

## 激光与光电子学进展

## OFDR 分布式光纤温度/应变/形状传感研究进展

付彩玲<sup>1,2</sup>, 彭振威<sup>1,2</sup>, 李鹏飞<sup>1,2</sup>, 孟彦杰<sup>1,2</sup>, 钟华健<sup>1,2</sup>, 杜超<sup>1,2</sup>, 王义平<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>深圳大学射频异质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** 基于瑞利散射的光频域反射技术(OFDR)因其高空间分辨率和高灵敏度等优点,在航空航天、健康医疗和高精密仪器检测等领域受到广泛关注。OFDR技术因光纤中瑞利信号弱和光源非线性调谐等问题,限制了其空间分辨率和传感距离等性能的提升。针对此问题,论述了OFDR传感原理,介绍了提升OFDR性能的光纤后处理和数据后处理2种方法,重点介绍了紫外曝光和飞秒激光后处理方法制备瑞利散射增强型光纤,并利用瑞利散射增强型光纤结合后处理方法,实现了温度、应变和三维形状传感。

**关键词** 光频域反射技术; 分布式光纤传感; 瑞利散射; 温度传感; 应变传感; 形状传感

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230701

## Research on Distributed Fiber Temperature/Strain/Shape Sensing Based on OFDR

Fu Cailing<sup>1,2</sup>, Peng Zhenwei<sup>1,2</sup>, Li Pengfei<sup>1,2</sup>, Meng Yanjie<sup>1,2</sup>, Zhong Huajian<sup>1,2</sup>,  
Du Chao<sup>1,2</sup>, Wang Yiping<sup>1,2,3\*</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** Optical frequency domain reflectometry (OFDR) based on Rayleigh backscattering (RBS) has drawn significant attention in the fields of aerospace, health care, and high-precision instrument testing due to its advantages of exhibiting high spatial resolution and high sensitivity. The improvements in the spatial resolution and sensing distance of OFDR is limited by the weak RBS in the fiber and nonlinear tuning of the laser source. To address these problems, two methods, namely, optical fiber post processing and data post processing are introduced, focusing on RBS enhanced fiber using ultraviolet and femtosecond lasers. Moreover, the temperature, strain, and three-dimensional shape sensing properties are realized using RBS enhanced fiber and data post processing methods.

**Key words** optical frequency domain reflectometry; distributed optical fiber sensing; Rayleigh scattering; temperature sensing; strain sensing; shape sensing

## 1 引言

光纤传感器具有耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高、

易于集成等优点。分布式光纤传感器能够连续获取待测物体在空间上的温度、应变、振动等物理量信息,传感光纤本身既是传感器又是信号传输通道,具有测量

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-27; 录用日期: 2023-04-07; 网络首发日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(SQ2021YFE010025, U22A2088)、广东省自然科学基金(2019B1515120042, 2021A1515011925)、深圳市科技创新委员会(JCYJ20200109114020865, JCYJ2020019114201731, 20200810121618001, JSGG20201102152200001)

通信作者: \*ypwang@szu.edu.cn

距离长、范围广、点数多等优点,受到研究者广泛关注。目前,基于后向散射(瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射)的分布式光纤传感技术在国家及民用周界安全监测、石油和天然气管道监测、风力发电机健康监测、深海及海底地震监测等领域发挥着重大作用<sup>[1-4]</sup>。基于后向瑞利散射的分布式光纤传感系统结构相对简单,更易于实现光信号的探测,主要分为光时域反射技术(OTDR)和光频域反射技术(OFDR)<sup>[5]</sup>。与米级空间分辨率的OTDR相比,OFDR具有毫米级空间分辨率,适用于机翼健康监测和临床医疗等短距离、高空间分辨率场景下的应用。常见的OFDR系统通常采用普通单模光纤作为传感光纤,但其后向瑞利散射光极其微弱,传感信号信噪比较低,进而降低OFDR系统空间分辨率。此外,OFDR系统采用可调谐激光器,但产生的扫频光存在非线性调谐和其他噪声信号干扰的问题,会使OFDR系统随传感距离的增加而降低空间分辨率。近年来,利用紫外激光曝光或飞秒激光微加工技术在光纤中制备微结构阵列(散射点阵列、微腔阵列和光纤光栅阵列)的光纤后处理法相继被报道,增强了光纤瑞利散射,提高了传感信号信噪比,提升了OFDR

传感性能。此外,数据后处理方法(瞬时光频域法、小波变化和图像处理方法)也被用来补偿光源的非线性调谐,提升OFDR传感性能。本文从OFDR理论模型出发,分析了OFDR分布式光纤传感系统性能提升方面存在的问题,综述了紫外激光曝光增强光纤瑞利散射、飞秒激光后处理技术制备弱散射点和弱反射光栅阵列方面、数据后处理技术等方面的研究进展,以及OFDR系统在温度、应变和形状传感等方面的重要进展。

## 2 OFDR理论模型

OFDR来源于调频连续波(FMCW)技术,原理如图1(a)所示,干涉仪可选用迈克尔逊干涉仪或马赫-曾德尔干涉仪结构。可调谐激光器(TLS)产生的线性扫频光经耦合器被分为两路:一路进入参考臂后被反射镜反射回耦合器,作为本振参考光;另一路进入待测光纤(FUT),用于感知外界环境变化,经FUT返回到耦合器中的瑞利散射与本振参考光发生拍频干涉。待测光纤不同位置的后向瑞利散射信号到达光电探测器(PD)的时间不同,与参考光产生拍频信号频率不同,通过傅里叶变换(FFT)即可得到拍频 $f_b$ ,如图1(b)所示。

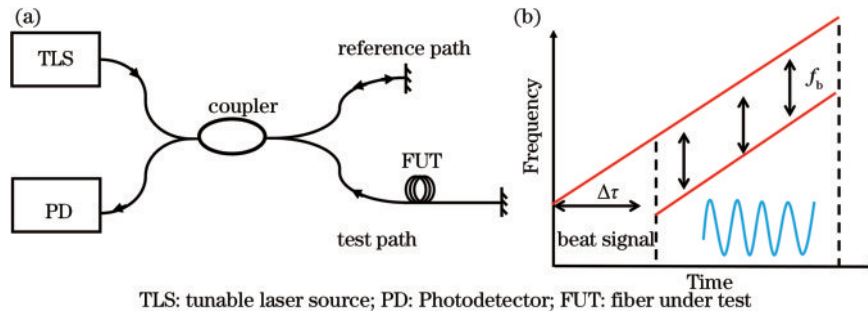


图1 调频连续波干涉仪示意图。(a)迈克尔逊干涉仪结构;(b)激光器线性扫频光

Fig. 1 Schematic diagram of frequency modulated continuous wave interferometer. (a) Michelson interferometer structure; (b) laser linear sweep light

设 TLS 调谐速度为  $\gamma$ , 本振参考光光场  $E_r(t)$  可表示为

$$E_r(t) = E_0 \exp\left\{j\left[2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2 + \phi(t)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为参考光振幅;  $f_0$  为初始光频;  $\gamma$  为扫频速率;  $\phi(t)$  为  $t$  时刻光源随机波动的光相位;  $j$  为虚数。对待测光纤某一位置  $z$  处, 测试光光场  $E_z(t)$  可表示为

$$E_z(t) = \sqrt{R_z} E_0 \exp\left\{j\left[2\pi f_0(t - \tau_z) + \pi \gamma(t - \tau_z)^2 + \phi(t - \tau_z)\right]\right\}, \quad (2)$$

