

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508637

# 光频域反射中非线性补偿技术研究进展\*

柯程虎<sup>1</sup> 金熙<sup>2</sup> 祝战科<sup>3,4</sup> 柯熙政<sup>2,4,5</sup>

(1. 西安文理学院信息工程学院 西安 710048; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048;

3. 陕西工业职业技术大学 咸阳 712000; 4. 咸阳市智能制造设备技术重点实验室 咸阳 712000;

5. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710048)

**摘要:**光频域反射技术(optical frequency-domain reflectometry, OFDR)通过将光频扫描非线性转化为可补偿的相位误差,结合频域信号处理,实现厘米级空间分辨率与长距离测量的统一,已成为光纤诊断与精密测量的核心技术之一。但可调谐激光扫频的非线性及相位噪声会影响系统的等频率采样,引起反射展宽和距离偏差,因此,非线性补偿成为提升系统性能的关键。非线性补偿的研究主要从硬件和算法两方面展开,一方面,通过调整系统的硬件结构,实现等频率间隔采样,在前端抑制扫频非线性并兼顾量程与分辨率。另一方面,在数字信号处理层面,通过使用各种算法在无需附加复杂光路的情况下改善空间分辨率和信噪比。对 OFDR 传感、解调等基本原理进行介绍,对空间分辨率、传感距离等影响 OFDR 系统性能的因素进行分析,着重整理了在提升 OFDR 系统性能关键技术的研究进展,最后提出 OFDR 所存在的问题以及展望了未来的发展趋势。

**关键词:**光频域反射;非线性补偿;光纤传感;空间分辨率;传感距离

**中图分类号:** TN253; TP212.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Research progress on nonlinear compensation technology for optical frequency domain reflectometer

Ke Chenghu<sup>1</sup> Jin Xi<sup>2</sup> Zhu Zhanke<sup>3,4</sup> Ke Xizheng<sup>2,4,5</sup>

(1. School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710048, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Polytechnic University, Xianyang 712000, China; 4. Xianyang Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Xianyang 712000, China; 5. Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Optical frequency domain reflectometry (OFDR) technology has become one of the core technologies for fiber optic diagnosis and precision measurement. It converts the nonlinearity of optical frequency scanning into compensable phase errors and combines frequency domain signal processing to achieve centimeter level spatial resolution and long-distance measurement. However, the nonlinearity and phase noise of tunable laser frequency scanning can affect the equal frequency sampling of the system, causing reflection broadening and distance deviation. Therefore, nonlinear compensation becomes the key to improving system performance. The research on nonlinear compensation mainly focuses on two aspects: hardware and algorithm. On the one hand, by adjusting the hardware structure of the system, equal frequency interval sampling can be achieved to suppress sweep nonlinearity at the front end while considering range and resolution. On the other hand, at the level of digital signal processing, various algorithms are used to improve spatial resolution and signal-to-noise ratio without the need for additional complex optical paths. This article will introduce the basic principles of OFDR sensing and demodulation, analyze the factors that affect the performance of OFDR systems such as spatial resolution and sensing distance, and focus on summarizing the research progress of key technologies in improving the performance of OFDR systems. Finally, the problems existing in OFDR and the future development trends are proposed.

**Keywords:** optical frequency domain reflectometer; nonlinear compensation; fiber optic sensing; spatial resolution; sensing distance

收稿日期: 2025-08-05 Received Date: 2025-08-05

\* 基金项目: 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、国家自然科学基金面上项目(61377080)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-562)、陕西数理基础科学研究项目(23JSQ024)资助

## 0 引言

随着传感技术的持续演进,信息技术和人工智能也得以加速发展。作为信息获取的关键手段之一,各类传感器在智能制造<sup>[1-2]</sup>、智慧城市<sup>[3-5]</sup>、环境监测<sup>[6-7]</sup>等诸多应用场景中扮演着核心角色。传感器类型丰富,主要包括化学传感器<sup>[8-9]</sup>、电学传感器<sup>[10-12]</sup>、力学传感器<sup>[13-15]</sup>以及光学传感器<sup>[16-17]</sup>。其中,光学类传感器中的光纤传感器因其体积紧凑、具备抗腐蚀性和电磁屏蔽能力,且可适用于复杂环境并支持远程数据采集与传输,因而在环境监测、边防防护、结构健康监测、医学诊断、生物化学工程及工业自动化等领域被广泛采用<sup>[18]</sup>。分布式光纤传感(distributed optical fiber sensing, DOFS)作为光学传感领域的重要方向,与传统的电学或点式光学传感器相比,具有更长的监测距离和更多的感知节点<sup>[19]</sup>。该技术利用光纤本体作为传感介质,通过分析光纤中散射点产生的背向散射信号,实现对温度、应变等物理量的实时监测<sup>[20-21]</sup>。

在光纤制造过程中,由于环境温度、压力变化以及微量杂质的掺入,会导致光纤内部产生微小的不均匀性变化,这些微结构尽管对通信影响有限,却成为散射型光纤传感的关键<sup>[22]</sup>。当激光信号传入光纤并遇到散射体时,会产生各个方向的散射光,其中逆向传播的称为背向散射,可由解调设备接收并分析其特征变化,从而实现目标物理参数的获取<sup>[23]</sup>。依据散射机制的不同,如瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射对不同物理量敏感性各异,发展出一系列基于不同散射原理的 DOFS 技术<sup>[24]</sup>。1977 年, Barnoski 等<sup>[25]</sup>首次提出光时域反射技术(optical time-domain reflectometry, OTDR),广泛应用于光通信网络测试,例如光纤连接器损耗、链路长度、衰减等参数的诊断,并能定位故障点。后续研究推动了多种衍生技术的发展,包括偏振光时域反射(P-OTDR)<sup>[26]</sup>、相位敏感型光时域反射( $\Phi$ -OTDR)<sup>[27]</sup>、拉曼散射型 OTDR(R-OTDR)<sup>[28]</sup>、受激布里渊散射型(BOTDA)<sup>[29]</sup>与自发布里渊散射型(BOTDR)<sup>[30]</sup>等。然而,受限于脉冲光特性,OTDR 技术在动态范围与空间分辨率之间存在固有矛盾,即增大脉冲能量提升动态范围时,会牺牲空间分辨率,从而限制了其在高精度场景中的应用<sup>[31]</sup>。为克服上述限制,频域分布式光纤传感因其具备高分辨率与大动态范围的优势而受到广泛重视。1981 年, Eickhoff 等<sup>[32]</sup>首次研究瑞利散射的频域响应,提出了光频域反射技术(optical frequency-domain reflectometry, OFDR),在数十至数百米的传感距离内实现了毫米级别的空间分辨率。随着技术不断推进,科研人员围绕提升 OFDR 系统的空间分辨能力和频率响应范围,提出了多种优化方案,进一步拓展了该技术的应用前景。

本文对 OFDR 系统的传感以及解调原理进行介绍,分析了影响 OFDR 系统性能的主要因素,对研究人员在提升 OFDR 系统性能所采取的优化方法进行总结,最后展望了 OFDR 未来的发展趋势。

## 1 OFDR 系统

### 1.1 传感原理

OFDR 技术的原理基于干涉仪结构与扫频光源的结合,用于产生拍频信号。图 1 所示为一个采用马赫-曾德尔干涉仪(mach-zehnder interferometer, MZI)结构的基本 OFDR 系统配置。来自可调谐激光光源(tunable laser source, TLS)的扫频光通过耦合器 A 被分为参考光和测量光。参考光经过设定光程的参考路径传输至耦合器 B,而测量光则沿测量路径进入被测光纤(fiber under test, FUT),并在其中产生背向散射光。耦合器 B 随后将参考光与背散射光重新合束,在光电探测器中形成拍频信号。该拍频信号经过分析处理后,可用于解调沿光纤不同位置处物理参数的变化<sup>[33]</sup>。拍频信号来自于两条不同光路的光信号之间所产生的拍频效应,其中一个光信号  $E_s(t)$  是来自 FUT 的背向散射光,包括瑞利散射光和菲涅耳反射光,另一个光信号  $E_r(t)$  则是来自参考路径的参考光。假设 TLS 具有线性光频调谐速率  $\gamma$ ,则参考信号  $E_r(t)$  可表示为<sup>[34]</sup>:

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

式中: $E_0$  为参考信号的幅值; $f_0$  为初始光的频率; $e(t)$  为相位噪声。

后向散射信号  $E_s(t)$  可写成:

$$E_s(t) = \sqrt{R(\tau)} E_0 \exp\{j[2\pi f_0(t - \tau) + \pi\gamma(t - \tau)^2 + e(t - \tau)]\} \quad (2)$$

式中: $R(\tau)$  为 FUT 的反射率衰减,与时延  $\tau$  相关。 $E_r(t)$  和  $E_s(t)$  之间的干扰产生的跳动信号  $I(t)$  可以写成:

$$I(t) = 2\sqrt{R(\tau)} E_0^2 \cos\left\{2\pi\left[f_0 \tau + \gamma \tau t + \frac{1}{2}\gamma \tau^2 + e(t) - e(t - \tau)\right]\right\} \quad (3)$$

最后一个相位项  $e(t) - e(t - \tau)$  是拍频信号中的相位噪声。拍频信号的频率  $f_b = \gamma \tau$ ,它与时间延迟  $\tau$  线性相关,因此与后向散射点和 FUT 起点之间的距离线性相关。所以,拍频频率  $f_b$  可以用于表征 FUT 后向散射点的位置。通过对拍频信号的不同频率段进行提取和分析,可以实现对 FUT 中不同位置反射信号的分段测量和空间物理量的分析。

