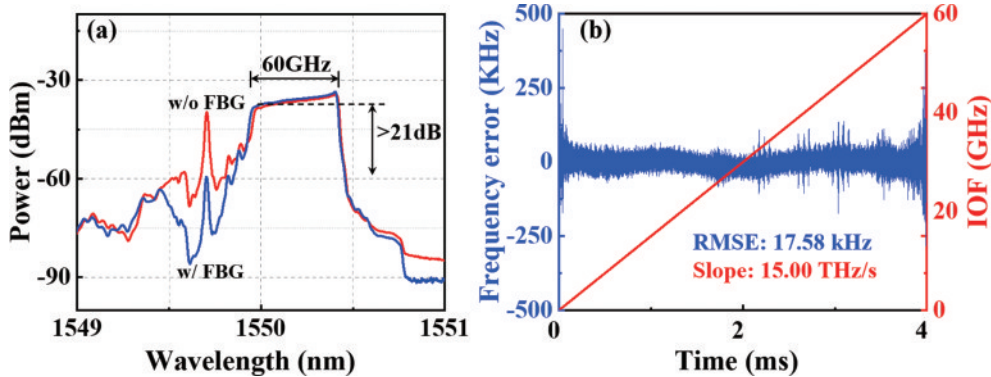


图 11 超线性扫频光<sup>[49]</sup>。(a)扫频光谱;(b)瞬时光频率  
Fig. 11 Ultra-linear sweep light<sup>[49]</sup>. (a) Sweep frequency spectrum; (b) instantaneous optical frequency

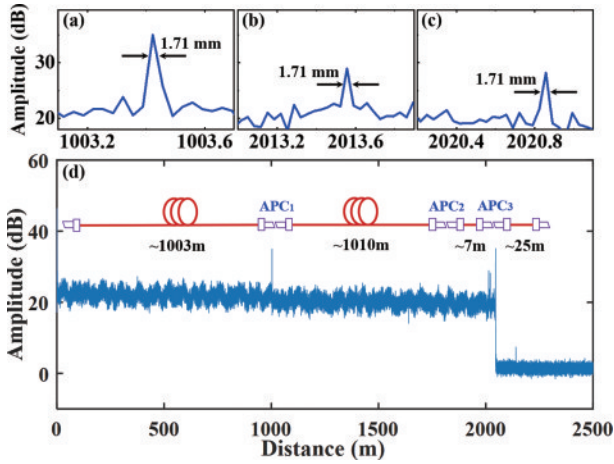


图 12 测得的 2 km 距离域信号<sup>[49]</sup>

Fig. 12 Measured 2 km distance domain signal<sup>[49]</sup>

综上所述,外部时钟采样法、重采样法、单边带调制法、级联相位噪声补偿法、高阶边带注入锁定法等多种噪声抑制方法已被提出并得到广泛应用,极大提升了光频域反射仪的传感距离、空间分辨率和传感精度。但不同扫频非线性噪声抑制方法均有其优缺点,可以根据实际应用场景选择不同方法,以达到“因地制宜”的效果。

#### 4.2 相干衰落噪声抑制方法

近年来,相位型光频域反射仪因相位解调法的灵敏度高、运算时间短等优点也吸引了不少研究者。1984年,Healey<sup>[57]</sup>在外差干涉 OTDR 中发现相干衰落现象,该现象同样存在于光频域反射仪中,如图 13 所示,被测光纤各位置的 RBS 信号互相干涉叠加后产生的距离域拍频信号的幅值呈现强弱不一的随机起伏,并且很多位置处强度幅值低于噪声等级,即衰落点。采用相位法解调时,衰落点处的相位会发生跳变,进而导致无法准确获取相位曲线。此外,被测光纤 RBS 信号的偏振态与本征光偏振态的不匹配还会导致偏振衰落现象,可通过偏振分集接收装置解决<sup>[12]</sup>。

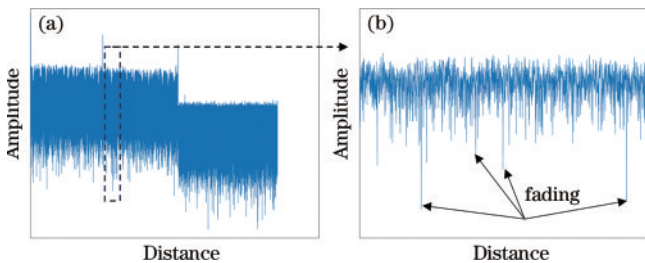


图 13 相干衰落现象。(a)距离域信号;(b)局部放大视角

Fig. 13 Coherent fading phenomenon. (a) Distance domain signal; (b) enlarged view

为了抑制相干衰落噪声,研究人员首先对相对相位进行平滑处理,然后进行相位解缠,再使用长度为  $S$  的移动窗对解缠绕后的相位进行平均得到相位差,具体流程如图 14 所示。通过相干衰落后期相位解调法实

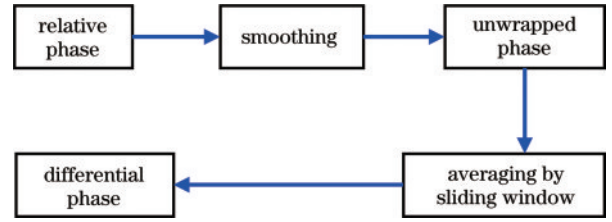


图 14 相位的平滑和滤波

Fig. 14 Smoothing and filtering of phase

现了传感空间分辨率  $4.35 \text{ cm}$  下最小可测应变  $0.25 \mu\epsilon$  的分布式应变传感<sup>[58]</sup>。此时光频域反射仪的传感空间分辨率取决于移动窗长度,即

$$\Delta L = S\Delta l. \quad (19)$$

虽然采用相位平均的方法能够改善相干衰落问题,但降低了系统空间分辨率。此外,该方法需要配合 RBS 信号强度远高于单模光纤的商用全光栅光纤才有较好抑制效果。

当应变作用于光纤时,测量信号中的散射体单元开始偏离其原有位置,这时将相同位置处的参考相位与测量相位相减得到的相位差就不再是散射体单元应变前后的相位变化,即会使距离域中的差分相位失去相干性,进而引起相位解调失败<sup>[59]</sup>。为此,研究人员使用相位校准法<sup>[59]</sup>结合 SG-I 型数字微分器<sup>[60]</sup>计算应变:

$$y(n) = \sum_{i=1}^m \frac{3k}{(2m+1)(m+1)} \Delta_i, \quad (20)$$

式中:  $\Delta_i = x(n+i) - x(n-i)$ , 为输入信号,  $x(n)$  为解缠绕后的相位;  $2m+1$  为滤波器长度。但由于存在滤波长度, SG-I 型数字微分器也将导致空间分辨率下降,此时传感空间分辨率由式(20)中的滤波器长度决定:

$$\Delta L = (2m+1)\Delta l. \quad (21)$$

脉冲内分频结合旋转矢量求和法在基于时间门控的光频域反射仪<sup>[19]</sup>中有效抑制了相干衰落噪声,具体流程如图 15 所示。首先,将拍频信号分成若干份(以 4 份为例)并对每份进行 FFT, 转换到距离域,再利用旋转矢量求和法对每份距离域信号进行相加即可消除衰落噪声。具体计算公式<sup>[61]</sup>为

$$I(k, v) = \sum_{j=1}^H I_j(k, v) \cdot I_j^*(1, v), \quad (22)$$

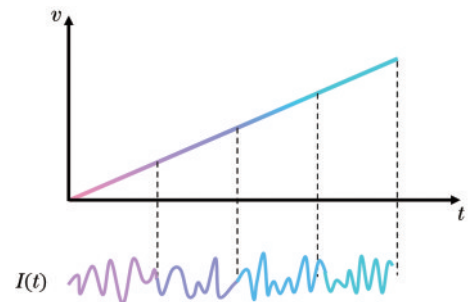


图 15 脉冲内分频原理

Fig. 15 Principle of pulse internal frequency division



式中: $k$ 为第 $k$ 个探测脉冲; $j$ 为第 $j$ 份拍频信号; $H$ 表示份数。2020年,上海交通大学Li等<sup>[61]</sup>将上述方法用于相位型光频域反射仪,在950 m长的单模光纤上以12 cm的空间分辨率实现了两个同时发生的kHz级振动波形的恢复。2022年,Feng等<sup>[62]</sup>提出多频检测与最近邻分析相结合的方法来抑制相干衰落噪声,在波长扫描范围为3.6 nm的情况下,实现了标准偏差为0.55  $\mu\epsilon$ 、空间分辨率为5.6 cm的分布式应变传感。其中,多频检测与脉冲内分频的原理相同,不同的是比较分频信号的子相位曲线,以便在保留各子相位曲线中一致的应变信息的同时还能消除随机跳变的相位。同年,Aitkulov等<sup>[63]</sup>基于扰动光纤的瑞利散射光信号来训练神经网络结构实现了相位跳变的抑制。Feng等<sup>[64]</sup>利用多芯光纤每个纤芯的折射率分布具有随机性和独立性的特点,对每个纤芯中的信号进行加权平均,并对比研究了双芯、四芯和六芯的相干衰落抑制效果,发现六芯光纤最佳。这种借