式中:  $R_z$  为位置  $z$  处的反射率;  $\tau_z$  为位置  $z$  处反射点测试光与本振参考光的时延差。

本振参考光与测试光的拍频信号可表示为

$$I(t) = |E_r(t) + E_z(t)|^2 = E_0^2 \left\{1 + R_z + 2\sqrt{R_z} \cos\left[2\pi\left[f_0\tau_z + \gamma\tau_z t - \frac{1}{2}\gamma\tau_z^2 + \phi(t) - \phi(t - \tau_z)\right]\right]\right\}, \quad (3)$$

忽略直流项和常数项, 上式可被简化为

$$I(t) = 2E_0^2\sqrt{R_z} \cos\left\{2\pi\left[f_0\tau_z + \gamma\tau_z t - \frac{1}{2}\gamma\tau_z^2 + \phi(t) - \phi(t - \tau_z)\right]\right\}. \quad (4)$$

由式(4)可知, 拍频信号的频率( $f_b = \gamma\tau_z$ )与后向瑞利散射光的延迟时间成正比, 即与散射光的位置  $z$  有关,  $\phi(t) - \phi(t - \tau_z)$  为相位噪声项。因此, 在 OFDR 系统中, 通过检测拍频信号的波长或相位即可测量沿待测光纤方向的外界环境变化, 对应解调方法为波长解调和相位解调方法。

在 OFDR 传感系统中,通过测量并解调参考信号和测量信号瑞利散射光谱互相关的波长漂移,可实现外界温度/应变参数的检测,即波长解调方法,步骤如下:

1) 利用 OFDR 系统分别采集两组时域数据,其中一组为无外界环境影响状态下采集的数据,作为参考信号;另外一组为外界环境变化时采集的数据,作为测量信号。

2) 利用傅里叶变换将参考信号和测量信号转换到距离域,得到光纤的后向瑞利散射强度分布。

3) 利用滑动窗口来选取两组信号相同位置处的瑞利散射信号,窗口的长度  $\Delta L$  为

$$\Delta L = N \cdot \Delta x, \quad (5)$$

式中: $N$ 为窗口内数据点数; $\Delta x$ 为空间分辨率。将窗口内的数据分别通过逆傅里叶变换转换到波长域,此时得到窗口内光纤段的瑞利散射光谱。

4) 将同一位置处的两组瑞利散射光谱进行互相关计算,得到互相关峰的漂移值即为瑞利散射光谱的波长漂移,乘以温度/应变灵敏度系数,即可得到温度/应变的变化值。不断地移动窗口,重复步骤 3)、步骤 4),即可得到沿传感光纤方向的温度/应变。

根据式(4)可知,拍频信号相位可表示为

$$\phi_z = 2\pi \left[ f_0 \tau_z - \frac{1}{2} \gamma \tau_z^2 + \phi_z \right], \quad (6)$$

对时域的拍频信号进行傅里叶变换,在距离域,不同光纤位置  $z$  处所对应的复数辐角就是该位置处的相位。当光纤不受任何应变或温度影响时,相同位置处的相位差为 0。 $\frac{1}{2} \gamma \tau_z^2 \ll f_0 \tau_z$ , 式(6)可简化为

$$\phi = 2\pi f_0 \tau_z, \quad (7)$$

式中: $\tau_z = 2nL/c$ ,  $n$ 为光纤纤芯有效折射率, $L$ 为被测光纤任意位置处的长度, $c$ 为光在真空中的传播速度。因此,当被测光纤受到外界因素影响时(如施加应变),式(3)中的初始相位将会变化,通过测量并解调后向瑞利散射信号的相位差变化,即可实现外界温度/应变参数的检测。相位解调方法步骤如下:

1) 与波长解调方法一样,利用 OFDR 系统分别采集两组时域数据,一组作为参考信号,一组作为测量信号;

2) 将测量的两组时域数据通过傅里叶变换转换到距离域,得到光纤的后向瑞利散射复数信号;

3) 利用反正切函数计算不同光纤位置  $z$  处相位,将参考信号与测量信号同一位置处的相位相减得到相位差;

4) 相位的变化以  $2\pi$  为周期,因此需要对求得的相位差进行解缠,得到解缠的相位差分布;

5) 对解缠的相位差分布进行微分,得到了单位长度内相位差的变化,乘以对应待测量灵敏度系数,即可得沿传感光纤方向的温度/应变。

### 3 OFDR 传感性能提升研究进展

OFDR 分布式传感主要是基于普通光纤中极其微弱的后向瑞利散射实现对外界参量的感知,微弱的瑞利散射光信号的随机光学噪声严重限制了 OFDR 性能的提升,主要涉及空间分辨率、传感测量范围、传感精度和传感距离等指标。此外,可调谐光源非线性扫频会导致后向瑞利散射光能量扩散、反射信号强度降低和空间分辨率恶化等,进一步降低 OFDR 传感性能<sup>[6]</sup>。为解决 OFDR 系统中可调谐激光器扫频非线性调谐的问题,一般采用硬件补偿<sup>[7]</sup>和软件补偿<sup>[8]</sup>两种方法。硬件补偿方法,即在 OFDR 系统中加入辅助干涉仪,并利用辅助干涉仪产生的拍频干涉信号作为外部时钟校正扫频激光器的非线性调谐误差,实现主干干涉仪信号的等光频数据采集,进而补偿 TLS 的非线性效应。但受奈奎斯特采样理论限制,传感光纤的最大长度是辅助干涉仪光纤光程差长度的四分之一,这种方法一般适用于短距离 OFDR 传感。软件补偿方法,即通过软件补偿方法对 OFDR 数据采集后的非线性问题进行有效补偿,进而解决辅助干涉仪光程差对传感距离的限制,实现较长距离 OFDR 传感系统。目前,利用光纤后处理方法增强光纤瑞利散射以提升传感光信号信噪比、算法后处理方法补偿光源非线性扫频是两种主流提升 OFDR 传感性能的方法。

#### 3.1 光纤后处理方法提升 OFDR 传感性能

常用普通光纤内固有的后向瑞利散射信号弱,其散射系数仅为  $-50$  dB,传感信号信噪比低,极大地限制了 OFDR 传感性能的提升。目前,增强光纤瑞利散射的方法有选用具有较大散射截面的聚合物光纤<sup>[9]</sup>或掺有各种杂质的高散射光纤<sup>[10]</sup>。比如,在光纤预制棒中添加  $MgCl_2$  和  $ErCl_3$ ,结合气相沉积法,实现纤芯掺杂  $MgO$  纳米颗粒,其瑞利散射增益最高可达  $45$  dB。虽然这种方式能有效增强光纤瑞利散射,但其损耗也会成倍增大,限制了传感距离。同时,还可通过紫外激光曝光或飞秒激光微加工后处理方法,人为引入弱散射点<sup>[11]</sup>、弱反射光栅<sup>[12]</sup>、随机光纤光栅<sup>[13]</sup>和纳米光纤光栅<sup>[14]</sup>等方法来增强光纤瑞利散射。

##### 3.1.1 紫外激光曝光

2015 年, Loranger 等<sup>[15]</sup>利用紫外激光曝光载氢单模光纤和高掺镱光纤,发现其瑞利散射增益高达  $20$  dB,并基于瑞利散射增强型光纤实现了  $2$  cm 空间分辨率下  $20$  mK 的温度传感精度。但该方法曝光效率较低,曝光过程中需调节光纤位于焦点位置处才能实现瑞利散射增强。华中科技大学 Evan 等<sup>[16]</sup>提出利用紫外激光沿光纤轴向连续制备一系列离散分布的纵向微结构散射单元,实现了光纤后向散射信号的有效增强,在传感信噪比和稳定性方面得到了大幅提升,并将其应用于分布式声波传感。