### 1.2 解调原理

当光纤受到温度或应变变化的影响时,其有效折射率与物理长度都会发生改变,进而导致其内部瑞利散射

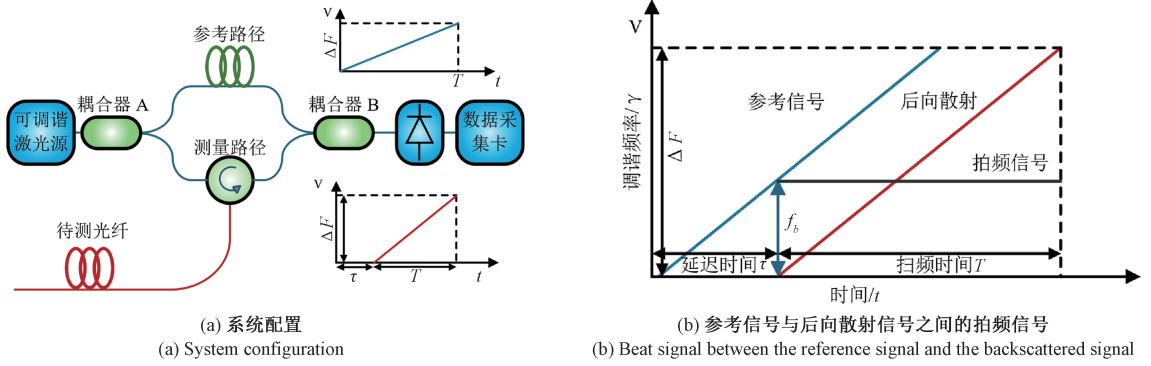


图1 传统 OFDR 系统<sup>[33]</sup>

Fig. 1 Traditional OFDR system<sup>[33]</sup>

光的中心波长产生漂移。该波长偏移量与温度变化量和应变变化量之间的比例,分别定义为温度灵敏系数  $K_T$  与应变灵敏系数  $K_\epsilon$ ,它们共同描述了光纤对外界扰动的响应特性,可表示为<sup>[35]</sup>:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = K_T \Delta T + K_\epsilon \Delta \epsilon \quad (4)$$

其中,  $\Delta\lambda$  为波长偏移量,  $\lambda_0$  为激光器扫描的中心波长。光纤中瑞利散射光谱波长因温度变化而发生漂移,主要归因于热光效应与热膨胀效应两种机制。热光效应是指光纤材料在温度升高时其折射率随之改变;而热膨胀效应则反映了温度变化导致光纤长度发生微小的物理伸缩。分别用  $\zeta$  表示光纤的热光系数,用  $\alpha$  表示其热膨胀系数,则可将温度灵敏度系数  $K_T$  表示为<sup>[35]</sup>:

$$K_T = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} + \frac{1}{n} \frac{\Delta n}{\Delta T} = \alpha + \zeta \quad (5)$$

以常见的掺锗石英光纤为例,其热光系数  $\zeta$  约为  $6.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,热膨胀系数  $\alpha$  约为  $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。由此计算得到该类型光纤的温度灵敏度系数  $K_T$  约为  $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。当中心波  $\lambda_0$  取 1 540 nm 时,对应的温度引

起的波长漂移率为  $K_T = 0.11 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

应变作用下,光纤瑞利散射光谱波长发生偏移,主要由两方面因素引起,一是光纤在外力作用下发生微小的弹性形变,二是应变通过弹光效应改变了光纤材料的折射率。记光纤的弹光系数为  $p_e$ ,应变灵敏度系数  $K_\epsilon$  可以表示为:

$$K_\epsilon = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta \epsilon} + \frac{1}{n} \frac{\Delta n}{\Delta \epsilon} = 1 - p_e \quad (6)$$

对于标准的掺锗石英光纤,其弹光系数  $p_e$  通常取值为 0.217。基于该参数,可以得到应变灵敏度系数  $K_\epsilon = 0.783/\mu\epsilon$ 。当光纤工作波长为  $\lambda_0 = 1\,540 \text{ nm}$  时,由应变所引起的波长漂移量约为  $K_\epsilon = 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

在 OFDR 分布式光纤传感中,进行温度或应变监测的前提是获取 FUT 在初始状态下的瑞利散射参考光谱。随后,当 FUT 受到温度或应变扰动时,实时采集其当前的瑞利散射光谱,作为测量谱。通过计算测量谱与参考谱之间的互相关函数,可准确确定其相对波长的偏移量,从而实现对环境变化的定量检测。图 2 为 OFDR 分布式光纤温度/应变传感信号解调流程。

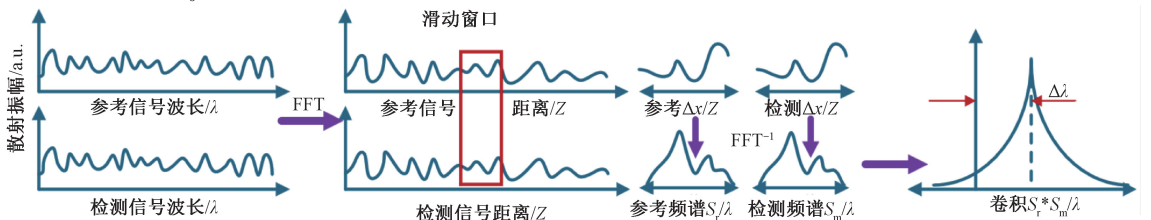


图2 OFDR 系统信号解调过程<sup>[35]</sup>

Fig. 2 Signal demodulation process of OFDR system<sup>[35]</sup>

### 1.3 OFDR 性能指标

#### 1) 空间分辨率

空间分辨率是衡量分布式光纤传感系统沿光纤轴向最小可识别位置变化的指标。分辨率越高,系统就越能精准捕捉光纤中物理参数(如温度或应变)沿长度方向

的微小变化,特别适用于存在剧烈温度梯度或对测量精度要求较高的应用环境。影响空间分辨率的关键因素包括所用光源的谱宽、光纤本身的色散特性以及信号采集与处理系统的响应性能等<sup>[36]</sup>。

OFDR 系统两个数据点之间的物理空间分辨率,根

据傅里叶变换原理和 OFDR 系统的理论模型分析,可表示为  $\Delta z$ <sup>[36]</sup>:

$$\Delta z = \frac{L\Delta f}{f} \quad (7)$$

其中,  $L$  表示待测光纤的总长度,  $\Delta f$  表示频谱的频率分辨率,  $f = 2\gamma L/v_g$  表示信号光与参考光之间的最大频率差,  $v_g$  是光在纤中传播的速度。OFDR 原始信号经傅里叶变换到频域时,其频率分辨率  $\Delta f$  与激光器总的扫描时间  $T$  之间的关系可以表示为  $\Delta f = 1/T$ 。空间分辨率还可以写为<sup>[36]</sup>:

$$\Delta z = \frac{\lambda^2}{2n\Delta\lambda} \quad (8)$$

或者可以写成另一种表达形式:

$$\Delta z = \frac{v_g}{2\Delta F} \quad (9)$$

式中:  $\Delta F = \gamma T$  表示激光器的频率扫描范围;  $\Delta\lambda$  表示激光器的波长扫描范围;  $\lambda$  和  $n$  是常量,分别表示激光器的中心波长和光纤纤芯的折射率。从空间分辨率表达式 (8)、(9) 可以得出,在 TLS 中心波长保持不变的条件下,OFDR 系统中采样点之间的理论空间分辨率主要由其扫频带宽决定。激光器的频率扫描范围越大,系统所能达到的空间分辨率也就越精细。现代 TLS 可支持数兆赫兹甚至更高的扫频范围,因此,OFDR 具备实现超高空间分辨率的潜力。然而在实际操作中,激光器频率调谐过程中经常受到随机扰动的影响,导致其扫频动作出现非线性偏差。在实际的分布式光纤传感中,信号采集卡通常以恒定时间间隔采样信号。若激光器调谐非线性,在将采集信号转换至频域时,同一位置的拍频信号可能被映射至错误的频率位置,进而影响空间定位的精度,降低实际分辨率。因此,激光器调谐过程中的非线性误差是限制 OFDR 系统空间分辨率接近理论极限的关键因素之一。

## 2) 传感距离

相干长度是指相干光波在传播过程中能够保持稳定干涉能力的最大距离。在 OFDR 系统中,为实现参考光与传感光纤中后向瑞利散射光之间的有效干涉,激光器的相干长度必须大于传感路径的最大测量长度。因此,激光器的相干长度直接限制了系统的最大探测范围。理论上,相干长度越长,系统的可探测范围越大,其大小和激光器线宽成反比关系。激光器线宽是表征其频谱纯度的关键参数,尤其在窄线宽激光器中更为重要。实际上,激光频谱往往不是理想的单频结构,其展宽主要来源于两个方面,一方面是由于腔内介质自发辐射引起的固有谱展宽,这是不可避免的物理现象;另一方面是外部扰动(如温度波动、机械震动等)造成的额外展宽。第 1 种影响属于激光器本征特性,而第 2 种影响则可以通过优化

设计与外部稳定控制等手段有效抑制<sup>[37]</sup>。

相干长度  $L_c$  可表示为:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\lambda z} \quad (10)$$

其中,  $\lambda_z$  是激光器能实现的最大波长范围,  $\lambda$  是激光器的中心波长。从式 (10) 可以得出,光源的波长范围越大就会导致相干长度越小。激光器线宽在运行中因展宽而引入的相位噪声,会对干涉信号的相干性造成扰动,进而成为制约 OFDR 系统最大可测距离的重要因素。可以将光源的相干长度  $L_c$  与相干时间  $T_c$  之间的关系表示为<sup>[37]</sup>:

$$L_c = c \cdot T_c \quad (11)$$

在 OFDR 系统中,相干长度反映了光波保持稳定相位关系的传播极限。因此,为确保干涉信号的有效获取,光源的相干长度需不小于干涉仪两臂间可能出现的最大光程差  $X_{\max}$ <sup>[37]</sup>。

$$L_c \geq 2X_{\max} \quad (12)$$

根据 OFDR 的相位噪声理论分析,当距离接近光源的相干长度测量时,系统就会相应的受到相位噪声的影响。

## 2 OFDR 系统性能提升方法

在 OFDR 系统中, TLS 需要提供较大的可调谐光学频率范围,同时要保持快速调谐速率和线性调谐。此外, OFDR 依靠快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 将频域信号转换为空间域信号,这需要 OFDR 系统以相等的光频率间隔采样产生的拍频信号。然而,所有的 TLS 都存在调谐非线性的缺陷,这表明 TLS 在相同间隔下的光频率变化并不总是相同的。在这种情况下, TLS 的输出光将包含相位噪声,这可能导致系统的空间分辨率下降<sup>[38]</sup>。为了解决这个问题,研究人员通过硬件改变 TLS 的调谐原理,降低非线性,保证输出光的光频率在时间上是线性曲线,以及采用相关软件算法来补偿包含相位噪声的信号<sup>[39]</sup>,接下来将对这些方法进行逐一介绍。