助多芯光纤特性达到相干衰落噪声抑制的方法能充分利用扫频范围,但需要使用成本更高的多芯光纤。

2022年,深圳大学王义平团队<sup>[65]</sup>利用飞秒激光微加工技术制备的弱散射点阵列来抑制相干衰落噪声,实现了空间分辨率为0.233 mm、传感精度为2.85  $\mu\epsilon$ 、最大测量应变为1400  $\mu\epsilon$ 的分布式应变传感。调制后的弱散射点阵列如图16(a)所示,其中,散射点阵列长度为20 cm,间隔为233  $\mu\text{m}$ 。和单模光纤中的RBS相比,弱散射点阵列的瑞利散射增益达26 dB。采用相位法解调时,标准单模光纤段受相干衰落噪声影响,产生了大量相位跳变点;相反,刻有弱散射点阵列的光纤段由于信噪比的提升相干衰落噪声得到较好抑制,相位跳变点大幅减少,如图17所示。该方法可根据需求调整散射点间隔,并且不需要使用平均或分频等算法,这使得基于散射点增强技术的相位型光频域反射仪朝着超高空间分辨率方向发展。

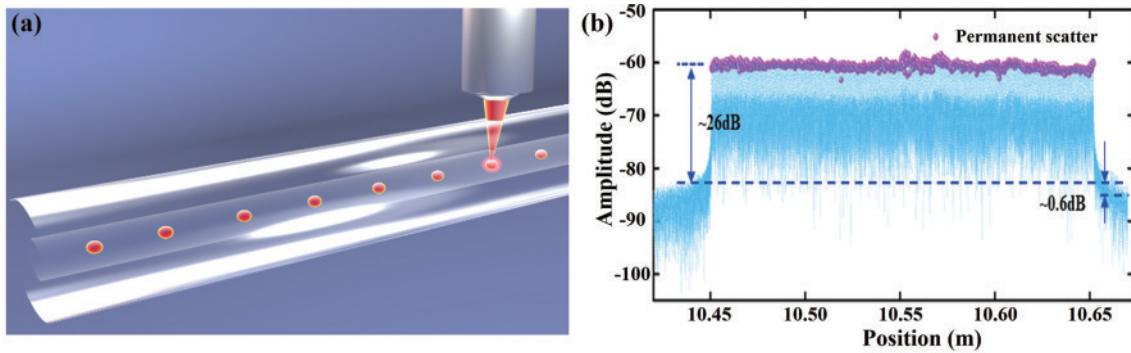


图 16 飞秒激光制备弱散射点阵列<sup>[65]</sup>。(a)加工示意图;(b)弱散射点阵列的距离域信号

Fig. 16 Fabrication of weak scattering point array using femtosecond laser<sup>[65]</sup>. (a) Processing schematic diagram; (b) distance domain signal of weak scattering point array

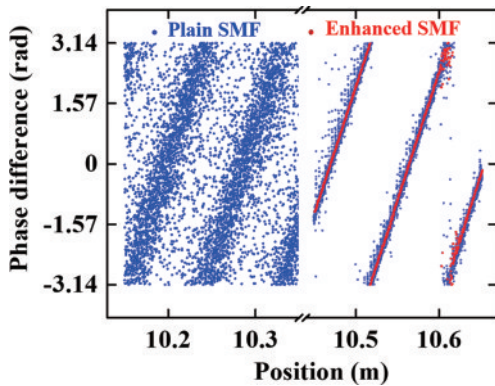


图 17 采用相位法解调的单模光纤段和刻有弱散射点阵列光纤段相位分布<sup>[65]</sup>

Fig. 17 Phase distribution of single-mode fiber segment and fiber segment with weak scattered point array demodulated by phase method<sup>[65]</sup>

## 5 光频域反射仪传感应用

光频域反射仪的高空间分辨率和高灵敏度使其不仅适用于光纤链路或光器件的状态监测,还适用于三

维形状、大应变、高温和折射率等外界物理参量的检测。

### 5.1 三维形状传感应用

光纤三维形状传感技术利用光纤局部应变检测光纤的弯曲(曲率和方向)和扭转等关键信息,结合应变解调和形状重构算法,实时获取光纤形状和位置等三维空间信息。凭借体积小、质量轻、精度高、柔性传感等优点,光纤三维形状传感技术在精准介入诊疗<sup>[66]</sup>、软体机器人<sup>[67]</sup>和可穿戴设备<sup>[68]</sup>等领域引起了广泛关注。

目前,基于波分复用光栅阵列<sup>[69]</sup>、布里渊光时域分析仪<sup>[70]</sup>、相敏光时域反射仪<sup>[71]</sup>和光频域反射仪<sup>[72]</sup>的三维形状传感技术已被报道。基于光频域反射仪的三维形状传感技术凭借其空间分辨率高的优势脱颖而出。2006年,美国LUNA公司率先采用光频域反射仪解调多芯光纤中的全同弱反射光栅阵列,实现了测量精度为3.9%的三维形状传感,其中,光栅间隔和长度分别为1 cm和0.5 cm<sup>[73]</sup>。2012年,美国航空航天局(NASA)基于视曲率矢量法利用3个独立且对称排列纤芯的应变场,结合Frenet-Serret三维曲线重构框架,

实现了测量精度为 7.2% 的三维形状传感,其误差主要来自光纤自身扭曲<sup>[74]</sup>。为减少光纤自身扭曲引入的误差,Yin 等<sup>[75]</sup>发现偏芯螺旋结构是实现扭曲方向识别的关键,基于光频域反射仪在螺距为 6 mm 的螺旋多芯光纤中实现了扭曲灵敏度为 1.9 pm/(rad/m) 的扭曲传感。进一步,Yin 等<sup>[76]</sup>采用波长漂移曲线纵向平移方法和横向周期变化分析方法实现弯曲、扭转同时测量,并基于光频域反射仪和螺旋多芯光纤在长度为 0.62 m 的光纤上实现了平均欧氏距离为 9.6 mm 的三维形状传感。在传感器方面,尹国路等<sup>[77]</sup>制备了一种基于镍铬形状记忆合金丝与三根光纤束封装的形状传感器以代替多芯光纤,之后设计了注胶封装装置来减小封装后的残余应力以减小形状重构误差<sup>[78]</sup>。此外,天津大学 Chen 等<sup>[79-80]</sup>基于 Frenet-Serret 框架建立了形状重构误差模型,研究了光纤长度、扭曲和曲率半径等对三维形状传感精度的影响,发现根据误差模型选择性选取解调参数可减小大曲率半径下的重构误差<sup>[79]</sup>。但是,上述方法均需基于呈中心对称的 3 个纤芯,否则无法获取其精确弯曲方向<sup>[81]</sup>。2021 年,深圳大学王义平团队<sup>[82]</sup>提出基于矢量投影的两芯三维形状传感方法,仅利用多芯光纤中的两个外芯即可实现光纤三维形状重构,实现了七芯光纤中 12 种两芯组合的三维形状传感,最大末端位置精度为 11.6 mm。进一步,将该方法与光纤多路并联传感技术相结合,实现了仅需一次扫频测量的光纤三维形状传感,大大提高了形状传感的同