2023 年,深圳大学 Du<sup>[17]</sup>设计并搭建了紫外激光曝

光增强光纤瑞利散射系统,该系统由反射镜、格兰棱镜、半波片、光阑、焦距为 300 mm 的柱透镜(CL)和相位掩模板(PM)等组成,如图 2(a)所示。曝光步骤如下:首先,将标准单模光纤置于 100 °C、15 MPa 的高温高压环境下载氢 7 天,增强光纤光敏性;然后,取出光纤,剥除光纤涂覆层,采用固定于三维位移平台上的一对双臂夹具夹持并固定载氢单模光纤,调整光纤与相位掩模板水平并保持一定距离( $D_1$ );最后,开启激光,选择合适能量的紫外激光( $E$ )对载氢单模光纤进行曝光,并同步控制一维位移平台以恒定速度  $V$  拖动光纤。采用的紫外激光的波长和重复频率分别为 266 nm 和 10 ns,最大平均输出功率为 100 mW,激光光斑尺寸为 10 mm。光纤与柱透镜之间的距离为 310 mm,即光纤处于离焦位置,使光斑完全覆盖光纤纤芯,在保证能量密度下降低紫外曝光对平台精度及曝光工艺的要求,提高重复性及曝光效率。为了避免发生漏曝和曝光不均匀,采用 OFDR 系统实时监测光纤后向瑞利散射的变化,如图 2 所示。进一步探究了不同曝光参数下的瑞利散射增益,即光纤和相位掩模板距离( $D_1$ ),激光能量( $E$ )和光纤移动速度( $V$ ),以便寻求最佳曝光参数。实验表明: $D_1=5$  mm、 $E=5$  mJ、 $V=10$  mm/s 为最优曝光参数。采用该参数获得了曝光长度为 1 m、增益为 37.3 dB、损耗为 0.06 dB/m 的瑞利散射增强型光纤,曝光时间仅需 100 s,如图 2(b)所示。该方法增强了标准单模光纤的瑞利散射,还提高了曝光效率。利用紫外激光曝光后的瑞利散射增强型光纤,提高了应变传感信号信噪比,实现了 2 mm 空间分辨率下 2000  $\mu\epsilon$  均匀应变的精确解调。相较于标准单模光纤其应变精度提高了 4 倍,有效提升了 OFDR 分布式应变传感性能。

### 3.1.2 飞秒激光制备弱散射点阵列

利用紫外激光直接曝光光纤可增强光纤瑞利散射,但该方法只适用于光敏光纤,而且需要剥除涂覆层再涂覆,无法保证光纤机械强度不受影响。飞秒激光微加工技术可透过光纤涂覆层,几乎适用于所有类型

光纤,不需要光纤具有光敏性和载氢处理。2017 年,美国匹兹堡大学 Yan 等<sup>[14]</sup>利用飞秒激光微加工技术在纤芯中刻线诱导的纳米光栅增强了光纤瑞利散射,并基于该瑞利散射增强型光纤实现了固体氧化物燃料电池的分布式温度传感。2019 年,加拿大国家研究院 Lu<sup>[13]</sup>利用飞秒激光微加工技术制备的随机光栅增强了光纤瑞利散射,其插入损耗为 0.08 dB/m,实现了空间分辨率为 10 mm、标准差为 0.00085 °C 的高稳定性分布式温度传感。2020 年,美国匹兹堡大学 Cao 等利用飞秒激光在单模光纤中刻写 2 个反射点构建了法布里-珀罗干涉仪(FP),并在 FP 结构处镀上对氢气敏感的钯膜,结合 OFDR 技术实现了温度和气体的同时传感。

2022 年,深圳大学 Meng<sup>[11]</sup>设计并搭建飞秒激光自聚焦微加工系统,利用该系统在单模光纤中半自动制备弱散射点阵列,增强光纤瑞利散射,提高传感信号信噪比,如图 3 所示。飞秒激光波长为 513 nm,重复频率为 200 kHz,脉冲宽度为 290 fs。快门控制输出光脉冲数量,半波片(HWP)和格兰棱镜(GP)调节激光能量,激光经二向色镜(BS)反射后经高倍物镜聚焦于光纤纤芯。弱散射点阵列的制备步骤如下:

1) 光纤放置与固定,即将保留涂覆层的单模光纤利用固定于位移平台上的双臂夹具夹持并固定。

2) 计算待加工弱散射点阵列的位置。手动控制位移平台,将待加工光纤段最右侧的纤芯中心移至激光焦点位置处,记录位移平台位置为( $x_R, y_R, z_R$ );将最左侧的纤芯中心移至激光焦点位置处,记录位移平台位置为( $x_L, y_L, z_L$ )。假定弱散射点间隔为  $R$ ,则待加工弱散射点  $i$  的位置坐标可表示为

$$a = a \tan \left[ 2 \left( y_L - y_R, x_L - x_R \right) \right], \quad (8)$$

$$x_i = R \times i \times \cos a + x_R, \quad (9)$$

$$y_i = R \times i \times \sin a + y_R, \quad (10)$$

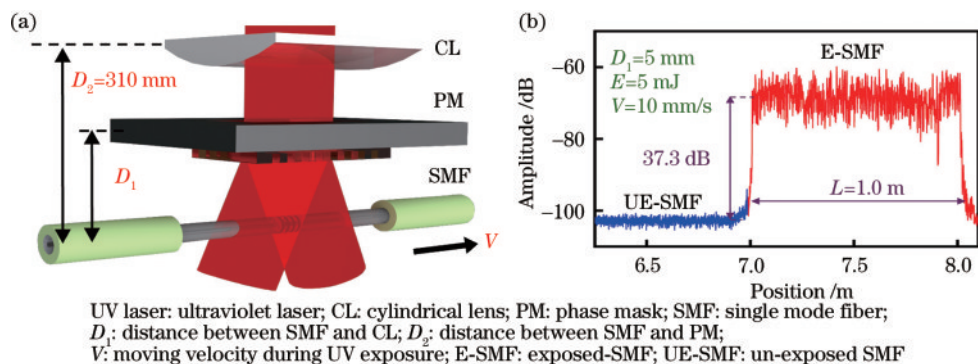


图 2 紫外激光曝光法增强标准单模光纤瑞利散射<sup>[17]</sup>。(a)紫外激光曝光法的曝光区域示意图;(b)最优曝光参数下获得的瑞利散射增强单模光纤的增益谱图

Fig. 2 Rayleigh scattering of standard single-mode fibers is enhanced by UV laser exposure<sup>[17]</sup>. (a) Schematic diagram of exposure area of UV laser exposure method; (b) Gain spectrum of Rayleigh scattering enhanced single mode fiber with optimal exposure parameters