### 2.1 TLS 非线性补偿

#### 1) 内调制非线性补偿

内调制非线性补偿是通过不同的方法直接对 TLS 进行调整,从而恢复出理想的频率变化。Nakamura 等<sup>[40]</sup>提出了一种基于频移反馈 (frequency shifted feedback, FSF) 激光器的 OFDR 系统,传统 OFDR 系统采用频率啾啾单模激光器将距离信息转换为拍频信号,但其测量范围与分辨率存在固有制约。FSF 激光器通过输出周期性生成的啾啾频率分量 (啾啾速率  $> 100$  PHz/s), 成功消除了上述制约,实现了长距离高分辨率 OFDR 测量。该系统在 18.5 km 的测量距离上仍保持 20 mm 的空间分辨率。

Fujiwara 等<sup>[41]</sup>通过在超结构光栅分布布拉格反射 (super structure grating distributed bragg reflector, SSG-DBR) 激光器中引入热漂移补偿波导,抑制了激光器的热波长漂移,从而提升 OFDR 系统性能。Ndiaye 等<sup>[42]</sup>使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为增益介质的 FSF 激光器应用在 OFDR 的高精度光学测距中,并对系统的整体性能进行研究。该 FSF 激光器在 45 GHz 的带宽范围内产生了啁啾频率分量,速率高达  $3.8 \times 10^{17}$  Hz/s。同时在 5 m 的测距距离下,测量时间为 2 ms,距离精度优于 25  $\mu$ m。Tkachenko 等<sup>[43]</sup>提出了采用简易单频光纤激光器 (具备自扫描功能) 的 OFDR 系统。该激光器的频率随脉冲数的变化而线性调谐,无需其他主动调谐元件。该 OFDR 系统在 9 m 长的 FUT 上实现了约 -80 dB 的灵敏度。

内调制非线性补偿方法更加直观。但是这种方法会增加系统的成本,同时无法兼顾改善调谐速率、调谐线性和激光线宽。因此,研究人员提出外调制的方式来解决 TLS 的非线性调谐,接下来会对外调制方法进行分析。

### 2) 单边带调制

单边带抑制载波 (single sideband suppressed carrier modulation, SSB-SC) 可精确调制出线性调频的射频信号 (radio frequency signal, RFS),并且通过光电调制器将其映射至光域,实现准线性光频调谐。Koshikiya 等<sup>[44]</sup>提出采用 SSB-SC 调制器与窄线宽光纤激光器相结合,作为 OFDR 系统的可调谐光源。如图 3 所示,利用 X-cut 型的铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 波导结构<sup>[45]</sup>,通过两个射频电极的驱动实现 SSB-SC 调制。调制侧带的光频通过改变 RFS 的频率而实现扫描。调制产生的光频侧带呈现出高度线性的频率扫描特性,提升系统测量准确性,在 5 km 光纤上实现厘米级空间分辨率。

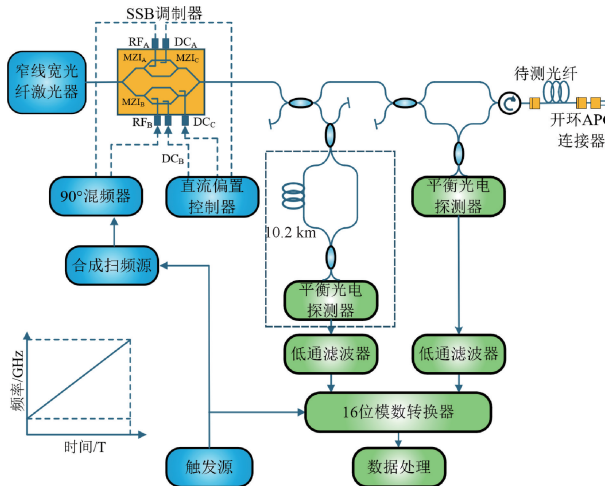


图 3 采用 SSB-SC 调制器和窄线宽光纤激光器的 C-OFDR 结构<sup>[44]</sup>

Fig. 3 Utilizing an SSB-SC modulator and a narrow linewidth fiber laser C-OFDR structure<sup>[44]</sup>

Fan 等<sup>[46]</sup>通过 SSB-SC 调制器和射频频率扫描器实现外部频率扫描,并且采用“串联生成相位”(concatenately generated phase, CGP) 方法将 FUT 分成几段进行相位噪声补偿。CGP 可以将采集到的信号进行希尔伯特变换后,通过平移累加的方式,得到适用于补偿  $N$  倍参考干涉仪时延的相位信号  $X_N(t)$ ,依次求解各阶相位信号,可对数倍于辅助干涉臂长的 FUT 进行相位补偿<sup>[47]</sup>。系统结构如图 4 所示,结果表明利用多个参考信号进行相位噪声补偿可以获得较高的信噪比。

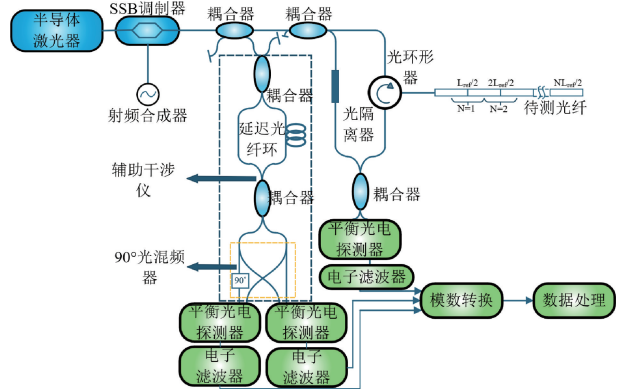


图 4 采用 CGP 进行相位补偿的 OFDR 系统示意图<sup>[46]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of an OFDR system using CGP for phase compensation<sup>[46]</sup>

但是单边带调制会存在扫频光扫频范围有限的问题,Xu 等<sup>[48]</sup>为提高扫频范围,提出高阶调制边带实现高空间分辨率 OFDR 的方法。通过高压调制可产生多阶边带,形成宽带光频梳。光频梳经环形器注入光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG),再输入带通滤波器 (band-pass filter, BPF)。FBG 与 BPF 协同滤除高阶边带,通过拉伸 FBG 并调谐 BPF 中心波长,可筛选不同阶次边带,同时保持高边带抑制比。该方案在 800 MHz 调制扫频范围内,系统达到 1.5 cm 的空间分辨率。同样地,Wei 等<sup>[49]</sup>为了提升扫频光扫频范围采用同步电流补偿方法,将从激光器动态注入锁定至窄线宽主激光器的一个特定高阶调制边带上,使扫描范围和调谐速率得以倍增。该方法使得窄线宽激光器的原始扫频范围由 3 GHz 提升至 15 GHz,调谐速率由 0.5 THz/s 提升至 2.5 THz/s。

### 3) 双边带调制

双边带抑制载波 (double sideband suppressed carrier modulation, DSB-SC) 的主要原理是通过消除激光相位噪声来提高空间分辨率。利用线性扫频对激光进行强度调制,后向散射光和参考光都被滤光片分成上、下边带,这两个信号被检测并彼此相乘,激光器相位噪声通过该方法被消除。Hiramatsu 等<sup>[50]</sup>提出通过消除激光相位噪声提升 OFDR 空间分辨率的方法,如图 5 所示,对有限线宽

的光源进行相位调制,采用扫频相位调制替代传统光源扫频,调制信号分束为参考光和探测光,来自待测光纤的瑞利背向散射光通过光环形器后与参考光耦合。耦合光经光学滤波器分离为两个频率分量,即上边带分量与下边带分量。两路分量转换为电信号后进行互乘运算,实现相位噪声抵消。但是该方法存在一个问题,如果断点在短距离上,宽拍频的一部分超过零(负),该方法抵消相位噪声频谱会折叠回正侧,因为在外差检测中没有负频谱,因此,不可能检测短距离断点。针对该问题,Badar 等<sup>[51]</sup>对系统结构进行改动,将参考光与 FUT 反射光通过 90°光混频器耦合。线偏振参考光  $E_{ref}$  被分成两束同相光  $E_{refI}$  与  $E_{refQ}$ ,圆偏振反射光  $E_{FUT}$  则解耦为两束 90°正交相位光  $E_{FUTI}$  与  $E_{FUTQ}$ 。两路输入光最终生成四路光信号( $E_{refI}$ 、 $E_{refQ}$ 、 $E_{FUTI}$ 、 $E_{FUTQ}$ ),并由两个平衡光电探测器 (balanced photodetector, BPD) 分别检测同相  $I$  与正交  $Q$  分量,之后进行相位分集检测,改进后的系统在检测短距离和长距离的断点时同时具有较高的空间分辨率。

2016 年,Badar 等<sup>[52]</sup>结合 DSB-SC 调制与四波混频 (four-wave mixing, FWM) 技术,通过扩展扫频范围提升 OFDR 空间分辨率。如图 6 所示,DSB-SC 调制产生两个

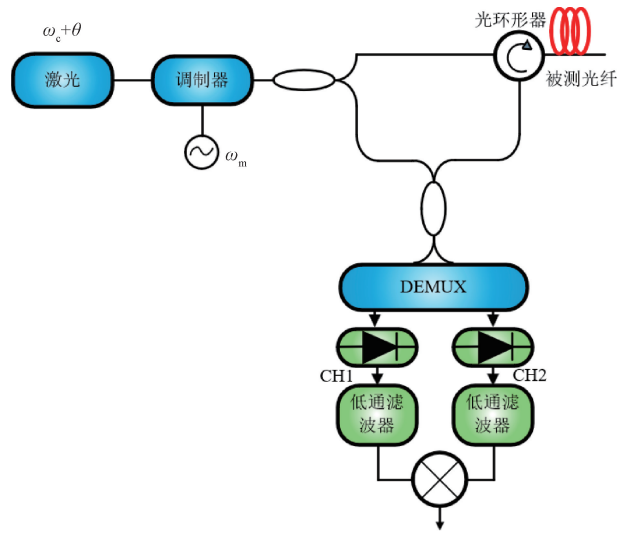


图 5 双边带 OFDR 系统<sup>[50]</sup>

Fig. 5 Double-sideband OFDR system<sup>[50]</sup>

边带信号,每个边带均可视为独立光源。该方案利用单光源实现退化四波混频,同时保持光源相干长度不变。实验证明在 1 GHz 频率扫描跨度下实现约 3.4 cm 的空间分辨率,同时消除 OFDR 中的激光相位噪声。