步性,形状重构相对误差最大为 3.37%。

为了提高 RBS 信号信噪比,Beisenova 等<sup>[83]</sup>使用掺杂氧化镁颗粒的瑞利散射增强光纤提升了应变测量精度,实现了微创机器人手术或眼科手术时产生的微小三维形变的重构。加拿大蒙特利尔理工学院采用紫外激光曝光增强了单模光纤瑞利散射强度,并将三根增益光纤形成光纤簇,结合波长解调法,实现了穿刺针末端平均测量精度的提升<sup>[72]</sup>。然而,紫外激光曝光法只适用于光敏光纤,并且需要剥除光纤涂覆层。飞秒激光微加工技术适用于几乎所有类型光纤,不需要光纤具有光敏性和载氢处理,可直接透过光纤涂覆层。深圳大学王义平团队<sup>[84]</sup>利用飞秒激光微加工技术在多芯光纤每个纤芯中制备弱散射点阵列,增强了瑞利散射强度,提高了光频域反射仪信号信噪比,利用相位解调法获得每个纤芯应变分布,并结合 Bishop 三维形状重构标架,解决了形状重构中的曲线不连续问题,在长度 40 cm 多芯光纤上实现了空间分辨率为 200  $\mu\text{m}$ 、重构误差为 1.25% 的三维形状传感,如图 18 所示。进一步,利用飞秒激光微加工技术在多芯光纤每个纤芯中制备弱反射光栅阵列,结合波长解调法,实现了空间分辨率为 2 cm、重构误差为 1% 的三维形状传感。此外,该团队开发了基于波分复用光栅阵列的多芯光纤三维形状动态传感系统,实现了三维形状传感实时演示,完成一次形状传感和实时演示的时间约为 100 ms,如图 19 所示。

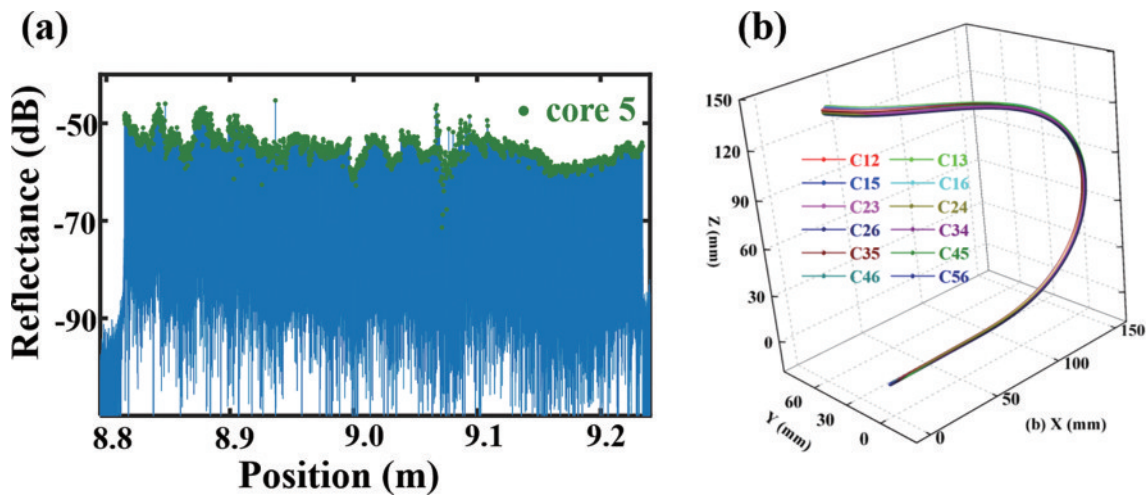


图 18 飞秒激光多芯并联制备三维形状传感弱散射点阵列<sup>[84]</sup>。(a) 散射点的距离域信号;(b) 三维形状重构结果

Fig. 18 Fabrication of weak scattering point array using femtosecond laser in multi-core parallel connection for 3D shape sensing<sup>[84]</sup>.

(a) Distance domain signal of scattering points; (b) 3D shape reconstruction results

## 5.2 大应变传感应用

智能结构健康监测的微小变形通过常规光频域反射仪即可实现<sup>[85]</sup>,然而在疲劳试验等实际应用中,则需要大应变传感范围的光频域反射仪。当光纤被拉伸时,光纤随着光纤的物理长度变长而移动,测量光谱单元相对于参考光谱单元在空间上发生了错位,且错位量沿应变施加方向累计,如图 20 所示。这样,测量光

谱和参考光谱则会存在差异,且这一差异随光纤延伸而增加,直至两者光谱完全失去相关性。此外,当大应变作用时,测量光谱相较于参考光谱而言,探测带宽内的瑞利散射光谱信号会移出探测带宽而缺失,即原本探测带宽外的瑞利光谱信号会进入探测带宽而被记录,观测窗口对光谱产生了截断作用,导致测量光谱和参考光谱的相关性恶化,最终导致无法精确解调。

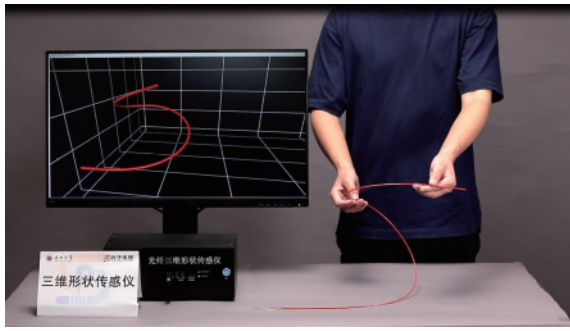
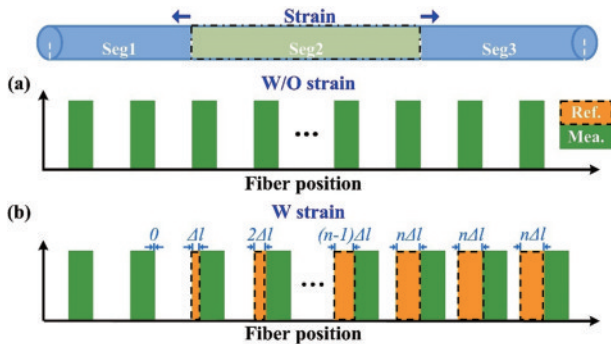


图 19 光纤三维形状传感仪

Fig. 19 Fiber optic 3D shape sensing instrument

图 20 光谱空间位置失配示意图<sup>[16]</sup>。(a)无应变时的光谱位置；  
(b)大应变时的空间错位Fig. 20 Schematic diagrams of spectral spatial position mismatch<sup>[16]</sup>.

(a) Spectral position without strain; (b) spectral position at large strain

为了实现高空间分辨率下的大应变传感, Feng 等<sup>[86]</sup>指出参考光谱与测量光谱重叠少于 80% 时会限制应变测量范围和降低互相关的信噪比。基于此, 选取参考光谱的一部分, 并将其与测量信号频谱进行匹配, 实现了 3 mm 空间分辨率下 3000  $\mu\epsilon$  的分布式应变传感。随后, 采用距离补偿方法保持互相关相似度, 实现了 0.5 mm 空间分辨率下,  $\pm 15 \mu\epsilon$  应变精度、 $\pm 2500 \mu\epsilon$  应变范围的分布式传感<sup>[87]</sup>。除上述信号后处理方式外, 将参考信号和测量信号互相关结果集合视为二维图像或二维矩阵进行处理, 即在传统后处理方法后增加图像处理技术, 也可基于光频域反射仪实现高空间分辨率大应变传感<sup>[88]</sup>。2021 年, Qu 等<sup>[89]</sup>采用全变分算法和二维高斯滤波算法有效解决了传统处理方法难以实现的高空间分辨率识别问题, 在 52 m 的传感光纤上实现了 1.3 mm 空间分辨率的测量。同年, 深圳大学王义平团队<sup>[90]</sup>采用距离补偿法结合图像小波去噪算法, 实现了 2.56 mm 空间分辨率下  $\pm 20 \mu\epsilon$  解调精度、2000  $\mu\epsilon$  测量范围的应变测量。进一步, Qu 等<sup>[91]</sup>采用全变分算法和二维高斯滤波两种图像处理技术消除了由大应变引起的空间失配带来的互相关测量坏点问题, 能较好识别应变梯度信息及应变范围, 最终在 4 mm 空间分辨率下实现了 7000  $\mu\epsilon$  的大应变测量。为了进一步拓展应变范围, 采用距离补偿方法使参考