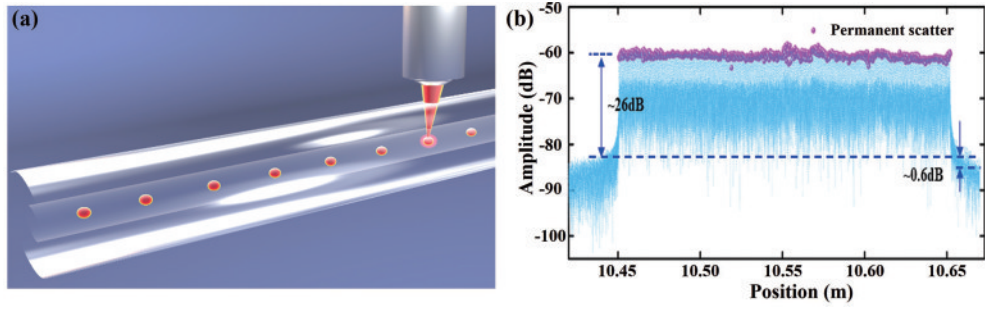


图3 采用飞秒激光自聚焦法在单模光纤中制备弱散射点阵列<sup>[11]</sup>。(a)弱散射点阵列加工示意图；  
(b)获得的弱散射点阵列瑞利散射增益谱图

Fig. 3 Fabrication of weak scattering point array (WSPA) in SMF using femtosecond laser self-focusing technique<sup>[11]</sup>. (a) Schematic diagram of WSPA processing; (b) obtained Rayleigh scattering enhanced spectrum of WSPA

$$b = a \tan \left[ 2 \left( z_L - y z_R, \sqrt{(x_L - x_R)^2 + (y_L - y_R)^2} \right) \right], \quad (11)$$

$$z_i = R \times i \times \sin b + z_R, \quad (12)$$

3) 纤芯自动聚焦。控制位移平台移至步骤2)中计算得到位置坐标,利用CCD捕获纤芯显微图像,结合纤芯上下边界峰值大小、峰值间距和半高全宽等参数控制纤芯径向位置微调,实现纤芯的自动聚焦。开启激光,将能量为1.75 μJ的单脉冲激光通过100倍油浸物镜聚焦在长度为20 cm的单模光纤上,并制备了860个弱散射点阵列,实现了26 dB的散射增益,其中散射点间隔为0.23 mm,插入损耗为0.6 dB,结合散射点辅助的相位型OFDR解调技术,实现空间分辨率为0.23 mm的分布式应变传感。

在单模光纤弱散射点阵列的制备基础上,该课题组进一步提出利用飞秒激光微加工技术,在长度为40 cm的多芯光纤的每个纤芯中刻写弱散射点阵列,增强多芯光纤的瑞利散射,其中散射点间隔为0.2 mm,每个纤芯散射点个数为1995,一共有13965个散射点<sup>[18]</sup>。结合Bishop框架和相位型OFDR解调技术,解决了光纤形状重构中的曲线不连续问题,实现基于多芯光纤弱散射点阵列的二维和三维形状传感,空间分辨率高达0.2 mm,且二维和三维曲线重构位置相对误差最小,分别为2.21%、1.45%。

同时,利用飞秒激光微加工技术结合光纤拖动系统,首次在长为1 m的单模光纤集成数量大于1000个、间隔为1 mm、插入损耗为0.0009 dB的光纤微腔阵列,其微腔由瑞利散射增益(反射强度)为55 dB、间隔为100 μm的两个弱散射点构成<sup>[19]</sup>,如图5所示。图5中,TLS为可调谐激光光源;PC为偏振控制器;PBS为偏振分束器;BPD为平衡光电探测器; $I_N$ 为入射光; $R_i$ 、 $L$ 、 $d$ 分别为弱散射点、散射点间隔和微腔间隔。研究了不同激光能量、聚焦位置和微腔腔长(弱散射点间隔)下的瑞利散射增益,结合OFDR技术,实现反射光谱的解调,并实现1000 °C的高精度分布式高温传感。

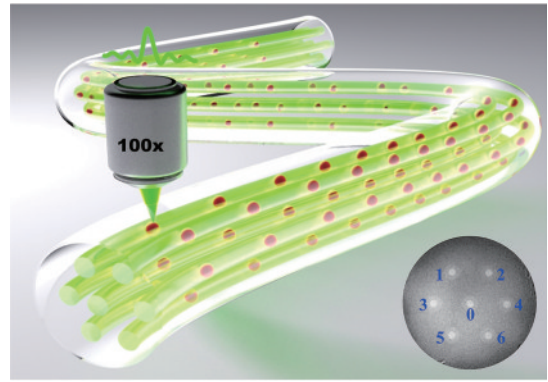
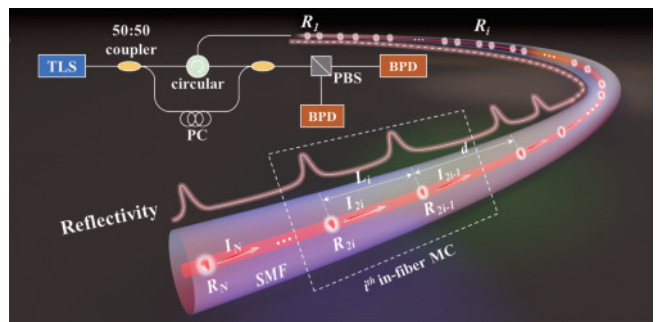


图4 采用飞秒激光自聚焦法在多芯光纤每个纤芯中制备弱散射点阵列<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Fabrication of weak scattering point array (WSPA) in each core of multicore fiber using femtosecond laser self-focusing technique<sup>[18]</sup>



TLS: tunable laser source; PC: polarization controller; SMF: single mode fiber; PBS: polarization beam splitter; BPD: Balanced photodetector

图5 采用飞秒激光微加工技术制备的微腔阵列<sup>[19]</sup>

Fig. 5 Micro-cavity arrays fabricated by femtosecond laser micro-machining technology<sup>[19]</sup>

### 3.1.3 飞秒激光制备弱反射光纤光栅阵列

弱反射光纤光栅是指反射率低于0.01%的光纤光栅,其反射光强大于瑞利散射光强。因此,在光纤中制备弱反射光纤光栅阵列,可有效提高传感信号信噪比。目前,制备弱反射光纤光栅阵列的方法主要采用拉丝塔相位掩模板<sup>[20]</sup>和Talbot在线刻栅系统<sup>[21]</sup>。但该系统体积庞大、造价昂贵,且相位掩模板波长固

定,只能制备相同波长的光栅。剥离涂覆层在线刻栅的方法增加了系统的复杂性,容易造成光纤损伤甚至断裂。飞秒激光微加工技术可透过光纤涂覆层,几乎适用于所有类型的光纤,不需要光纤具有光敏性和载氢处理。

2021年,深圳大学 Xu<sup>[22]</sup>设计并搭建了基于飞秒激

光逐点法的串联集成光栅阵列半自动制备系统,激光聚焦和光栅制备在程序控制下自动完成,然后手动拖动光纤制备下一个光栅。利用该系统在长为 2 m 的标准单模光纤上半自动制备了 200 个全同弱反射光栅阵列,光栅间隔为 10 mm。光纤光栅反射率为 -45 dB (0.0032%),光栅长为 1 mm,光栅阶数为 120。