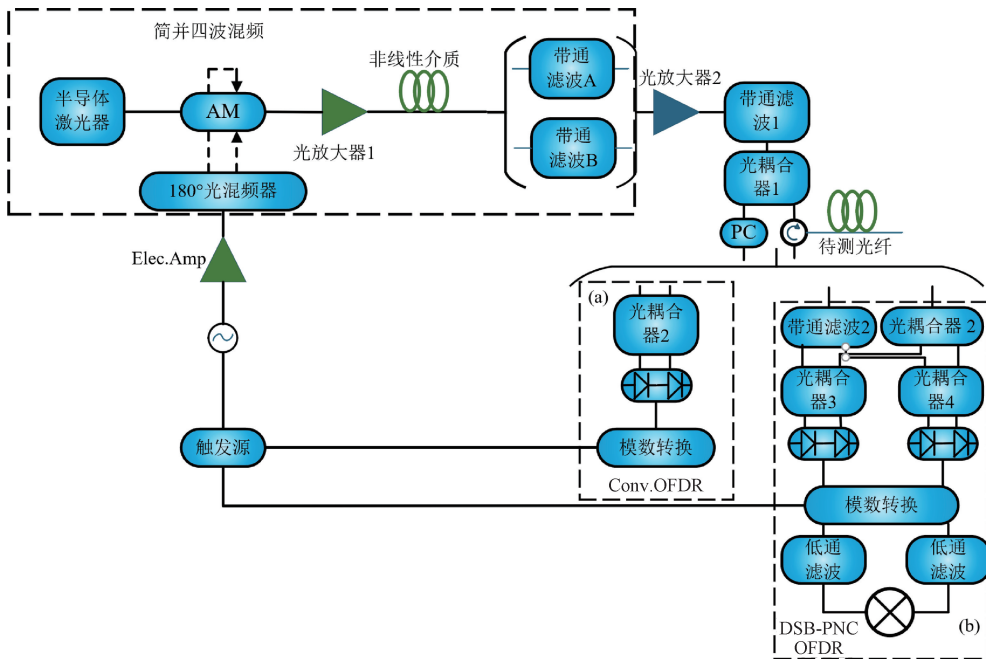


图 6 DSB-SC 调制与四波混频结合的 OFDR 系统<sup>[52]</sup>

Fig. 6 OFDR system combining DSB-SC modulation with FWM<sup>[52]</sup>

通过对边带抑制载波方法的介绍,可以得出,基于单边带调制,窄线宽激光器输出的单波长光注入单边带调制器,并在扫频信号源驱动下被转换为扫频激光;所得扫频光同时具有低扫频噪声和窄线宽的特性。但单边带调

制方法存在扫频光扫频范围有限的问题,需要通过其他方式来提高扫频范围。而双边带抑制载波调制能够在 OFDR 系统中实现激光相位噪声的有效抵消,并通过边带组合显著扩展等效扫频带宽,从而获得更长的测距范

围与更高的空间分辨率,但它也引入了额外的调制器与相干接收硬件,以及更高的偏置稳定性和数字信号处理复杂度要求。因此,针对不同的应用场景就需要选择合适的补偿方式。

4) 频率采样法

边带抑制载波方法可以改善 OFDR 系统的空间分辨率以及扫频范围,但是由于电子器件制造技术的瓶颈,射频扫描的广度和速度会受到限制,通常线性连续的光学扫频跨度被限制在数千兆赫兹的范围内,而且高频组件通常很昂贵,因此,用辅助干涉仪产生外部采样时钟作为数据采集触发器,通过使用辅助干涉测量,数据采集卡 (data acquisition card, DAQ) 以均匀的光频间隔采集拍频信号,从而解决 OFDR 系统中 TLS 的非线性问题成为使用更为广泛的方法<sup>[47]</sup>。图 7 是采用频率采样法的经典 OFDR 系统示意图,一个用于 OFDR 传感的主迈克尔逊干涉仪 (michelson interferometer, MI) 和一个用于频率采样触发的辅助 MZI, DAQ 由辅助干涉仪的外部时钟触发,这样的方式使得辅助干涉仪信号过零点的次数就是 DAQ 采集主干涉仪信号的次数,可以更加稳妥的进行非线性调谐补偿<sup>[33]</sup>。

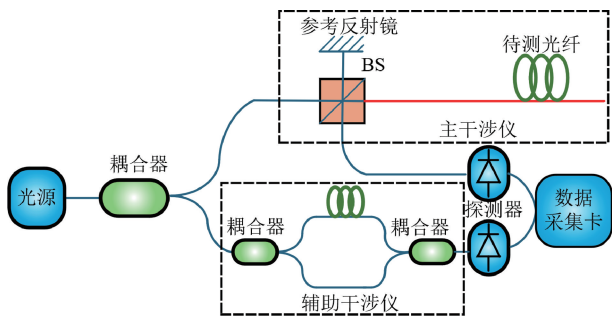


图 7 利用频率采样法的 OFDR 系统<sup>[33]</sup>  
Fig. 7 Frequency sampling OFDR system<sup>[33]</sup>

Luo 等<sup>[53]</sup>利用 MI 提供外部时钟以实现等频间隔采样,提出空间分辨率达 0.5 mm,具备位置偏移补偿功能的 OFDR 系统,如图 8 所示,干涉信号作为非线性扫描的参考时钟,用于重采样原始瑞利散射信号并校准 TLS。后向瑞利散射信号与本振光分别由两个偏振分束器分离为 S/P 两路偏振态。偏振光束按各自偏振态在耦合器 1 与耦合器 2 处发生干涉,最终由 BPD 接收偏振相关干涉信号。通过分析得出位置偏移补偿机制有效维持了瑞利光谱的互相关性,在 25 m 光纤末端成功识别出 0.5 mm 的应变光纤段。

2022 年, Feng 等<sup>[54]</sup>也采用辅助干涉仪信号作为 DAQ 的外部时钟,如图 9 所示,在瞬时光频等间隔点对 BPD 输出的拍频信号进行采样,融合多频探测与近邻分析方法,通过比对不同波长区域的子相位曲线,成功消除

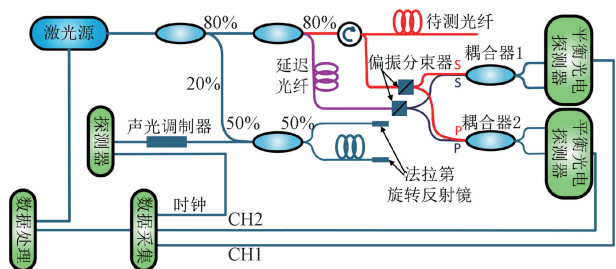


图 8 位置偏移补偿 OFDR 示意图<sup>[53]</sup>  
Fig. 8 Schematic diagram of position offset compensation OFDR<sup>[53]</sup>

衰落噪声干扰并获取无失真相位信号。相较于传统多频平均法,该方案在减少频分条件下仍能保持相近相位测量精度,进而在相同扫描范围内获得更优空间分辨率。该方法在 3.6 nm 有效波长扫描范围 (对应 0.22 mm 测距分辨率) 下,最终实现了标准偏差 0.015  $\mu\text{m}$ 、分辨率 1.1 mm 的形变测量,以及标准偏差 0.55  $\mu\text{e}$ 、分辨率 5.6 cm 的应变测量。

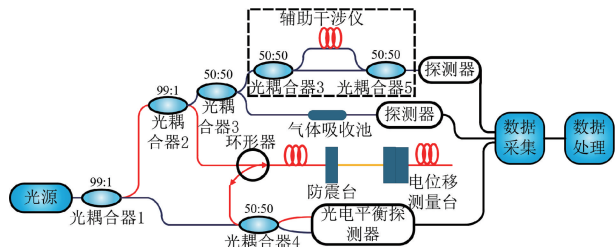
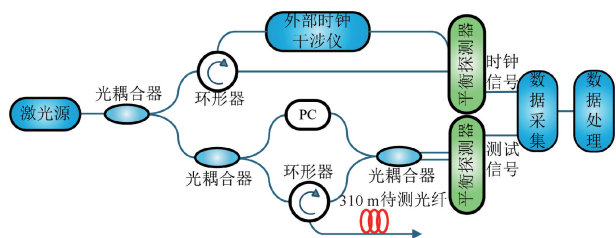


图 9  $\Phi$ -OFDR 的实验装置<sup>[54]</sup>  
Fig. 9 Experimental setup of  $\Phi$ -OFDR<sup>[54]</sup>

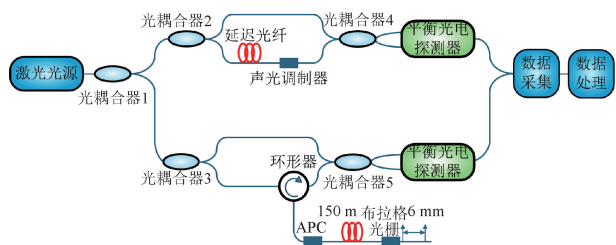
但是辅助干涉仪的两臂光程差很大,用辅助干涉仪产生外部采样时钟的方法仍会存在一定的偏差。Feng 等<sup>[39]</sup>对 OFDR 系统中时钟采样误差进行了研究,如图 10 所示, TLS 通过一个 5:95 耦合器分成两路,5%的部分用作外部时钟干涉仪的光源,外部时钟干涉仪中两臂的光程差为 1 000 m。95%的部分作为主干涉仪的光源,参考光路还配备偏振控制器,调整参考光的偏振状态,并确保两臂在相同偏振方向上的光强一致,降低系统中的噪声。实验得出,通过优化光学频率调谐速率,可以提高外部时钟的质量,以降低大范围测量 OFDR 中的抖动。在测量长度为 310 m 时,空间分辨率可达 4.8 cm,当抖动足够低时,应变传感位置精度可达 0.15 m。

2021 年, Guo 等<sup>[55]</sup>为了补偿由辅助干涉仪有限采样率导致的扫频分布估计误差,提出基于等频重采样的激光扫频非线性抑制方法,在 130 nm 扫频范围内,实验获得 12.1  $\mu\text{m}$  的空间分辨率。当辅助干涉仪设定光程差为 200 m 时,在 191 m 光纤尾端实现了 21.3  $\mu\text{m}$  的空间分辨率。通过引入重采样算法,并结合拉丝塔型 FBG 阵列

图 10 获取外部时钟差拍信号的实验系统<sup>[39]</sup>Fig. 10 Experimental system for acquiring external clock beat signals<sup>[39]</sup>