信号的测量信号与对应空间分辨率下的中心点互相对应, 提升参考信号和测量信号的相似性, 实现了 2 mm 空间分辨率下 10000  $\mu\epsilon$  的大应变测量<sup>[92]</sup>。此外, Zhao 等<sup>[93]</sup>提出一种基于瑞利散射光谱相关性评价函数最优解计算的分布式应变解算方法, 该方法克服了直接计算光谱偏移量所导致的空间测量特性存在差异的缺陷, 在全测量长度上应变测量特性保持一致, 实现了最大应变为 7500  $\mu\epsilon$  的应变解调, 并结合 GPU 并行计算技术实现了 10 倍加速运算。最近, 党竑等<sup>[94]</sup>提出基于卡尔曼预测和局部寻优的传感单元随机位置偏差补偿方法来降低非线性扫频噪声补偿后的残余误差, 实现了 5 mm 空间分辨率下最大应变约为 10000  $\mu\epsilon$  的传感。

深圳大学王义平团队结合后处理光纤, 如瑞利散射增强光纤、弱反射点阵列、弱反射光栅阵列, 也实现了基于光频域反射仪的高空间分辨率大应变传感。2022 年, Du 等<sup>[95]</sup>自主搭建了紫外激光曝光增强光纤瑞利散射系统, 研究了曝光参数对瑞利散射增益的影响, 在 100 s 曝光时间内获得了瑞利散射增益为 37 dB、长度为 1 m 的瑞利散射增强光纤, 基于瑞利散射增强光纤实现了 2 mm 空间分辨率下 2000  $\mu\epsilon$  的应变解调, 其应变传感精度较标准单模光纤提升了 4 倍。进一步, 递归距离补偿信号匹配算法被提出, 即通过计算互相关频移对距离域测量光谱进行补偿实现参考光谱与测量光谱的重新匹配, 结合不同空间分辨率下光纤应变传感特性提出的自适应补零算法, 最终基于瑞利散射增强光纤实现了 1.5 mm 分辨率下 9000  $\mu\epsilon$  的大应变传感<sup>[16]</sup>, 如图 21(a) 所示。2022 年, Meng 等<sup>[65]</sup>基于飞秒激光微加工制备的弱散射点阵列, 结合仅用散射点相位差分布的相位解调法, 实现了空间分辨率 233  $\mu\text{m}$  下 1460  $\mu\epsilon$  的应变传感, 如图 21(b) 所示, 调节散射点阵列间隔, 可调节其应变测量范围。

### 5.3 高温传感应用

高温传感器在航空航天喷气发动机、钢铁工业, 以及核电站等许多领域发挥着至关重要的作用, 它可以帮助测量和监控高温环境下温度的变化, 以及时反馈内部工作情况从而指导工作人员作出相应的控制和调整措施, 达到保障工业器械运行安全和人民生命健康和财产安全的目的。这类领域的环境温度通常达到几百至上千摄氏度, 且伴随着电磁辐射, 因此传统的电学传感器无法满足测量环境的要求。近年来, 多种光纤高温传感器已被研究和报道。2017 年, Laarossi 等<sup>[96]</sup>报道了基于拉曼散射的光时域反射分布式高温传感系统, 该研究比较了标准多模和多模镀金两种类型光纤在高温传感方面的特性, 通过校准技术有效校正了镀金光纤内光学损耗的动态变化, 最终实现了 600  $^{\circ}\text{C}$  的分布式高温传感。2018 年, Xu 等<sup>[97]</sup>基于光纤布里渊散射并结合退火后的单模镀金光纤, 实现了高达 1000  $^{\circ}\text{C}$  的高温传感。然而, 基于拉曼散射和布里渊散射的高温传感器空间分辨率通常为米量级, 为满足更高空间

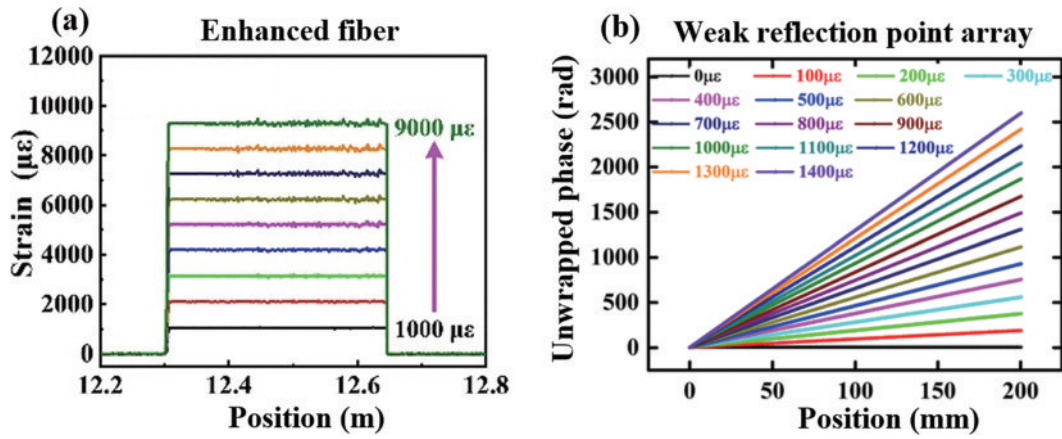


图 21 采用不同光纤得到的大应变传感结果。(a) 散射增强光纤<sup>[16]</sup>; (b) 弱反射点阵列光纤<sup>[65]</sup>

Fig. 21 Large strain sensing results obtained using different optical fibers. (a) Scattering enhanced fiber<sup>[16]</sup>; (b) weak reflection point array fiber<sup>[65]</sup>

分辨率的高温传感需求, 2016 年, Rizzolo 等<sup>[98]</sup> 基于光频域反射仪详细探究了光纤在最高温度为 300 °C 和最高辐射剂量为 10 MGy 环境下的温度响应, 研究发现辐射量不影响光纤散射机制, 而高温下温度系数会在第一次和第二次热处理之间产生约 3% 的波动, 这种波动可以通过将光纤加热至其最高耐受温度的方式降至 0.5%。2018 年, Luo 等<sup>[87]</sup> 采用耐受温度更高的金涂覆层光纤, 结合光频域反射仪解调, 实现了 0.5 mm 空间分辨率下 50~500 °C 温度范围和 ±0.9 °C 温度重复性的分布式高温传感。此外, Chen 等<sup>[99]</sup> 成功地将光频域反射仪应用于监测电弧放电以及氢火焰<sup>[100]</sup> 产生的高温分布, 并研究了光频域反射仪在超过 2000 °C 下其信号相关系数的退化程度。

为提高光频域反射仪高温传感精度, 2020 年, Sweeney 等<sup>[101-102]</sup> 提出一种自适应参考的尺蠖算法, 不同于传统静态参考法无法捕捉高温环境带来的信号变化, 该算法根据光谱漂移质量动态地选择参考光谱, 从而有效地提高了高温恶劣环境下温度传感质量。2018 年, Bulot 等<sup>[103-104]</sup> 采用溶液掺杂技术在单模光纤内掺入氧化锆颗粒使其 RBS 信号强度提升了 40.5 dB, 经退火后结合光频域反射仪实现了更高精度的高温传感。2022 年, 深圳大学王义平团队使用分步阶梯参考方法, 采用以相邻信号作为参考并进行光谱漂移累加的方式减小了宽温度范围变化下的相关误差, 在 10 nm 扫频范围下, 实现了 2.5 mm 空间分辨率、50~600 °C 的温度传感<sup>[37]</sup>, 结果如图 22 所示。随后, 该团队结合上述大应变传感中的图像小波降噪法进一步降低噪声水平, 在 3.2 mm 的空间分辨率下解调出金涂层光纤在 50~500 °C 环境下的温度分布<sup>[105]</sup>, 其温度精度达到 0.24 °C。另一方面, 2023 年, Zhang 等<sup>[106]</sup> 提出一种非局域 Haar 变换法以增强图像去噪性能, 相较于小波去噪方法更好地保留了原始光谱的细节成分。通过使用包层缩减的单模光纤, 在 102 m 长距离范围内以 2 cm 空间分辨率实现了 950~1050 °C 的分布式高温传感。