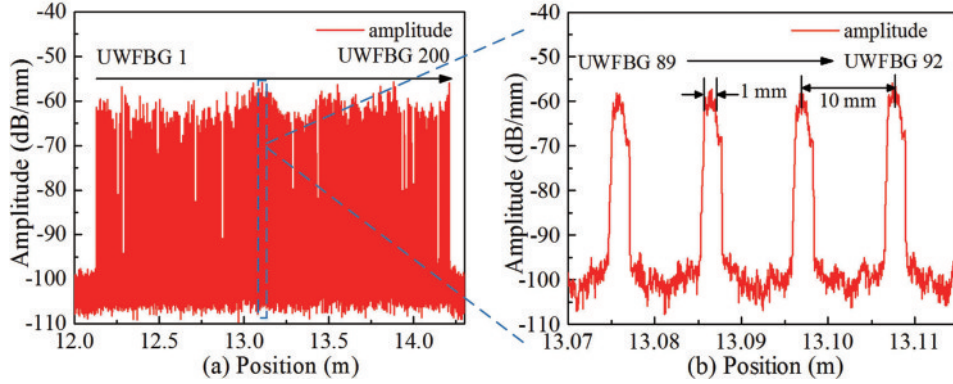


图 6 采用飞秒激光微加工技术制备的弱反射光纤光栅阵列<sup>[22]</sup>。(a)200 个全同弱反射光纤光栅阵列距离域谱图;  
(b)第 89 到 92 个光栅的局部放大图

Fig. 6 Fabrication of weak fiber Bragg grating (WFBG) array in SMF using femtosecond laser technology<sup>[22]</sup>. (a) Distance domain spectra of 200 identical WFBG; (b) enlarged view of the 89th to 92nd grating

### 3.2 数据后处理方法提升 OFDR 传感性能

为解决光源相位噪声和扫频非线性对 OFDR 传感性能的影响,多种数据后处理方法应运而生。2007 年,上海交通大学 Fan<sup>[23]</sup>提出了相位噪声补偿的光频域反射仪(PNC-OFDR),利用外调制的方法产生线性扫频光,再利用结联生成相位的方法,得到适用于长距离测量的参考信号,实现了 40 km 传感距离下 5 cm 的空间分辨率<sup>[24]</sup>。2013 年,天津大学 Liu<sup>[25]</sup>提出利用去斜滤波法补偿光源非线性调谐,实现了 80 km 测量距离下 1.6 m 的空间分辨率性能。2017 年,上海交通大学 Wang<sup>[26]</sup>利用注入锁定技术和级联四波混频提高了外调制扫频光范围,实现了 2 km 传感距离下 1.1 mm 的空间分辨率。2019 年,河北科技大学 Luo<sup>[27]</sup>提出利用距离域补偿法实现了 0.5 mm 空间分辨率的温度和应变传感。2020 年,北京理工大学 Feng<sup>[28]</sup>提出利用高阶光锁相环辅助的商用光纤激光器作为线性扫频光源,有效优化了频率啁啾范围和速率,实现了 242 km 传感距离下 4.3 cm 的空间分辨率。2022 年,重庆大学 Yin<sup>[29]</sup>利用主干干涉仪中反射端面信号补偿光源非线性调谐,实现了空间分辨率为 3.8 cm 的温度和应变传感。深圳大学 Wang<sup>[30]</sup>也提出利用瞬时光频域重采样法、距离补偿(DC)结合图像小波去噪法<sup>[7]</sup>提升 OFDR 传感性能。

#### 3.2.1 瞬时光频域后处理方法

为了提取辅助干涉仪中光源非线性扫频的信息,对比研究了过零点重采样和瞬时光频域法。过零点重采样法消除光源非线性扫频是利用辅助信号中提取的幅值接近零且相位上具有等间隔的采样点序列对测量

信号插值,将其校准为等时间间隔下等光频信号,如图 7(a)所示。首先,提取辅助信号中幅值最接近零的采样点序列;然后,利用傅里叶插值填充采样点数提高被提取零点的精度;最后,利用提取的零点序列对测量信号进行 3 次插值,得到补偿后的信号,消除光源非线性效应。

瞬时光频率重采样法消除光源非线性扫频是直接由辅助信号中获得光源的实际瞬时光频率(IOF)。如图 7(b)所示,光源为非线性扫频,其扫描速率  $\gamma$  为一个定值,即瞬时光频域是非线性的。为了提取光源的实际瞬时光频域,利用希尔伯特变换将辅助信号转换为复数信号,即

$$E(t) = U(t) + j \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(t)}{t - \mu} d\mu = U(t) + jH[U(t)], \quad (13)$$

式中:  $H$  为希尔伯特变换算子;  $U(t)$  为拍频干涉信号强度。光源瞬时相位可表示为

$$\phi(t) = 2\pi\tau_z\gamma t = \arctan \left\{ \frac{H[U(t)]}{[U(t)]} \right\}, \quad (14)$$

从辅助信号中得到的光源实际瞬时光频域  $f$  可表示为

$$f(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi\tau_z} = \gamma t, \quad (15)$$

具体步骤如下:首先,利用式(15)得到的瞬时光频域  $f$  替换测量信号  $U_1(t)$  中的自变量  $t$ , 即可得到新测量信号  $U_2(f)$ ; 然后,将非线性瞬时光频域  $f$  重新排列为线性瞬时光频域  $f_1$ ; 最后,利用  $f_1$  对新测量信号

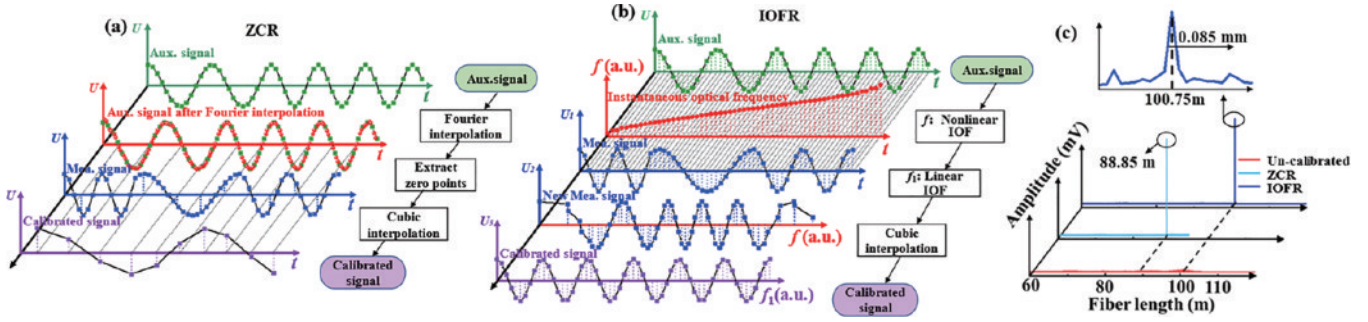


图 7 过零点重采样法和瞬时光频域法消除光源非线性扫频<sup>[30]</sup>。(a)过零点重采样法原理图；(b)瞬时光频率重采样法原理图；(c)采用未补偿、过零点重采样和瞬时光频率重采样法得到被测光纤瑞利散射谱图

Fig.7 Zero crossing resampling(ZCR) method and instantaneous optical frequency domain(IOFR) method eliminate nonlinear frequency sweep of light source<sup>[30]</sup>. (a) Schematic diagram of ZCR method; (b) schematic diagram of IOFR method; (c) obtained Rayleigh scattering spectra of optical fiber under test using uncompensated method, zero-crossing resampling method and instantaneous optical frequency resampling method

$U_2(f)$  进行 3 次插值,即可得到校正后的信号  $U_3(t)$ 。

虽然,过零点重采样和瞬时光频率重采样法原理上相同,但过零点重采样存在取零误差和辅助信号频率过小时引起的零点序列数量不够的问题。如图 7(c)所示,当辅助干涉仪和主干涉仪的延时光纤长度分别为 94.8 和 100.75 m 时,过零点重采样法出现了位置定位错误;瞬时光频率重采样法在传感距离为 100.75 m 位置处,观察到光纤末端端面反射峰强度下降 3 dB 后对应的空间分辨率为 0.085 mm 的反射峰,很好地补偿了光源的非线性扫频。