以增强瑞利后向散射信号,实现了对 105 m 光纤的高精度分布式温度测量。该方案在空间分辨率方面可达 1 cm,温度测量不确定度控制在 $\pm 0.15$  °C 以内。

在传统的 OFDR 系统中采用非平衡辅助干涉仪校正扫频非线性时,延迟路径长度与校正效果之间存在一个难以平衡的问题:短延迟利于捕捉瞬态频偏,但会因为拍频过低降低校正精度,而长延迟可以提供更多校正参考数据,但噪声的增大而削弱校正效果。因此,如图 11 所示,Wang 等<sup>[56]</sup>提出在 OFDR 系统中引入声光调制器作为辅助干涉仪的移频装置,在 FUT 末端附近制作了一个弱光纤 FBG,与光纤末端一起产生两次反射。该方法有效解决 TLS 非线性扫频的校正难题,通过声光调制器生成高频拍频信号,在短延迟条件下实现高精度校正,配合匹配的信号处理算法有效缓解上问题,并且可与多种校正方法结合以增强综合性能,普遍提升不同校正方案的空间分辨率与鲁棒性。

图 11 声光调制器 OFDR 系统实验图<sup>[56]</sup>Fig. 11 Experimental diagram of acousto-optic modulator OFDR system<sup>[56]</sup>

在优化传统 OFDR 频率采样法的系统结构方面,2020 年,Badar 等<sup>[57]</sup>提出一种用于校正 OFDR 非线性调谐影响的新型架构。该架构无需独立的辅助干涉仪探测系统,从而消除对额外探测设备及采集通道的需求。在 OFDR 系统中,通过在频谱起始位置引入人工拍频信号,可等效构建辅助干涉仪,用于提取 TLS 的相位信息,从而对其非线性扫频过程进行校正。该策略不仅有效抑制了调谐非线性带来的影响,还具有系统结构简化、降低成本、减少数据采集时间与计算负载的优势。采用该方法,

在 50 m 的传感光纤中实现了 4.5 cm 的空间分辨率。

2025 年,帅禄玮等<sup>[58]</sup>提出一种实时短时频率可变系数有限长脉冲响应(STF-VCFIR)滤波系统。该系统基于辅助干涉仪信号的短时频率自适应调整滤波器系数,对探测信号进行实时滤波,有效抑制谐波噪声。结果表明,相较于未滤波系统,该方法对谐波噪声可额外衰减 8 dB 以上,将其压低至 -102.7 dB 以下,与背景噪声均值接近,从而明显降低谐波被误判为反射点的概率,提高系统判别精度。

### 5) 时间门控数字 OFDR

文献[56]通过引入声光调制器作为辅助干涉仪的移频装置来解决传统 OFDR 中决定空间分辨率的光波频率调谐速率与可测距离范围之间的矛盾。而 Liu 等<sup>[59]</sup>针对这一问题提出一种新型时间门控数字光学频域反射仪(time gated digital-OFDR, TGD-OFDR)技术,该方法仅在特定时间窗口内扫描探测光束频率,同时保持本地参考光为频率稳定的连续光波,通过数据域中的等效参考,以数字化方式实现了频率至距离的映射。实验得出,在整个 110 km 光纤链路上实现了 1.6 m 的空间分辨率,证明激光光源相位噪声及环境扰动均得到有效抑制。

在 TGD-OFDR 中,通过提高扫频速率,使光频扫描时间大大缩短,而激光源的相位噪声和环境扰动引起的相位变化都得到了很大的抑制。Wang 等<sup>[60]</sup>以 TGD-OFDR 技术为基础设计了一种大范围分布式动态应变传感技术。通过使用 90°光混频器,获得了后向散射信号的实部和虚部,并且在数字域中实现了相位到距离的映射。这种方法提升频率扫描速率,抑制了环境相位扰动对 TGD-OFDR 系统的影响。相较于传统 OFDR 方法,新的系统相位提取可靠性显著提升,从而实现了长距离定量振动测量。基于该技术构建的分布式振动传感器可以实现 40 km 测量范围、3.5 m 空间分辨率、最高 600 Hz 的振动频率检测及 0.08 g 的最小可测振动加速度。

同样地,戴建平<sup>[61]</sup>在 TGD-OFDR 的基础上提出了一种利用内调制频率调谐实现高空间分辨率的 TGD-OFDR 方案,如图 12 所示,系统选用内置调谐功能的 DFB 激光器作为光源,通过 MZI 测量其调谐非线性特性。反馈控制系统通过对激光器的驱动波形进行预补偿,实现了近似线性的频率扫描过程,同时借助激光器本身具有的高啁啾速率,有效抑制了系统中的相位噪声。系统在长达 74 km 的光纤链路上成功实现了 10 cm 的空间分辨率探测能力。

### 6) 其他方法

除了上述方法,针对传统内调制 OFDR 分布式传感系统中扫频激光存在的频率变化非线性问题及其造成的信噪比降低问题,2013 年,Ding 等<sup>[34]</sup>提出基于 deskew 滤波器补偿非线性调谐的方法。通过使用 deskew 滤波器

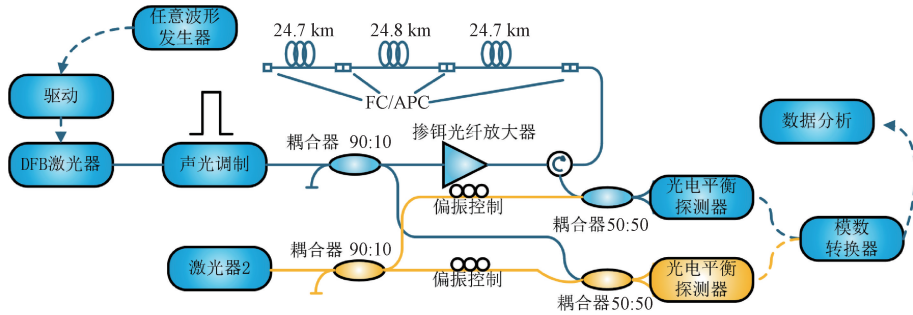


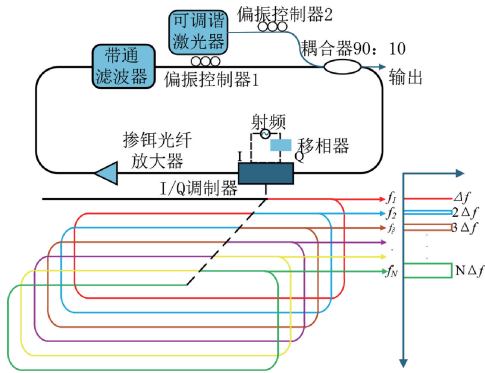
图 12 基于 DFB 内调制的 TGD-OFDR 系统框图<sup>[61]</sup>

Fig. 12 Block diagram of TGD-OFDR system based on DFB internal modulation<sup>[61]</sup>

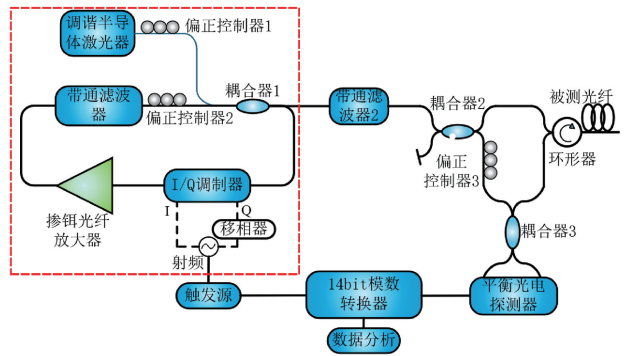
在长距离 OFDR 中补偿 TLS 的光频调谐非线性度, 在 80 km 处实现了 1.6 m 的空间分辨率, 并且对 5 000 000 个数据点进行信号处理的时间短于 1 s。

2015 年, Li 等<sup>[62]</sup> 利用循环频移器拓展光学扫频范围提高 OFDR 的空间分辨率, 其原理如图 13(a) 所示, 频率

扫描带宽的拓展是由于 RFS 在环路中循环移频产生的。该方法在 710 m 测量范围内获得了 0.97 cm 的空间分辨率, 调制频率扫描跨度为 882 MHz, 这样的空间分辨率对应于 10.31 GHz 的频率扫描跨度, 同时测量范围可以扩展到 10 km。



(a) 频率扫描带宽拓展原理  
(a) Schematic diagram of frequency scanning bandwidth expansion principle



(b) 循环频移高空间分辨率OFDR系统实验装置  
(b) Experimental setup of cyclic frequency-shifted high spatial resolution OFDR system

图 13 循环频移 OFDR 系统<sup>[62]</sup>

Fig. 13 Cyclic frequency-shifted OFDR system<sup>[62]</sup>

2019 年, Chen 等<sup>[63]</sup> 利用声光调制提出一种用于单频激光器的数字前馈式线宽压窄方案, 采用由直接数字频率合成器 (direct digital synthesizer, DDS) 生成 RFS 驱动的声光移频器 (acousto-optic frequency shifter, AOFS), 实现对激光相位的外部调控。通过紧凑型电光系统与数字控制算法的协同作用, 成功将分布反馈激光器 (distributed feedback laser, DFB) 的线宽从 2.2 MHz 压窄至 3.1 kHz, 降幅近 3 个数量级。利用该方法将扫频激光器线宽压窄, 在约 17 GHz 扫频范围、680 GHz/s 扫频速率下, 将扫频非线性从 ±10 MHz 抑制至 ±100 kHz 以内。

2021 年, 董毅等<sup>[64]</sup> 提出基于延迟自外差光学锁相的扫频激光非线性与相位噪声控制方法。利用锁相控制的波长可调谐光纤激光器, 在预畸变锯齿信号驱动下产生频率扫描光, 在 BPD 上实现延迟自外差拍频, 将激光扫

频误差映射为拍频信号的相位/频率偏差。该误差信号经环路滤波后反馈至扫频驱动, 实现对扫频误差的实时校正, 从而获得扫频范围 8 GHz、扫频速度 160 GHz/s 的低噪声、高线性扫频激光。实现动态范围 27 dB、空间分辨率 4.3 cm 的 240 km 光纤链路损耗测量, 以及空间分辨率 5 cm 的分布式光纤应变传感。