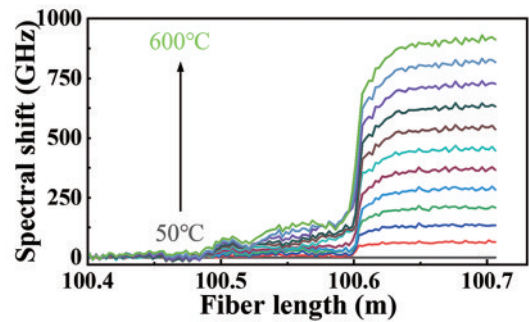


图 22 高温传感结果<sup>[37]</sup>

Fig. 22 High temperature sensing result<sup>[37]</sup>

然而, 该包层缩减的单模光纤无法用于长时间的高温测试。

为了满足高温下长时间的测试需求, 选取具有长期高温热稳定性的传感介质尤为重要。飞秒激光微加工技术除了具有上述提到的能增强信号强度的优点外, 其调制出的光纤区域还具备耐受高温的特性, 因此其在高温传感领域也有用武之地。2021 年, 深圳大学王义平团队<sup>[107]</sup> 将飞秒激光逐点刻写的弱光纤光栅阵列作为传感介质结合光频域反射仪进行了高温传感应用, 200 个参数接近一致且相邻间距为 10 mm 的弱光栅阵列放置于高温炉内, 结果长时间在 1000 °C 环境下弱光栅阵列保持高度热重复性并很好地测得了炉内的温度分布, 表现出出色的高温传感性能, 结果如图 23(a) 所示。除此之外, 该团队采用飞秒激光逐点技术制备了大规模复用高密度弱光纤微腔阵列<sup>[108]</sup>, 该阵列包含有 1000 个微腔, 低传输损耗下其最大复用容量可超过 15000 个。研究验证了微腔阵列长时间在高温下其反射率能保持良好的稳定, 随后以相邻的微腔形成的弱反射器作为传感单元, 在 1000 °C 高温下实现了 1 mm 的高空间分辨率传感, 如图 23(b) 所示。这种基于飞秒激光刻写的光栅或微腔在高温特性方面优于基于紫外激光加工技术刻写的, 后者最大耐受温度约在 450 °C<sup>[109]</sup>, 在更高温度环境中其光栅特性将消失。当

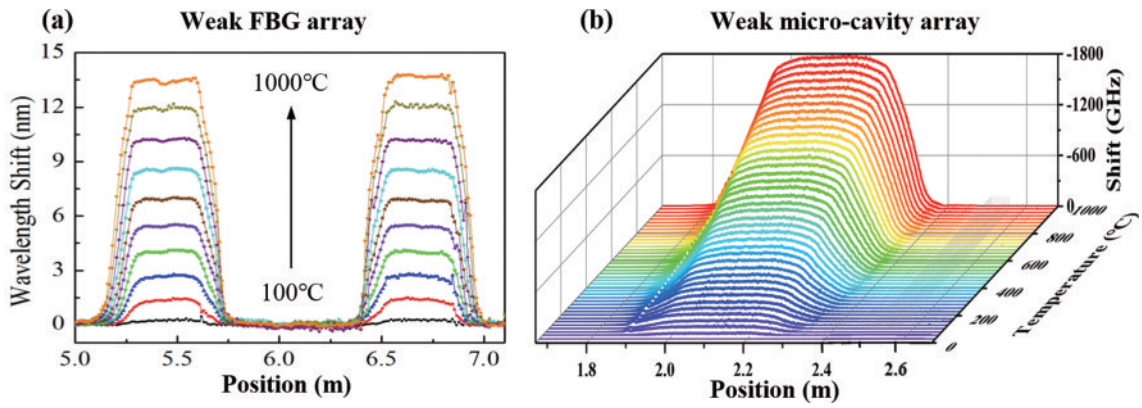


图 23 采用不同后处理光纤得到的高温传感结果。(a)弱光栅阵列光纤<sup>[107]</sup>; (b)弱微腔阵列光纤<sup>[108]</sup>  
 Fig. 23 High temperature sensing results obtained using different post-processing fibers<sup>[107]</sup>. (a) Weak grating array fiber; (b) weak micro-cavity array<sup>[108]</sup>

然,对于超高温度的环境,例如 1600 °C 以上,蓝宝石光纤或许会是更好的选择<sup>[110]</sup>。

#### 5.4 折射率传感应用

折射率测量广泛应用在化学、生物、医学传感领域。目前已报道了多种结构类型的光纤折射率传感器,如 Fabry-Perot 干涉仪<sup>[111]</sup>、Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[112]</sup>、光纤布拉格光栅<sup>[113]</sup>、长周期光纤光栅<sup>[114]</sup>等。但这些单点式折射率传感器难以用于溶液中不同化学物质的分配以及化工质量检验中溶液扩散或反应过程的实时监测。早在 2009 年,Wang 等<sup>[115]</sup>发现通过测量如图 24 所示的大弯曲单模光纤的弯曲损耗可以实现折射率传感。基于该传感原理,2016 年,Du 等<sup>[116]</sup>沿单模光纤上设置了多个小半径的弯曲区域作为传感单元,通过分析光频域反射仪采集到的来自各弯曲区域的 RBS 信号,实现了大弯曲光纤周围处介质折射率从 1.3348 至 1.3557 变化的分布式传感,当弯曲直径分别为 12.2 mm 和 11.3 mm 时,对应的测量灵敏度分别为 18.55 nm/RIU 和 21.74 nm/RIU。采用同样的结构和方法,Xu 等<sup>[117]</sup>将单模光纤弯曲至半径为 4 mm,获得了 39.08 nm/RIU 的高折射率灵敏度。

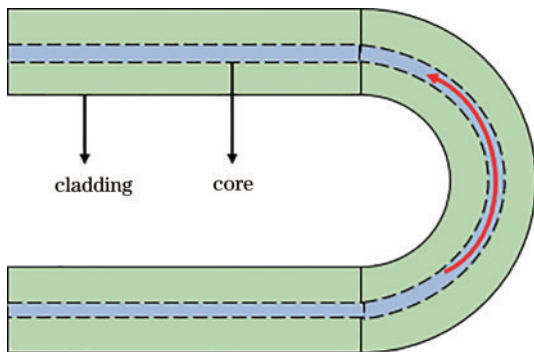


图 24 大弯曲光纤  
 Fig. 24 Large bending fiber

随后,更多类型的光纤结构被用于光频域反射仪折射率传感应用研究。Ding 等<sup>[118]</sup>提出一种基于锥形

光纤的光频域反射仪分布式折射率传感器,由于外部介质会造成锥形区域内的 RBS 信号漂移,通过波长解调法计算光谱漂移量即可反映出折射率变化量,该研究最终实现了空间分辨率和传感区域分别为 2.1 cm 和 4.25 mm 的分布式折射率传感,相较于大弯曲光纤传感器结构,这种锥形光纤能实现更加连续紧密的测量。深圳大学王义平团队采用氢氟酸溶液对掺锗单模光纤进行腐蚀<sup>[119]</sup>,腐蚀后的光纤包层直径缩减至 11.5 μm,总腐蚀长度为 10 cm,如图 25 所示。将腐蚀区域用于折射率传感,对应 10 cm 的腐蚀区域成功测得了 1.33~1.44 的折射率分布,平均灵敏度约为 757 GHz/RIU。折射率测量中,液体温度的变化是影响折射率测量精度的主要因素。为此,Zhu 等<sup>[120]</sup>提出一种具有温度补偿功能的多芯光纤折射率传感器,如图 26 所示,通过腐蚀将多芯光纤中的全部外芯暴露在外,其中,外芯可用于分布式折射率测量,而内芯可用于温度补偿,这种方法可有效避免温度带来的测量误差。除此之外,Zhu 等<sup>[121]</sup>进一步提出一种级联 Fabry-Perot 腔的具有温度补偿功能的折射率传感器,在一根光纤中设置闭合腔和开放腔两种类型的 Fabry-Perot 腔,前者仅对温度产生响应,后者同时对温度和折射率产生响应,因此同样能在折射率测量中消除温度的影响。之后通过级联多个这类传感器,便可以实现多点式的折射率测量。