### 3.2.2 距离补偿结合图像小波去噪后处理方法

瑞利散射谱局部相似法和 Morlet 小波变换法都是对传感数据进行一维处理,只是对光纤每个位置处测量的局部光谱进行处理,忽略了传感信息在多维域中包含的冗余和相关性,即时间、频率及位置中的重复信号。基于二维图像处理技术的图像去噪法能有效提升 OFDR 的性能,即将传统处理方法中的参考信号和测量信号互相关结果构造二维图像,以传感位置信息与频谱偏移信息为轴组成图像,并对构造的二维图像采用小波去噪法进行去噪处理并保留有效原始图像信息,实现高空间分辨率的分布式应变传感<sup>[31]</sup>。OFDR 分布式应变传感时,传感光纤存在拉伸作用,会导致参考信号与测量信号距离域出现空间失配问题,进而无法识别高空间分辨率下的应变拉伸<sup>[32]</sup>。因此,为了保持瑞利散射光谱的互相关振幅强度,提出利用距离补偿结合图像小波去噪后处理方法提升 OFDR 应变传感性能,具体流程如图 8 所示。首先,利用快速傅里叶变化(FFT)将参考信号和测量信号 P/S 偏振态瑞利散射信号转化为沿光纤长度方向的空间域信号;其次,沿光纤长度方向滑动取窗,并分别记录参考信号和测量信号空间域位置为  $R_i$  和  $M_{i-j} - M_{i+j}$ ;然后,利用傅里叶逆变化(IFTT)将参考和测量空间域信号同一位置的 P/S 偏振态瑞利散射光谱进行矢量求和,以消除瑞利散射光谱偏振效应的影响;然后,对参考信号和测

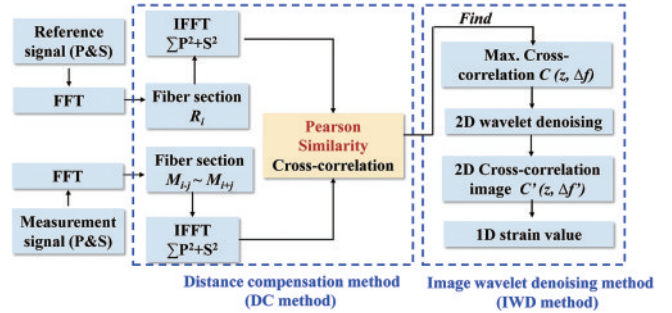


图 8 距离补偿结合图像小波去噪后处理方法的流程示意图<sup>[7]</sup>  
Fig.8 Flow chart of the post-processing method based on combining distance compensation and image wavelet denoising<sup>[7]</sup>

量信号进行互相关计算,得到互相关峰漂移值,即为瑞利散射光谱漂移量,构建以传感位置和频谱偏移组成的图像二维矩阵  $C(z, \Delta f)$ ;然后,对其进行归一化处理将其数据类型由 double 变为 unit8,通过距离补偿和图像小波去噪算法获得的优化图像二维矩阵  $C'(z, \Delta f')$ ,其中,  $\Delta f'$  为优化后的互相关漂移量;最后,将优化后的二维图像重新恢复为一维数据互相关光谱漂移量,即可得到瑞利散射光谱漂移量。此外,对比传统互相关算法和基于欧几里得、余弦、皮尔逊(Pearson)距离补偿算法的互相关漂移和幅值。

## 4 OFDR 传感应用研究进展

OFDR 传感凭借其高空间分辨率和分布式测量等特点,可以很好地满足众多应用场景的需求,其在温度、应变和三维形状传感方面的研究得到了国内外研究学者广泛关注。

### 4.1 温度传感

OFDR 分布式温度传感在监测飞行过程中涡轮叶片领域有潜在应用前景。2013 年, Li<sup>[33]</sup> 利用光的偏振效应,搭建 OFDR 系统测量温度变化前后瑞利散射光偏振的改变,在 170 m 创安光纤上实现了温度精度为

±0.81 °C 的分布式温度传感。2015 年,使用 2 种不同功能涂覆层的光纤,结合 OFDR 技术实现了超导输电线在低温下的温度传感<sup>[34]</sup>。2016 年,Luna 公司开发的 OFDR 样机,实现了 50 m 传感距离下 0.2 °C 测量精度的温度传感。2017 年,Xin 利用 OFDR 结合光纤光栅阵列的方法,解决了多反射串扰问题,实现了 1.5 mm 空间分辨率下 1 °C 测量精度的分布式温度传感<sup>[35]</sup>。2019 年,Suo<sup>[36]</sup> 提出利用滑动窗口选取位置信息补偿优化算法,实现精度为 0.9 °C 的温度传感。

2021 年,深圳大学 Xu 等<sup>[22]</sup> 提出利用飞秒激光逐点法在单模光纤中制备全同弱反射光栅阵列提高传感信号信噪比(光栅周期为 64.2 μm、光栅阶数为 120、谐振峰波长为 1550 nm、反射率为 0.0032%、集成光栅数量为 200),结合 OFDR 波长解调方法,实现了传感长度为 2 m、分辨率为 10 mm、温度测量范围为 1000 °C 的分布式高温传感。2022 年,深圳大学 Du 等<sup>[19]</sup> 利用单模光纤制备的全同光纤微腔阵列(微腔腔长为 100 μm,自由光谱范围为 1018 GHz,反射率为 0.000316%,集成微腔数量为 1000),结合 OFDR 波长解调技术,实现了传感长度为 1 m、分辨率为 1 mm、温度测量范围为 1000 °C 的分布式高温传感,其温度精度高达 0.2 °C,如图 9 所示。

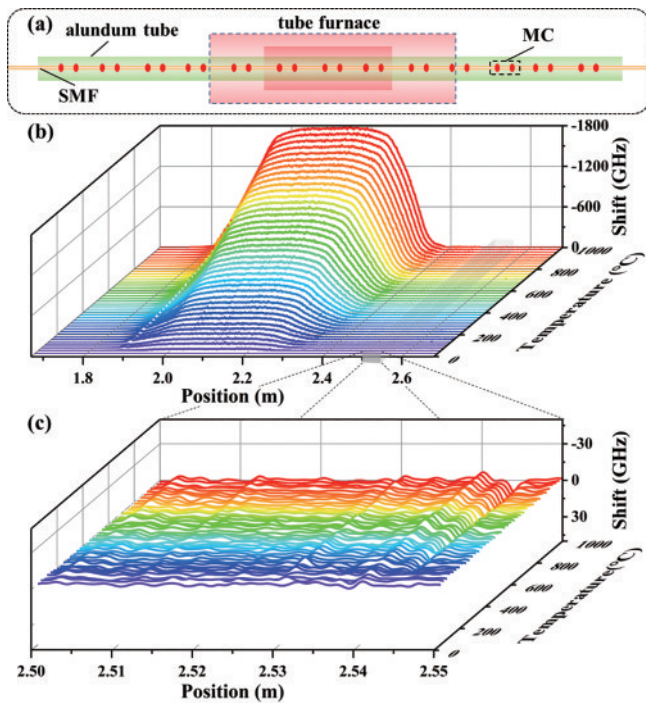


图 9 利用光纤微腔阵列进行分布式高温传感<sup>[19]</sup>。(a) 光纤微腔阵列在高温炉中的位置分布示意图;(b) 微腔阵列随温度变化的频谱漂移;(c) 2.50~2.55 m 区域的温度变化