2023 年, 梁昌硕等<sup>[65]</sup> 提出了基于光 IQ 调制的 OFDR 系统, 如图 14 所示, 通过光 IQ 调制器对稳频激光进行调制以生成线性扫频激光, 并将线性扫频激光导入 OFDR 系统实现对待测光纤上温度变化的定位检测。结果表明, 基于光 IQ 调制器的 OFDR 系统可以准确定位待测光纤上的温度变化位置, 在 1 000 m 光纤上定位误差为 0.060 6 m, 可以实现中长距离的高精度温度变化定位传感。

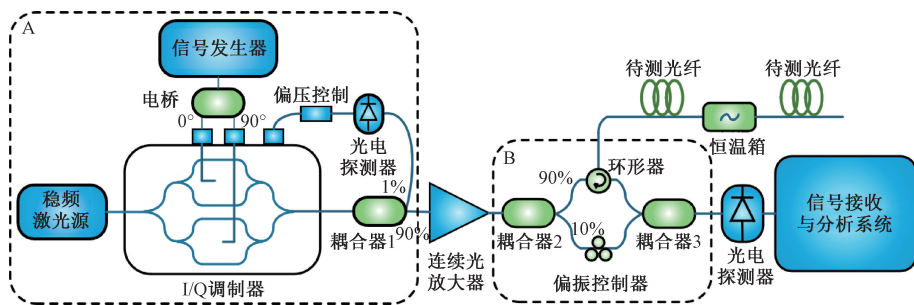


图 14 基于 IQ 调制扫频的 OFDR 系统框图<sup>[65]</sup>

Fig. 14 Block diagram of OFDR system based on IQ modulation for frequency sweeping<sup>[65]</sup>

Zhong 等<sup>[66]</sup>提出基于自补偿机制 (self-compensation mechanism, SCM) 的单干涉仪高分辨率 OFDR 方案,图 15 是 SCM 补偿机制方案解调流程,通过采用精密熔接的 FUT 弧形端面替代传统辅助干涉仪,生成强度适宜的反射信号,成功从光纤端面提取真实瞬时光频。结合弧形端面与 SCM 补偿机制,有效消除系统相位噪声,获取高信噪比补偿信号,该方法实现 108 m 测量距离内 3 mm 空间分辨率的分布式温度传感,而当测量距离扩展至 170 m 时,仍保持 5 mm 高空间分辨率。

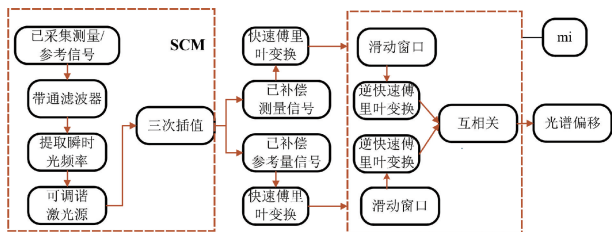


图 15 自补偿方法 OFDR 解调流程<sup>[66]</sup>

Fig. 15 Demodulation flowchart of Self-Compensating Method OFDR<sup>[66]</sup>

张嘉彤等<sup>[67]</sup>利用开环校正结合光电锁相环闭环校正电流内调制 DFB 激光器的方法,如图 16 所示。通过自外差 MZI 生成的拍频信号对激光器调谐特性进行量化分析,进而采用开环预补偿策略对其扫频驱动信号进行初步线性化处理。闭环控制部分则依赖于光电锁相环结构,用于实时比较实际拍频信号与理想信号之间的相位偏差,并将该误差信号反馈至激光器驱动端,实现调频过程的闭环修正。经该方案校正后,激光器的扫频非线性显著降低至 0.078%,拍频信号在中心频率处的功率相比未校正时提升了 21.1 dB。在 50 m 传感距离范围内,系统的最大测量误差控制在 3.79 mm 以内,重复性测量的标准偏差峰值为 112.2  $\mu\text{m}$ 。

Zhong 等<sup>[68]</sup>利用干涉仪对锁定激光器的波长调谐特性进行测量,并结合预失真补偿显著提升其调谐线性度,从而保证注入锁定过程的稳定运行。经过优化后,系统

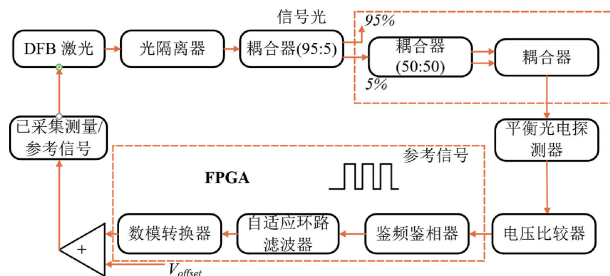


图 16 基于 FPGA 的光电锁相系统整体方案<sup>[67]</sup>

Fig. 16 Overall scheme of FPGA-based optoelectronic phase-locked loop system<sup>[67]</sup>

在锁定第 4 阶边带时获取了扫频范围 60 GHz、扫频速率 15 THz/s 的超宽带线性扫频光。在无需额外噪声后处理的前提下,该系统在 2 km 传感距离上实现了 1.71 mm 的高空间分辨率。

### 7) 硬件补偿方法小结

综上所述,非线性补偿的方式大致分为两类,一是改进光源结构,使用调制器加窄线宽激光器构建外部频率扫描系统或者是通过 RF 调制源驱动扫频,控制频率变化高度线性;二是使用辅助干涉仪加外部时钟触发的方法,利用辅助干涉仪生成参考信号,用该信号的过零点生成等光频间隔采样触发信号,保证采样在等频率间隔下进行,可以在理论上实现高线性频率采样。表 1 是对上述方法的总结。

### 2.2 相位噪声补偿

在 OFDR 中,除了硬件层面的激光调制控制外,通常由也会使用更为灵活且高效的软件算法来补偿激光器扫频非线性引入的相位误差和频率轴畸变,从而提高系统的空间分辨率和精度。

#### 1) 插值算法

在数字信号处理领域,已经开发了包括线性插值、多项式插值、样条插值等算法<sup>[69-70]</sup>。线性插值<sup>[71-74]</sup>采用线性多项式拟合曲线,其效率较高,但空间分辨率存在较大不确定性。高阶多项式插值能精确预测数据点,Liu 等<sup>[75]</sup>

表 1 TLS 非线性补偿方法  
Table 1 TLS nonlinear compensation methods

文献	使用方法	系统性能提升结果
Koshikiya 等 <sup>[44]</sup>	SSB-SC	5 km 光纤上实现厘米级空间分辨率
Xu 等 <sup>[48]</sup>	高阶调制边带	实现 10 倍展宽的光学扫频范围,在 800 MHz 调制扫频范围内实现 1.5 cm 的空间分辨率
Wei 等 <sup>[49]</sup>	同步电流补偿	系统扫频范围以及调谐速率提升 5 倍
Hiramatsu 等 <sup>[50]</sup>	DSB-SC	消除系统的相位噪声
Badar 等 <sup>[52]</sup>	DSB-SC 结合 FWM	1 GHz 频率扫描跨度下实现约 3.4 cm 的空间分辨率
Feng 等 <sup>[54]</sup>	融合多频探测与近邻分析	实现标准偏差 0.015 $\mu\text{m}$ 、分辨率 1.1 mm 的形变测量以及标准偏差 0.55 $\mu\text{e}$ 、分辨率 5.6 cm 的应变测量
Wang 等 <sup>[56]</sup>	在系统中引入声光调制器	有效平衡 TLS 非线性扫频校正之间的矛盾
Zhong 等 <sup>[66]</sup>	SCM 补偿机制	实现 108 m 测量距离内 3 mm 空间分辨率的分布式温度传感

提出了一种基于多项式回归算法 (polynomial regression algorithm, PRA) 和 ARC-DSM 相位解调算法的改进非线性补偿算法,该方法在 26.8 km 的传感距离上,系统的空间分辨率可达 50 cm 左右,但该方案难以满足 OFDR 大量数据处理需求。而 3 次样条插值<sup>[76-78]</sup>则能生成平滑曲线,具有相对较小的插值误差,且计算复杂度低,在现有插值方法中实现了优化平衡。

Song 等<sup>[79]</sup>为了使得 OFDR 系统在增加传感长度的同时保持高测量分辨率和精度,采用 3 次样条插值算法,如图 17 所示,对 OFDR 系统激光器的频率调谐非线性进行补偿,该方案采用复数傅里叶变换将波长域信号转换为沿 FUT 分布的 OTDR 轨迹,并对数据进行 3 次样条插值与互相关运算。实验表明,该系统温度灵敏度达 10  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ ,应变灵敏度为 1.2  $\text{pm}/\mu\text{e}$ ,在 7 cm 空间分辨率下测量精度分别为 0.7  $^\circ\text{C}$  和 2.3  $\mu\text{e}$ 。

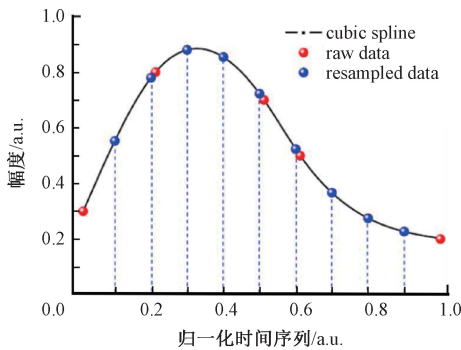


图 17 非均匀采样间隔下原始数据的 3 次样条插值<sup>[79]</sup>

Fig. 17 Raw data under non-uniform sampling intervals Cubic spline interpolation<sup>[79]</sup>

2022 年, Fang 等<sup>[80]</sup>提出引入相位域插值重采样 (phase-domain-interpolation-based resampling, PDIR) 来补偿扫频非线性,从而提升 OFDR 传感系统的空间分辨率。利用辅助干涉仪获得的拍频信号,经希尔伯特变换提取瞬时相位;由于 TLS 调谐频率与相位变化近似成正比,可在相位域内直接对主干干涉仪拍频信号进行插值重

采样,从而大幅缩短处理时间并减小插值误差。在采用扫频范围为 8.9 nm 的窄线宽 TLS 条件下,该方法在 302 m 单模光纤上验证了 0.15 mm 的空间分辨率。

2023 年,申振等<sup>[81]</sup>提出基于频域插值和窗宽优化的 OFDR 系统数据处理方案。在数据处理过程中,通过频域插值提高外调制 OFDR 系统的定位准确度,并评估系统定位误差,确定系统最优窗宽及插值位数规模,进而在保证高定位准确度的前提下优化了系统的空间分辨率。