图 25 氢氟酸腐蚀后的光纤<sup>[119]</sup>  
 Fig. 25 Fiber corroded by hydrofluoric acid<sup>[119]</sup>

总体而言,光频域反射仪能较好地实现折射率的分布式测量,但实际中也存在许多挑战。光频域反射仪实现折射率传感的关键是需要通过拉锥、腐蚀等手段制备出合适的传感介质,而这些制备过程较为困难,

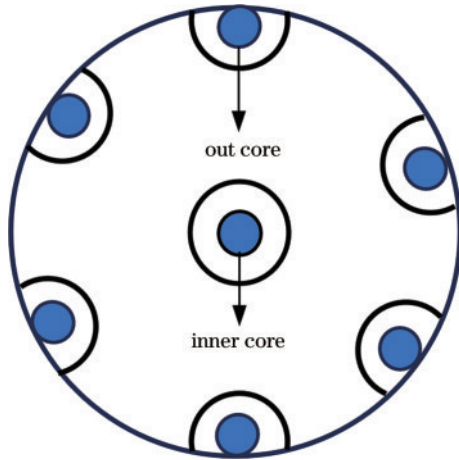


图 26 腐蚀后的多芯光纤  
Fig. 26 Corroded multi-core optical fiber

且重复性难以保证。

截至目前,在社会需求的推动下,光频域反射仪凭借独特的传感优势逐步走进市场。早在十几年前,美国 LUNA 公司就率先推出了商用的光频域反射仪 OBR 4600,该产品在标准模式下具有 30 m 和 70 m 的测量范围,对应的极限空间分辨率分别达到  $10\ \mu\text{m}$  和  $20\ \mu\text{m}$ ,而长量程模式下具有 2000 m 测量范围和 1 mm 的空间分辨率。最近,日本 SANTEC 公司也发布了基于光频域反射的光器件链路分析仪 SPA-100,其具有  $5\ \mu\text{m}$  的采样分辨率,但测量范围较短。国内方面,近年武汉昊衡科技对标 LUNA 产品也推出了 OCI 系列,在与 OBR 4600 具有相同分辨率下最大测量范围为 100 m。此外,国内高校及部分科研院所也在为研制系统样机不断努力,并且在测量范围及精度方面取得了一定的优势。例如,广东工业大学杨军团队在光频域反射仪的测量长度、空间分辨率等综合指标上不断突破并尝试将其推向相关企业,深圳大学王义平团队也推出了相应的光频域反射仪样机,有望满足航空航天等领域测试需求。然而,光频域反射仪的产业化进程中,其内部的各组成仪器的研制及发展是关键因素,其中,大宽带(几十至上百纳米)、窄线宽(百千赫兹以内)的可调谐激光光源是最关键的部分,美国 LUNA、KEYSIGHT、NEWPORT,日本 SANTEC 等均能自主研发并在不断升级,而国内相对空缺,这种对国外的依赖性将极大限制国内光频域反射仪的产业化进程。当然,对于光电探测器及采集卡等器件,国内方面已有许多能满足带宽及采集速率的产品。

## 6 总结与展望

本文全面系统地综述了近几十年基于光频域反射仪的分布式光纤传感的发展与现状,包括光频域反射仪基本原理、扫频非线性噪声和相干衰落噪声抑制方法,以及光频域反射仪的多种传感应用。在结构健康监测、医疗微创介入手术等需求的引领下,光频域反射

仪的关键性能指标得到大幅度的提升。但目前光频域反射仪的相关研究大多数还集中在高校及科研院所当中,为进一步将光频域反射仪推向大规模的实际应用领域中,未来可从以下方面优化:进一步提升光频域反射仪的性能,如传感距离、空间分辨率和处理速度;由于光纤传感器同时对温度、应变等多种参量敏感,未来可从光缆安装和信号处理算法方面解决交叉敏感问题;由于光频域反射仪成本较高,未来可考虑发展基于硅光子的光频域反射仪以降低硬件成本。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y, Yuan Z Y, Chen L W A, et al. From air quality sensors to sensor networks: things we need to learn[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 351: 130958.
- [2] Liu W K, Zhou W S, Li H. Bridge scour estimation using unconstrained distributed fiber optic sensors[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2022, 12 (4): 775-784.
- [3] Tsuda H, Lee J R. Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(7/8): 1353-1361.
- [4] Wu Q, Wang R, Yu F M, et al. Application of an optical fiber sensor for nonlinear ultrasonic evaluation of fatigue crack[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(13): 4992-4999.
- [5] Wada D C, Igawa H, Tamayama M, et al. Flight demonstration of aircraft wing monitoring using optical fiber distributed sensing system[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(5): 055007.
- [6] Wang J, Tang R X, Chen J J, et al. Study of straight-line-type Sagnac optical fiber acoustic sensing system[J]. *Photonics*, 2023, 10(1): 83.
- [7] Beugnot J C, Tur M, Mafang S F, et al. Distributed Brillouin sensing with sub-meter spatial resolution: modeling and processing[J]. *Optics Express*, 2011, 19 (8): 7381-7397.
- [8] Wang M, Wu H, Tang M, et al. Few-mode fiber based Raman distributed temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4907-4916.
- [9] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [10] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(9): 693-695.
- [11] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [12] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 666-674.
- [13] Igawa H, Murayama H, Kasai T, et al. Measurements of strain distributions with a long gauge FBG sensor using