Fig. 9 Distributed high temperature sensing based on obtained weak micro-cavity array (WMCA)<sup>[19]</sup>. (a) Schematic of WMCA placed in the tube furnace; (b) measured optical frequency shift of WMCA with temperature change; (c) temperature variation in areas from 2.50 to 2.55 m

2022 年,Zhong 等<sup>[30]</sup> 提出利用瞬时光频域算法消除可调谐激光光源的非线性效应,基于未经处理的标准单模光纤实现了传感距离为 100.75 m、分辨率为 2.5 mm 的 600 °C 分布式高温传感,并对比了未退火和退火后光纤的温度灵敏度和稳定性。进一步提出利用传感光纤端面反射信号补偿激光器非线性调谐效应,简化 OFDR 系统,空间分辨率为 4 mm 时其测量距离可达 295 m,应用于分布式温度传感时分辨率高达 3 mm,而传统 OFDR 空间分辨率为 8 mm<sup>[37]</sup>。

#### 4.2 应变传感

OFDR 分布式应变传感在土木建筑结构健康监测、复合材料疲劳检测等领域有着极为广泛的发展前景。但 OFDR 应变传感仍存在一些亟需解决的关键问题,如光纤后向瑞利散射弱引起的低信噪比、应变分辨率和传感空间分辨率之间相互制约、大应变拉伸导致参考光谱和测量光谱空间失配难以实现高空间分辨率大应变传感等问题,限制了 OFDR 分布式应变传感的空间分辨率和测量范围。2014 年,Song<sup>[38]</sup> 利用 3 次样条插值法对数据重采样补偿非线性效应,实现了 300 m 传感距离下 0.3 mm 空间分辨率的温度和应变传感。2018 年,Feng 提出利用瑞利散射谱局部相似法,抑制大应变下互相关的错峰或多峰,实现了 3 mm 传感空间分辨率下 3000 με 的应变传感。随后,提出利用最小二乘法相似评价函数取代互相关运算,在 10 nm 扫频范围、3 mm 传感空间分辨率下,实现了 3000 με 的应变传感,且解调时间缩短了 10 倍。2019 年,Zhao<sup>[39]</sup> 提出利用小波去噪、非局部平均算法以及均值滤波等图像去噪方法,在 10 m 传感光纤下实现了 0.4 mm 的空间分辨率传感。2021 年,山东大学渠帅<sup>[31]</sup> 提出利用二维小波图像去噪和高斯滤波的方法实现 4 mm 传感空间分辨率下 7000 με 的应变传感。

2021 年,深圳大学 Du<sup>[17]</sup> 提出利用紫外激光离焦曝光法增强光纤后向瑞利散射(瑞利散射增益为 37.3 dB,插入损耗为 0.06 dB/m),基于瑞利散射增强型光纤实现了 2 mm 空间分辨率下 2000 με 的分布式应变传感,标准单模光纤在相同空间分辨率下只能达到 800 με,其应变传感精度较标准单模光纤提升了 4 倍,如图 10 所示。进一步提出基于递归距离补偿技术的 OFDR 信号匹配法,通过计算互相关频移补偿距离域上的测量光谱,实现参考光谱与测量光谱的重新匹配,并结合紫外曝光瑞利散射增强型光纤,实现了 1.5 mm 分辨率下 9000 με 的大应变传感。2022 年,Meng<sup>[11]</sup> 提出利用飞秒激光直写法在单模光纤上制备弱散射点阵列提高传感信号信噪比(散射点间隔为 0.23 mm、瑞利散射增益为 26 dB、插入损耗为 0.6 dB),结合 OFDR 相位解调技术,实现了 0.23 mm 空间分辨率下 1400 με 的分布式应变传感,其传感精度为 2.85 με。

此外,深圳大学 Li<sup>[7]</sup> 提出利用距离补偿结合二维



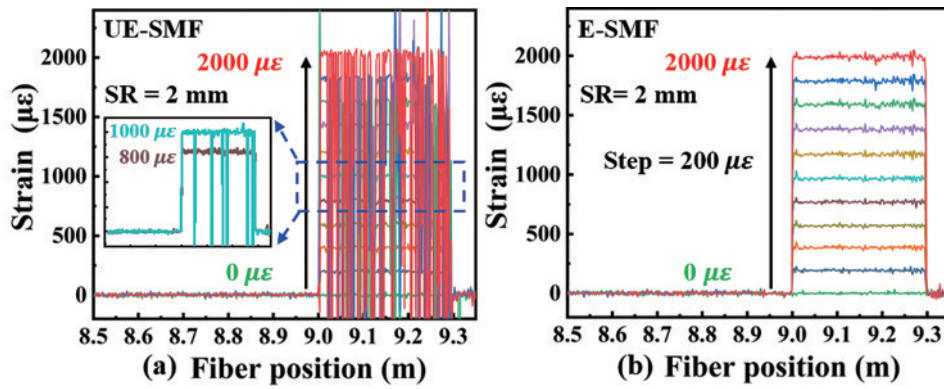


图 10 基于标准单模光纤和紫外曝光瑞利散射增强型光纤的分布式应变传感<sup>[17]</sup>。(a)标准单模光纤应变传感;(b)紫外曝光瑞利散射增强型光纤应变传感

Fig. 10 Distributed strain sensing based on standard single-mode fiber and UV-exposed Rayleigh scattering enhanced fiber<sup>[17]</sup>. (a) Standard single-mode fiber strain sensing; (b) UV-exposed Rayleigh scattering enhanced fiber strain sensing

图像小波去噪的后处理算法,在长为 25 m 的单模光纤上,研究了距离补偿方法中不同相似性的互相关强度,实现了 2.56 mm 空间分辨率下 2000  $\mu\epsilon$  的分布式应变传感,其应变精度为 20  $\mu\epsilon$ ,较传统补零重叠取窗法提升了 4 倍。进一步利用该方法成功实现了带涂覆层和未带涂覆层沿光纤轴向的杨氏模量分布,测得长度为 50 cm 光纤,其杨氏模量分别为  $13.75 \pm 0.14$  GPa 和  $71.63 \pm 0.43$  GPa。该技术可用于监测光纤损伤程度,未来有望应用于智能结构中<sup>[40]</sup>。

### 4.3 三维形状传感

精准介入诊疗、变体飞行器和连续体机器人等领域亟需三维形状传感器实现空间位置及姿态的高精度、高空间分辨率的原位测量和实时显示。光纤三维形状传感器可以测量光纤或与之相连待测物体的姿态、取向、径迹及位置等三维空间信息。多芯光纤独特的纤芯排布及不同纤芯并行传播互不干扰的特性,使多芯光纤作为三维形状传感器具有不可比拟的技术优势。OFDR 技术凭借其在短距离下的高空间分辨率与测量精度,在光纤形状测量上成为最有潜力的方式之一。