2) FFT 相关算法

Ding 等<sup>[82]</sup>针对 OFDR 系统中光源非线性调谐问题提出了非均匀傅里叶变换法 (non-uniform fast Fourier transform, NUFFT) 进行重采样插值的方法,使用 NUFFT 来最大限度地减少 OFDR 中 TLS 的频率调谐非线性的降级效应。该方法可以准确检测光纤中弯曲引起的指数变化。Shiloh 等<sup>[83]</sup>利用分数阶傅里叶变换 (fractional Fourier transform, FrFT) 提出一种非线性调谐补偿的方法。通过 FrFT 分析接收信号,可重构光纤上特定位置及其邻近区域的反射分布。实验在 20 km 光纤末端人为引入的瑞利背向散射扰动予以验证 (扫描频率约 2.5 kHz),利用 FBG 阵列测量背向散射分布,其空间分辨率可以达到 2.8 m。

2018 年,针对传统的基于短时傅里叶变换的方法需要较长的计算时间,而基于群延迟的方法可以显著提高计算速度,但存在噪声容限较低的问题。Zhu 等<sup>[84]</sup>采用互相关、加权滑动窗口傅里叶变换和基于 Logistic 激活函数构建了新的傅立叶变换算法,在保持良好的空间分辨率和测量精度的情况下,相较于传统的解调方式,效率得到明显提升。

2020 年, Song 等<sup>[85]</sup>提出了一种基于匹配傅里叶变换算法 (match fourier transform, MFT) 的非线性相位补偿方法。将拍频信号的非线性相位表示为多项式相位函数,然后通过多项式回归算法从辅助干涉仪获得多项式相位函数的系数。最后,主 OFDR 干涉仪中的非线性相位可以通过 MFT 进行补偿。实验结果表明,该方法能够有效抑制反射峰的旁瓣,在 4.3 km 处实现 0.2 m 的空间

分辨率。

FFT 广泛应用于 OFDR 的频谱分析,但只能通过降低采样频率或增加采样点数来提高分辨率,研究人员提出 FFTW 以及 FFT-分段 Chirp-Z (FFT-SCZT) 等方法解决这一问题,但是 FFTW 仅是计算速度上得到提升,并没有改变 FFT 固有的缺点,FFT-SCZT 在会增加频谱分析时的计算量,同时需要根据不同的测量要求改变参数<sup>[86]</sup>。郁胜过等<sup>[86]</sup>提出了一种基于改进的遗传算法 (IGA) 和 Zoom FFT (ZFFT) 的快速高精度频谱分析 (FFT-IGA-ZFFT) 算法。在同一运算平台下,处理 107 个 OFDR 采样数据时,FFT 算法耗时 3.130 s,FFT-SCZT 算法耗时 1.993 s,而 FFT-IGA-ZFFT 算法仅耗时 0.525 s 即可获得同等的空间分辨率与传感距离,运算速度明显优于 FFT 算法和 FFT-SCZT 算法。

### 3) 图像与滤波去噪

当前基于深度学习 (尤其是神经卷积神经网络 CNN 和扩散模型) 的方法在大多数情况下提供了最佳或接近最佳的性能,特别是对于复杂噪声和真实场景图像。在拉曼分布式温度传感 (Raman distributed temperature sensing, RDTS) 系统中,使用 CNN 去噪技术就已经实现了 13.4 dB 的信噪比提升<sup>[87]</sup>,同时通过噪声与仿真 BOTDA 信号训练 CNN 模型,在不同采样率下分别实现了 13.43、13.57 和 12.9 dB 的信噪比增益。而在 OFDR 系统中, Li 等<sup>[88]</sup>通过利用更大互相关数据窗口下获得的低噪声二维图像,结合高斯滤波 (Gaussian filter, GF) 进一步处理后,与仿真的无噪声图像共同训练去噪 CNN 模型,以抑制较小互相关数据窗口下波长偏移信息中的随机噪声。该方法在 75 m 光纤末端实现了空间分辨率达 2 mm 的应变梯度信息精准解调。

除去使用 CNN 方法降低 OFDR 信号中的噪声之外,2021 年, Qu 等<sup>[89]</sup>通过对传感光纤沿线采集的分布式瑞利散射信号进行处理,获得互相关结果数据阵列,该阵列可构建包含应变所引起光谱偏移信息的二维图像,据此可应用图像降噪方法抑制随机噪声并提升测量精度。在互相关计算后增加全变分法及二维高斯滤波算法,提取参考信号和测量信号之间的频谱偏移,该频谱偏移可以映射到沿传感光纤施加的应变值。该方法能有效抑制随机噪声并剔除异常值,应用图像降噪方法后,高空间分辨率的应变梯度得以有效识别。此外,在 52 m 传感光纤上,采用波长扫描速率为 20 nm/s 的参数,实现了 1.3 mm 的空间分辨率。Qu 等<sup>[90]</sup>还利用二维高斯滤波和二维小波变换进行噪声处理,提高了 OFDR 系统的宽应变测量范围,可以在 4 mm 的空间分辨率下清晰地识别出高达 7 000  $\mu\epsilon$  的应变值。

张昆等<sup>[91]</sup>采用中值滤波技术提升二维形状传感的精度。该方法对瑞利散射波长偏移信号进行去噪处理,

在保留信号边缘信息的同时,滤除了离散性波长偏移,有效抑制了由互相关伪峰和相干衰落引起的系统噪声,从而优化了 3 种预设二维形状的波长偏移曲线。系统结构如图 18 所示。实验结果表明,当应变-波长偏移系数标定为 1.20  $\mu\epsilon/\text{pm}$ ,在 0.5 m 的传感长度上,3 种预设形状的末端传感误差分别从 3.08%、0.94%、0.82% 降至 0.80%、0.66%、0.48%。此方法显著提高了 OFDR 二维形状传感系统的感知精度。

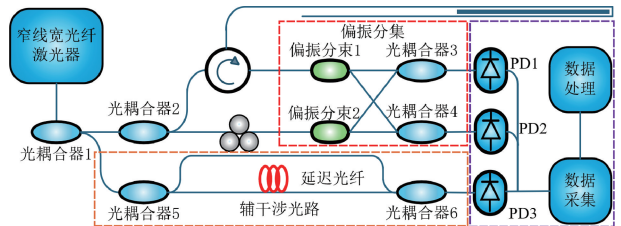


图 18 OFDR 二维形状传感实验系统<sup>[91]</sup>

Fig. 18 Diagram of OFDR two-dimensional shape sensing experimental system<sup>[91]</sup>

2022 年, Guo 等<sup>[92]</sup>主要针对 TLS 光谱多峰及辅助干涉仪反射所产生的伪峰。采用维纳反卷积滤波获取辅助干涉仪中含旁瓣的点扩散函数,继而以该点扩散函数作为卷积核进行 2 次维纳反卷积滤波,从而在主干涉仪中精确定位伪峰。在 26 m 测试长度上实现了毫米级空间分辨率的纯净待测光纤轨迹测量。

2023 年, Zhang 等<sup>[93]</sup>基于非局域哈尔变换 (non-local Haar transform, NLH) 实现了 OFDR 的短时长距离分布式高温传感。该算法在局部瑞利散射光谱三维互相关分布映射的二维图像中搜索最相似的像素点,充分利用二维数据的空间相似性特征。采用 NLH 方法,在 102 m 距离实现了 950  $^{\circ}\text{C}$  至 1 050  $^{\circ}\text{C}$  的短时分布式高温传感,传感空间分辨率达 2 cm。相较于传统去噪方法,所提 NLH 方法在温度一致性恢复方面表现最优,在保持 2 cm 空间分辨率的前提下,可无损还原相同温度变化引起的光谱偏移分布一致性。Li 等<sup>[94]</sup>提出独立分量分析 (independent component analysis, ICA) 源-噪声分离方法,用于处理收集数据中存在的随机噪声,从而通过 OFDR 系统实现高空间分辨率的长距离分布式应变传感。通过将传感光纤测得的测量信号与参考信号进行互相关后,将提取的波长偏移信息沿光纤长度重新排列来构建。通过使用 ICA 算法进行去噪,可以抑制随机噪声对空间分辨率的影响。

2025 年,艾腾华等<sup>[95]</sup>提出一种结合位置自校正算法和非均匀高斯图像滤波的大动态范围分布式应变测量方法,并搭建基于 OFDR 的分布式应变传感系统对其进行验证,如图 19 所示。结果表明,在 5.4 m 光纤上,该方法在 4 mm 位置分辨率下实现最高 8 000  $\mu\epsilon$  的精确测量,

相比传统方案明显拓展了应变量程并提升测量精度,在兼顾改善高分辨率与大动态范围方面具有一定优势。

4) 软件补偿方法小结

软件算法补偿法与频率采样法有相似的硬件系统,包含一个主干涉仪和一个辅助干涉仪。对辅助干涉仪的信号进行采集和分析,得到 TLS 的相位信息。在获取相位信息的基础上,采用软件算法对相位噪声进行补偿,表 2 是对常用的 OFDR 信号处理算法进行总结。

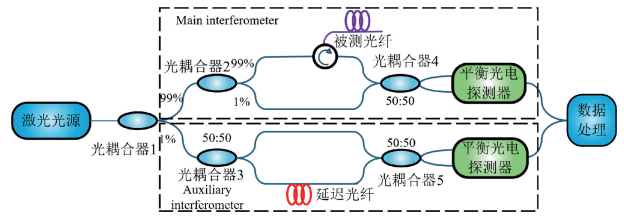


图 19 基于 OFDR 的分布式应变传感实验装置<sup>[95]</sup>

Fig. 19 Experimental setup based on OFDR for distributed strain sensing<sup>[95]</sup>

表 2 相位噪声补偿方法

Table 2 Phase noise compensation methods

文献	使用方法	性能提升结果
Song 等 <sup>[79]</sup>	3 次样条插值	系统温度灵敏度达 10 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ , 应变灵敏度为 1.2 $\mu\text{m}/\mu\text{e}$ , 在 7 cm 空间分辨率下测量精度分别为 0.7 $^\circ\text{C}$ 和 2.3 $\mu\text{e}$
Shiloh 等 <sup>[83]</sup>	分数阶傅里叶变换	20 km 光纤实验测试中, 空间分辨率可以达到 2.8 mm
Zhu 等 <sup>[84]</sup>	短时傅里叶变换	OFDR 的运算效率提高了 23 倍
Li 等 <sup>[88]</sup>	卷积神经网络	75 m 光纤末端实现了空间分辨率达 2 mm 的精准解调
Qu 等 <sup>[89]</sup>	全变分法及二维高斯滤波算法	52 m 传感光纤上, 实现了 1.3 mm 的空间分辨率
Zhang 等 <sup>[93]</sup>	非局域哈尔变换	102 m 距离实现了 950 $^\circ\text{C}$ 至 1 050 $^\circ\text{C}$ 的短时分布式高温传感, 空间分辨率为 2 cm