- optical frequency domain reflectometry[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 547-550.
- [14] Cui J W, Zhao S Y, Yang D, et al. Investigation of the interpolation method to improve the distributed strain measurement accuracy in optical frequency domain reflectometry systems[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1424-1431.
- [15] Kreger S T, Gifford D K, Froggatt M E, et al. High resolution distributed strain or temperature measurements in single- and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry[C]//Optical Fiber Sensors, October 23-27, Cancún, Mexico. Washington, DC: OSA, 2006: ThE42.
- [16] Fu C L, Du C, Shan R Y, et al. High-spatial-resolution and wide-range strain distributed sensor based on exposed-SMF using efficient adaptive zero padding[J/OL]. IEEE Sensors Journal: 1-7[2023-10-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10273166>.
- [17] Gui X, Li Z Y, Wang F, et al. Distributed sensing technology of high-spatial resolution based on dense ultra-short FBG array with large multiplexing capacity[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28112-28122.
- [18] Butter C D, Hocker G B. Fiber optics strain gauge[J]. Applied Optics, 1978, 17(18): 2867-2869.
- [19] Chen D, Liu Q W, He Z Y. High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16138-16146.
- [20] 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.
- [21] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [22] Ayhan S, Scherr S, Bhutani A, et al. Impact of frequency ramp nonlinearity, phase noise, and SNR on FMCW radar accuracy[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(10): 3290-3301.
- [23] Takada K. High-resolution OFDR with incorporated fiber-optic frequency encoder[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(9): 1069-1072.
- [24] Iiyama K, Yasuda M, Takamiya S. Extended-range high-resolution FMCW reflectometry by means of electronically frequency-multiplied sampling signal generated from auxiliary interferometer[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2006, 89(6): 823-829.
- [25] Moore E D, McLeod R R. Correction of sampling errors due to laser tuning rate fluctuations in swept-wavelength interferometry[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13139-13149.
- [26] Feng B W, Liu K, Liu T G, et al. Improving OFDR spatial resolution by reducing external clock sampling error[J]. Optics Communications, 2016, 363: 74-79.
- [27] Ahn T J, Lee J Y, Kim D Y. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation[J]. Applied Optics, 2005, 44(35): 7630-7634.
- [28] Ahn T J, Kim D Y. Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation[J]. Applied Optics, 2007, 46(13): 2394-2400.
- [29] Yuksel K, Wuilpart M, Mégret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5845-5851.
- [30] Ding Z Y, Liu T G, Meng Z, et al. Note: improving spatial resolution of optical frequency-domain reflectometry against frequency tuning nonlinearity using non-uniform fast Fourier transform[J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 066110.
- [31] Sagiv O Y, Arbel D, Eyal A. Correcting for spatial-resolution degradation mechanisms in OFDR via inline auxiliary points[J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27465-27472.
- [32] Song J, Li W H, Lu P, et al. Long-range high spatial resolution distributed temperature and strain sensing based on optical frequency-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 6801408.
- [33] Xing J J, Zhang Y, Wang F, et al. A method based on time-scale factor for correcting the nonlinear frequency sweeping in an OFDR system[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 7101808.
- [34] Badar M, Lu P, Buric M, et al. Integrated auxiliary interferometer for self-correction of nonlinear tuning in optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 6097-6103.
- [35] Guo Z, Han G C, Yan J Z, et al. Ultimate spatial resolution realisation in optical frequency domain reflectometry with equal frequency resampling[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4632.
- [36] Wang F, Sun Y, Chen Q, et al. Enhancing the effect of nonlinear frequency sweep correction in OFDR with improved reference frequency[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(1): 269-276.
- [37] Zhong H J, Fu C L, Li P F, et al. Distributed high-temperature sensing based on optical frequency domain reflectometry with a standard single-mode fiber[J]. Optics Letters, 2022, 47(4): 882-885.
- [38] Yin G L, Jiang R, Zhu T. In-fiber auxiliary interferometer to compensate laser nonlinear tuning in simplified OFDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 837-843.
- [39] Zhong H J, Fu C L, Wang L J, et al. High-spatial-resolution OFDR with single interferometer using self-compensation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 161: 107341.
- [40] Koshikiya Y, Fan X Y, Ito F. Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(18): 3287-3294.

- [41] Xiong J, Wang Z N, Jiang J L, et al. High sensitivity and large measurable range distributed acoustic sensing with Rayleigh-enhanced fiber[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2569-2572.
- [42] Gorju G, Jucha A, Jain A, et al. Active stabilization of a rapidly chirped laser by an optoelectronic digital servo-loop control[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(5): 484-486.
- [43] Qin J, Zhang L, Xie W L, et al. Ultra-long range optical frequency domain reflectometry using a coherence-enhanced highly linear frequency-swept fiber laser source [J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19359-19368.
- [44] Feng Y X, Xie W L, Meng Y X, et al. High-performance optical frequency-domain reflectometry based on high-order optical phase-locking-assisted chirp optimization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6227-6236.
- [45] Xie W L, Meng Y X, Feng Y X, et al. Optical linear frequency sweep based on a mode-spacing swept comb and multi-loop phase-locking for FMCW interferometry [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 604-614.
- [46] Wei F, Lu B, Wang J, et al. Precision and broadband frequency swept laser source based on high-order modulation-sideband injection-locking[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4970-4980.
- [47] Schneider G J, Murakowski J A, Schuetz C A, et al. Radiofrequency signal-generation system with over seven octaves of continuous tuning[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 118-122.
- [48] Wang B, Fan X Y, Wang S, et al. Millimeter-resolution long-range OFDR using ultra-linearly 100 GHz-swept optical source realized by injection-locking technique and cascaded FWM process[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3514-3524.
- [49] Zhong H J, Fu C L, Li P F, et al. Ultra-linear broadband optical frequency sweep for a long-range and centimeter-spatial-resolution OFDR[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(17): 4540-4543.
- [50] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Phase-noise-compensated optical frequency domain reflectometry with measurement range beyond laser coherence length realized using concatenative reference method[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(22): 3227-3229.
- [51] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Phase-noise-compensated optical frequency-domain reflectometry[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(6): 594-602.
- [52] Ito F, Fan X Y, Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1015-1024.
- [53] Zhang Z P, Fan X Y, Wu M S, et al. Phase-noise-compensated OFDR realized using hardware-adaptive algorithm for real-time processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2634-2640.
- [54] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Compensation of laser frequency tuning nonlinearity of a long range OFDR using deskew filter[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3826-3834.
- [55] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, et al. Method for improving spatial resolution and amplitude by optimized deskew filter in long-range OFDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 7902811.
- [56] Zou C, Lin C F, Mou T L, et al. Beyond a  $10^7$  range-resolution<sup>-1</sup> product in an OFDR based on a periodic phase noise estimation method[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(20): 5373-5376.
- [57] Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(1): 30-32.
- [58] Wang C H, Liu K, Ding Z Y, et al. High sensitivity distributed static strain sensing based on differential relative phase in optical frequency domain reflectometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(20): 5825-5836.
- [59] Zhao S Y, Cui J W, Wu Z J, et al. Distributed fiber deformation measurement by high-accuracy phase detection in OFDR scheme[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 4101-4108.
- [60] Luo J W, Bai J, He P, et al. Axial strain calculation using a low-pass digital differentiator in ultrasound elastography[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2004, 51(9): 1119-1127.
- [61] Li H, Liu Q W, Chen D, et al. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on  $\Phi$ -OFDR with enhanced crosstalk suppression[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 563-566.
- [62] Feng W, Wang M F, Jia H L, et al. High precision phase-OFDR scheme based on fading noise suppression [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(3): 900-908.
- [63] Aitkulov A, Marcon L, Chiuso A, et al. Machine learning estimation of the phase at the fading points of an OFDR-based distributed sensor[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 262.
- [64] Feng Y X, Xie W L, Meng Y X, et al. Multicore fiber enabled fading suppression in  $\varphi$ -OFDR based high resolution quantitative DVS[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(19): 1026-1029.
- [65] Meng Y J, Fu C L, Chen L, et al. Submillimeter-spatial-resolution  $\varphi$ -OFDR strain sensor using femtosecond laser induced permanent scatters[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(23): 6289-6292.
- [66] Parent F, Gérard M, Monet F, et al. Intra-arterial image guidance with optical frequency domain reflectometry shape sensing[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2019, 38(2): 482-492.
- [67] Katzschmann R K, Thieffry M, Goury O, et al. Dynamically closed-loop controlled soft robotic arm using a reduced order finite element model with state observer [C]//2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), April 14-18, 2019, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 717-724.
- [68] Bai H, Li S, Barreiros J, et al. Stretchable distributed fiber-optic sensors[J]. *Science*, 2020, 370(6518): 848-852.