2007 年, Duncan 等<sup>[41]</sup>采用 OFDR 技术实现了基于后向瑞利散射的三维形状传感,其测量误差低至 0.3 mm,验证了基于光纤固有瑞利散射的 OFDR 技术可实现三维形状传感,并指出提高传感信号强度可有效提高三维形状传感精度。2012 年, Moore 等<sup>[42]</sup>利用刻有光纤光栅阵列的四芯光纤基于 Frenet-Serret 框架实现了三维形状重构和传感,但因多芯光纤自身扭曲使其形状重构误差高达 7.2%。2017 年,加拿大蒙特利尔理工学院通过紫外曝光的方式增强光纤瑞利散射强度的方式提高测量信噪比,实现了穿刺针末端平均测量精度提升 47%,并将其用于体外血管模型进行了导管的三维形状传感<sup>[43]</sup>。2019 年, Khan 等<sup>[44]</sup>利用刻有 FBG 阵列的四芯光纤实现了医疗导管的三维形状传感,最大形状误差为 1.05 mm。2019 年, Barrera 等<sup>[45]</sup>

对比研究了载氢和未载氢的七芯光纤光栅阵列在伽马射线照射下三维形状传感的特性,显示伽马射线照射后的七芯光纤光栅阵列频移是未载氢的 10 倍,研究表明可通过伽马射线照射提高其三维形状传感分辨率和精度。2021 年, Khan<sup>[46]</sup>对比研究了刻有光栅阵列标准七芯光纤、螺旋七芯光纤的曲率、扭转和形状传感特性。2021 年, Idrisov<sup>[47]</sup>利用白光干涉方法测量了七芯光纤每个纤芯的位置,并将其作为校正参数,将曲率误差从 0.89% 降低至 0.5%,精度提高 44%。2021 年,深圳大学 Meng<sup>[18]</sup>提出了一种基于向量投影的多芯光纤三维形状传感技术,该方法仅利用多芯光纤的两个外芯结合 Frenet-Serret 算法实现了三维曲线重构和显示,曲率半径误差为 1.70 mm,弯曲方向误差为 2.84°、末端位置最大测量误差为 11.9 mm,如图 11 所示。该方法降低了三维形状传感所需纤芯的数量,减少了完成一次形状重构所用的时间,提高了形状传感的响应频率。

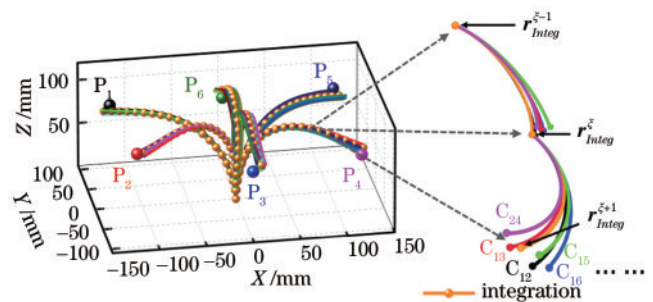


图 11 基于向量投影的多芯光纤三维形状传感技术<sup>[18]</sup>

Fig. 11 Multi-core fiber 3D shape sensing technology based on vector projection<sup>[18]</sup>

2022 年,深圳大学 Xiao<sup>[48]</sup>利用飞秒激光逐点法和图像识别技术成功在多芯光纤的每个纤芯中制备波分复用光纤光栅阵列,其中,波分复用节点为 20 个、光栅总数为 140 个、阵列总长度为 440 mm,该多芯光纤光栅具有明显的弯曲方向相关性,其最大弯曲灵敏度可达  $55.49 \text{ pm/m}^{-1}$ 。利用该多芯光纤光栅阵列实现了

二维和三维形状传感,其最大重构误差分别为 4.51% 和 10.81%。

## 5 结 论

OFDR 技术凭借其测量精度高、空间分辨率高的特点,在短距离测量与传感中具有显著优势。然而,光纤后向瑞利散射较弱引起传感信号信噪比较低、光源非线性调谐问题限制了 OFDR 传感空间分辨率、测量范围、测量精度和传感距离等指标的提升。针对光纤瑞利散射较弱的问题,重点介绍了光纤后处理技术,即利用紫外激光曝光增强光纤瑞利散射,飞秒激光微加工技术制备弱散射点阵列、微腔阵列和弱反射光栅阵列的制备系统和技术。针对光源非线性调谐,重点介绍了瞬时光频域法、距离补偿结合图像小波去噪 2 种后处理方法。进一步利用光纤后处理技术的散射增强型光纤,实现了温度、应变和三维形状传感,在机翼健康监测和临床医疗等短距离、高空间分辨率场景展示出极大的应用潜力。未来,随着机理研究和工艺技术的进步,OFDR 分布式传感系统将快速迈向实用化。

## 参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [3] Hopkins H H, Kapany N S. A flexible fibrescope, using static scanning[J]. Nature, 1954, 173(4392): 39-41.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1072.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kreger S T, Sang A K, Gifford D K, et al. Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7316: 73160A.
- [10] Beisenova A, Issatayeva A, Korganbayev S, et al. Simultaneous distributed sensing on multiple MgO-doped high scattering fibers by means of scattering-level multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3413-3421.
- [11] 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.
- [12] Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers[J]. Laser & Photonics Review, 2008, 2(4): 275-289.
- [13] Lu P, Mihailov S J, Coulas D, et al. Low-loss random fiber gratings made with an fs-IR laser for distributed fiber sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4697-4702.
- [14] Yan A D, Huang S, Li S, et al. Distributed optical fiber sensors with ultrafast laser enhanced Rayleigh backscattering profiles for real-time monitoring of solid oxide fuel cell operations[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-9.
- [15] Loranger S, Gagné M, Lambin-Iezzi V, et al. Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-7.
- [16] 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. Research on key technologies and applications of distributed sensing based on discrete reinforced fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Lindner E, Hartung A, Hoh D, et al. Trends and future of fiber Bragg grating sensing technologies: tailored draw tower gratings (DTGs)[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9141: 91410X.
- [21] Guo H Y, Tang J G, Li X F, et al. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 030602.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Centimeter-level spatial resolution over 40 km realized by bandwidth-division phase-noise-compensated OFDR[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19122-19128.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 渠帅. 基于 OFDR 分布式光纤传感系统的数据处理及性能提升研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.  
Qu S. Research on data processing and performance Improvement of distributed optical fiber sensing system based on OFDR[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [32] 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.
- [33] Li W H, Chen L, Bao X Y. Compensation of temperature and strain coefficients due to local birefringence using optical frequency domain reflectometry[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 26-32.
- [34] Chiuchiolo A, Palmieri L, Consales M, et al. Cryogenic-temperature profiling of high-power superconducting lines using local and distributed optical-fiber sensors[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4424-4427.
- [35] Xin G, Li Z Y, Fan W, 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.
- [36] Suo L J, Lei Z K, Zhao S Y, et al. Study on sliding-window length based on Rayleigh backscattering spectrum correlation in distributed optical-fiber strain measurement [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47: 126-132.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Li P F, Fu C L, Zhong H J, et al. A nondestructive measurement method of optical fiber young's modulus based on OFDR[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1450.
- [41] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6530: 487-497.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Khan F, Denasi A, Barrera D, et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5878-5884.
- [45] Barrera D, Madrigal J, Delepine-Lesoille S, et al. Multicore optical fiber shape sensors suitable for use under gamma radiation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29026-29033.
- [46] Khan F, Barrera D, Sales S, et al. Curvature, twist and pose measurements using fiber Bragg gratings in multi-core fiber: a comparative study between helical and straight core fibers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 317: 112442.
- [47] Idrisov R, Floris I, Rothhardt M, et al. Characterization and calibration of shape sensors based on multicore optical fibre[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61: 102319.
- [48] Xiao X Z, Xu B J, Xu X Z, et al. Femtosecond laser auto-positioning direct writing of a multicore fiber Bragg grating array for shape sensing[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 758-761.