- [69] Wolf A, Dostovalov A, Bronnikov K, et al. Arrays of fiber Bragg gratings selectively inscribed in different cores of 7-core spun optical fiber by IR femtosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13978-13990.
- [70] Zhao Z Y, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25211-25223.
- [71] Szostkiewicz Ł, Soto M A, Yang Z S, et al. High-resolution distributed shape sensing using phase-sensitive optical time-domain reflectometry and multicore fibers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20763-20773.
- [72] Parent F, Loranger S, Mandal K K, et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(4): 2210-2221.
- [73] Duncan R G, Raum M T. Characterization of a fiber-optic shape and position sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6167: 616704.
- [74] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2967-2973.
- [75] Yin G L, Lu L, Zhou L, et al. Distributed directional torsion sensing based on an optical frequency domain reflectometer and a helical multicore fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16140-16150.
- [76] Yin G L, Xu Z, Ma J M, et al. Simultaneous measurement of bending and torsion in optical fiber shape sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(6): 1851-1857.
- [77] 尹国路, 徐州, 蒋锐, 等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0106002.
- Yin G L, Xu Z, Jiang R, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0106002.
- [78] 尹国路, 徐州, 朱涛. 光纤形状传感器封装过程中残余应力的分布式实时监测[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1606002.
- Yin G L, Xu Z, Zhu T. Distributed real-time monitoring of residual stress during packaging process of optical fiber shape sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1606002.
- [79] Chen Z, Wang C H, Ding Z Y, et al. Demonstration of large curvature radius shape sensing using optical frequency domain reflectometry in multi-core fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 6800809.
- [80] Li S, Hua P D, Ding Z Y, et al. Reconstruction error model of distributed shape sensing based on the reentered frame in OFDR[J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 43255-43270.
- [81] Rogge M D, Moore J P. Shape sensing using a multi-core optical fiber having an arbitrary initial shape in the presence of extrinsic forces: US8746076[P]. 2014-06-10.
- [82] Meng Y J, Fu C L, Du C, et al. Shape sensing using two outer cores of multicore fiber and optical frequency domain reflectometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6624-6630.
- [83] Beisenova A, Issatayeva A, Iordachita I, et al. Distributed fiber optics 3D shape sensing by means of high scattering NP-doped fibers simultaneous spatial multiplexing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22074-22087.
- [84] Fu C L, Meng Y J, Chen L, et al. High-spatial-resolution  $\varphi$ -OFDR shape sensor based on multicore optical fiber with femtosecond-laser-induced permanent scatter arrays[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(12): 3219-3222.
- [85] Zhong H J, Liu X Y, Fu C L, et al. Quasi-distributed temperature and strain sensors based on series-integrated fiber Bragg gratings[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(9): 1540.
- [86] Feng K P, Cui J W, Jiang D, et al. Improvement of the strain measurable range of an OFDR based on local similar characteristics of a Rayleigh scattering spectrum [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3293-3296.
- [87] Luo M M, Liu J F, Tang C J, et al. 0.5 mm spatial resolution distributed fiber temperature and strain sensor with position-deviation compensation based on OFDR[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35823-35829.
- [88] Zhao S Y, Cui J W, Wu Z J, et al. Accuracy improvement in OFDR-based distributed sensing system by image processing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105824.
- [89] Qu S, Qin Z G, Xu Y P, et al. High spatial resolution investigation of OFDR based on image denoising methods [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18871-18876.
- [90] Li P F, Fu C L, Du B, et al. High-spatial-resolution strain sensor based on distance compensation and image wavelet denoising method in OFDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(19): 6334-6339.
- [91] Qu S, Qin Z G, Xu Y P, et al. Improvement of strain measurement range via image processing methods in OFDR system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(19): 6340-6347.
- [92] Qu S, Wang Z Q, Qin Z G, et al. Internet of things infrastructure based on fast, high spatial resolution, and wide measurement range distributed optic-fiber sensors [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(4): 2882-2889.
- [93] Zhao S Y, Cui J W, Suo L J, et al. Performance investigation of OFDR sensing system with a wide strain measurement range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3721-3727.
- [94] 党竑, 马彬, 高超, 等. 基于卡尔曼预测的光频域反射分布式光纤传感性能提升方法[J]. *光学学报*, 2024, 44(1): 0106002.
- Dang H, Ma B, Gao C, et al. Performance enhancement method of optical frequency domain reflection distributed fiber sensing based on Kalman prediction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(1): 0106002.
- [95] Du C, Fu C L, Li P F, et al. High-spatial-resolution strain sensor based on Rayleigh-scattering-enhanced SMF using direct UV exposure[J]. *Journal of Lightwave*

- Technology, 2023, 41(5): 1566-1570.
- [96] Laarossi I, Ruiz-Lombera R, Quintela M A, et al. Ultrahigh temperature Raman-based distributed optical fiber sensor with gold-coated fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 296-301.
- [97] Xu P B, Ba D X, He W M, et al. Distributed Brillouin optical fiber temperature and strain sensing at a high temperature up to 1000 °C by using an annealed gold-coated fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 29724-29734.
- [98] Rizzolo S, Marin E, Morana A, et al. Investigation of coating impact on OFDR optical remote fiber-based sensors performances for their integration in high temperature and radiation environments[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(19): 4460-4465.
- [99] Chen C, Gao S, Chen L, et al. Distributed high temperature monitoring of SMF under electrical arc discharges based on OFDR[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6407.
- [100] Chen C, Chen L, Bao X Y. Distributed temperature profile in hydrogen flame measured by telecom fiber and its durability under flame by OFDR[J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19390-19401.
- [101] Sweeney D C, Schrell A M, Petrie C M. An adaptive reference scheme to extend the functional range of optical backscatter reflectometry in extreme environments[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 498-509.
- [102] Sweeney D C, Petrie C M. Expanding the range of the resolvable strain from distributed fiber optic sensors using a local adaptive reference approach[J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 269-272.
- [103] Bulot P, Cristini O, Bouet M, et al. OFDR distributed temperature sensing at 800°C on a fiber with enhanced Rayleigh scattering profile by doping[C]//Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF), July 2-5, 2018, Zurich. Washington, DC: OSA, 2018: BM3A.2.
- [104] Bulot P, Bernard R, Cieslikiewicz-Bouet M, et al. Performance study of a zirconia-doped fiber for distributed temperature sensing by OFDR at 800 °C [J]. Sensors, 2021, 21(11): 3788.
- [105] Fu C L, Li P F, Sui R L, et al. High-spatial-resolution OFDR distributed temperature sensor based on step-by-step and image wavelet denoising methods[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9972.
- [106] Zhang T, Ding Z Y, Liu K, et al. Distributed high-temperature sensing based on non-local Haar transform in OFDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(16): 5485-5492.
- [107] Xu B J, He J, Du B, et al. Femtosecond laser point-by-point inscription of an ultra-weak fiber Bragg grating array for distributed high-temperature sensing[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 32615-32626.
- [108] Du B, He J, Xu B J, et al. High-density weak in-fiber micro-cavity array for distributed high-temperature sensing with millimeter spatial resolution[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(22): 7447-7455.
- [109] Liu S, Ding L Y, Guo H Y, et al. Thermal stability of drawing-tower grating written in a single mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3073-3077.
- [110] He J, Xu X Z, Du B, et al. Stabilized ultra-high-temperature sensors based on inert gas-sealed sapphire fiber Bragg gratings[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(10): 12359-12366.
- [111] Pan R, Yang W L, Li L J, et al. All-fiber Fabry-Perot interferometer gas refractive index sensor based on hole-assisted one-core fiber and vernier effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(14): 15417-15424.
- [112] Zhao Y, Li X G, Cai L, et al. Refractive index sensing based on photonic crystal fiber interferometer structure with up-tapered joints[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 221: 406-410.
- [113] Holmes C, Ambran S, Cooper P A, et al. Bend monitoring and refractive index sensing using flat fibre and multicore Bragg gratings[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(8): 085203.
- [114] Qi L, Zhao C L, Yuan J Y, et al. Highly reflective long period fiber grating sensor and its application in refractive index sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 193: 185-189.
- [115] Wang P F, Semenova Y, Wu Q, et al. Macrobending single-mode fiber-based refractometer[J]. Applied Optics, 2009, 48(31): 6044-6049.
- [116] Du Y, Jothibasu S, Zhuang Y Y, et al. Rayleigh backscattering based macrobending single mode fiber for distributed refractive index sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 248: 346-350.
- [117] Xu P B, Yu X F, Chen Z J, et al. Distributed refractive index sensing based on bending-induced multimodal interference and Rayleigh backscattering spectrum[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 21530-21538.
- [118] Ding Z Y, Sun K L, Liu K, et al. Distributed refractive index sensing based on tapered fibers in optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13042-13054.
- [119] Fu C L, Sui R L, Peng Z W, et al. Distributed refractive index sensing based on etched Ge-doped SMF in optical frequency domain reflectometry[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4361.
- [120] Zhu Z D, Ba D X, Liu L, et al. Temperature-compensated distributed refractive index sensor based on an etched multi-core fiber in optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Letters, 2021, 46(17): 4308-4311.
- [121] Zhu Z D, Ba D X, Liu L, et al. Temperature-compensated multi-point refractive index sensing based on a cascaded Fabry-Perot cavity and FMCW interferometry[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 19034-19048.