3 结 论

综上所述, OFDR 作为一种基于频域的分布式光纤传感技术, 在扫频光源线性化、相位噪声补偿以及高效信号处理等方面的研究不断深入, 使其在空间分辨率、测量动态范围和可测参量种类上都有了长足的发展。得益于此, 基于 OFDR 的传感系统已经从最初的短距器件表征扩展到数十千米乃至更长距离的应变、温度、振动、三维形状以及多物理场分布测量, 在土木工程、能源、航空航天和生物医药等场景中展现出良好的应用前景。

但从整体来看, 受限于光源特性、信号处理能力和系统结构, 其发展仍面临若干关键挑战。1) 扫频激光器在频率调谐过程中仍存在非线性, 导致采样间隔不均匀; 2) 相位噪声引起干涉条纹抖动, 降低空间分辨率与信噪比; 3) 分辨率与光源扫频带宽呈反比, 扫频带宽越大, 分辨率越高, 但系统动态范围和有效测距随之下降; 4) 高频谱移时互相关主峰减弱, 易被假峰干扰, 误判与主峰丢失严重制约系统的测量范围与精度。因为 TLS 是 OFDR 系统的核心组件, 其较窄的线宽有助于扩大 OFDR 系统的传感范围, 而宽调谐范围和高调谐线性度则能提升系统的空间分辨率和信噪比。然而, TLS 的关键性能参数如线宽、调谐范围、调谐速率和调谐线性度之间存在相互制约的关系, 往往难以同时优化。同时满足所有高性能要求的 TLS 成本高昂, 这极大地限制了基于 OFDR 技术传感系统的推广应用。因此, 开发高性能且成本可控的 TLS 是推动 OFDR 技术发展的关键挑战之一。未来需要

进一步优化光源的稳定性, 提升传感距离、空间分辨率。而在信号的解调方面, 可以结合神经网络、深度学习等智能信号处理算法提高数据处理速度与精度。并且随着应用场景的复杂化, 发展便携式 OFDR 模块, 推进低功耗、低成本光电模块芯片研发, 适用于桥梁、航天、医疗等嵌入式环境, 以及实现多物理场与多参数联合感知, 可以与布里渊、拉曼技术融合, 构建温度应变复合感测系统, 实现多物理量同时监测的融合式光纤传感平台。

参考文献

[ 1 ] 张皓景. 基于机械传感技术的智能制造系统分析[J]. 中国机械, 2023(14): 59-62.  
 ZHANG H J. Analysis of intelligent manufacturing system based on mechanical sensing technology [J]. Machine China, 2023(14): 59-62.

[ 2 ] 李晓波, 支宇, 才冬涛, 等. 传感技术在智能制造中的应用[J]. 金属加工(冷加工), 2023(3): 78-81.  
 LI X B, ZHI Y, CAI D T, et al. The application of sensing technology in intelligent manufacturing [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2023(3): 78-81.

[ 3 ] 陈栋, 张翔, 陈能成. 智慧城市感知基站: 未来智慧城市的综合感知基础设施[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 159-180.  
 CHEN D, ZHANG X, CHEN N CH. Smart city awareness base station: A prospective integrated sensing infrastructure for future cities [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 159-180.

- [ 4 ] 龚健雅, 张翔, 向隆刚, 等. 智慧城市综合感知与智能决策的进展及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1482-1497.  
GONG J Y, ZHANG X, XIANG L G, et al. Progress applications for integrated and intelligent decision in smart city[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1482-1497.
- [ 5 ] 谢润桦, 王滨, 张蕴明, 等. 面向智慧城市的物联网传感器状态监测与可视化应用[J]. 物联网技术, 2018, 8(3):18-20,25.  
XIE R H, WANG B, ZHANG Y M, et al. Application of IoT sensor status monitoring and visualization for smart cities[J]. Internet of Things Technologies, 2018,8(3): 18-20,25.
- [ 6 ] 郭凯凯, 朱炜皓, 李军, 等. 基于智能传感技术的输电线路跨越架环境监测与预警系统研究[J]. 电气技术与经济, 2024(7):177-179,182.  
GUO K K, ZHU W H, LI J, et al. Research on environmental monitoring and early warning system for transmission line crossing structures based on intelligent sensing technology [ J ]. Electrical Equipment and Economy, 2024(7):177-179,182.
- [ 7 ] 贾爱云. 基于无线传感技术的水环境监测系统设计[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(2): 44-46.  
JIA AI Y. Design of water environment monitoring system based on wireless sensor technology [ J ]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023, 4(2): 44-46.
- [ 8 ] MINAMI K, SHIBA K, Yoshikawa G. Pattern recognition using chemical sensor for identification of solid materials by responses to multiple probe gases[J]. IEEE Sensors Letters, 2023, 7(9): 1-4.
- [ 9 ] GERLACH G, GUENTHER M, HÄRTKNG T. Hydrogel-based chemical and biochemical sensors—A review and tutorial paper [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(11): 12798-12807.
- [ 10 ] WANG X B, ZHANG R B, ZHU Y L, et al. A piezoelectric-piezoresistive coupled electric field sensor for large dynamic range measurement from DC to 1.5 kHz[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(4): 7095-7106.
- [ 11 ] ZHANG J H, LI Y N, JIANG C, et al. Optical waveguide electric field sensor based on dual parallel Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20099-20106.
- [ 12 ] ZHANG J H, CHEN F S, LIU B. Integrated photonic electric field sensor operating more than 26 GHz [ J ]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(10): 1009-1012.
- [ 13 ] LIU C S, LI H F. Design and experimental validation of novel force sensor [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(8): 4402-4408.
- [ 14 ] DONG T Y, WANG J T, CHEN Y, et al. Research progress on flexible three-dimensional force sensors: A review [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24 ( 10 ): 15706-15726.
- [ 15 ] CHEN Y W, PANCHAM P P, MUKHERJEE A, et al. Recent advances in flexible force sensors and their applications: A review [ J ]. Flexible and Printed Electronics, 2022, 7(3): 033002.
- [ 16 ] ZHANG M Z, WANG X, BAI X X, et al. A high-sensitivity pressure sensor based on optical fabry-pérot cavities for extreme deep-sea applications [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2025,25(7):10645-10654.
- [ 17 ] NAZRI N A A, AZEMAN N H, LUO Y, et al. Carbon quantum dots for optical sensor applications: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106928.
- [ 18 ] 田振. 模式干涉型光纤传感器及其应用研究 [ D ]. 北京:北京邮电大学, 2024.  
TIAN ZH. Research on mode interferometric fiber sensor and ITS application [ D ]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024.
- [ 19 ] 李宗雷, 何海军, 周银, 等. 布里渊相移-增益比分布式光纤传感研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(4): 59-73.  
LI Z L, HE H J, ZHOU Y, et al. Research progression distributed fiber sensing using Brillouin phase gain ratio (invited) [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(4): 59-73.
- [ 20 ] PENDÃO C, SILVA I. Optical fiber sensors an sensing networks: Overview of the main principles and applications[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7554.
- [ 21 ] XUE P SH, LIU Q, LU S C, et al. A review of microstructured optical fibers for sensing applications[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 77: 103277.
- [ 22 ] 宋政宏. 基于分布式光纤地震传感技术的浅地表成像研究 [ D ]. 合肥:中国科学技术大学, 2023.  
SONG ZH H. Near-surfzce structure imaging with distributed acoustic sensing technology [ D ]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [ 23 ] 于海鹰, 李琪, 索琳, 等. 分布式光纤测温技术综述[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 90-94.  
YU H Y, LI Q, SUO L, et al. Performance analysis of distributed fiber sensing technology [ J ]. Optical Instruments, 2013, 35(5): 90-94.
- [ 24 ] 孙茜子. 分布式光纤传感器关键技术研究 [ D ]. 北京:北京邮电大学, 2021.

- SUN Q Z. Research of the key technologies for distributed optical fiber sensors [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [25] BARNOSKI M K, ROURKE M D, JENSEN S M, et al. Optical time domain reflectometer [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(9): 2375-2379.
- [26] ROGERS A J. Polarisation optical time domain reflectometry [J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(13): 489-490.
- [27] 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.
- [28] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, et al. Temperature distribution measurement using raman ratio thermometry [C]. *Fiber Optic and Laser Sensors III*. SPIE, 1986, 566: 249-256.
- [29] HORIGUCHI T, TATEDA M. Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated brillouin scattering between a pulse and a continuous wave [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(8): 408-410.
- [30] TKACH R W, CHRAPLYVY A R, DEROSIER R M. Spontaneous brillouin scattering for single-mode optical fibre characterization [J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(19): 1011-1013.
- [31] YUKSEL K, WUILPART M, MOEYAERT V, et al. Optical frequency domain reflectometry: A review [C]. 2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks. IEEE, 2009: 1-5.
- [32] EICKHOFF W, ULRICH R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(9): 693-695.
- [33] LIANG C SH, BAI Q, YAN M, et al. A comprehensive study of optical frequency domain reflectometry [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 41647-41668.
- [34] 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.
- [35] 薛渊泽. 基于 DBR 激光器的 OFDR 分布式光纤传感技术研究 [D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2023.
- XUE Y Z. Research on OFDR distributed fiber sensing technique based on DBR laser [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2023.
- [36] 赵梦梦. 基于光频域反射技术的分布式光纤传感器研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- ZHAO M M. Study on distributed optical fiber sensor based on optical frequency domain reflectometry [D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [37] 邹东江. 基于 OFDR 的分布式光纤传感系统研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2024.
- ZOU D J. Research on distributed optical fiber sensing system based on OFDR [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2024.
- [38] ITO F, FAN X Y, KOSHIKIYA Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 30(8): 1015-1024.
- [39] FENG B, LIU K, LIU T G, et al. Improving OFDR spatial resolution by reducing external clock sampling error [J]. *Optics Communications*, 2016, 363: 74-79.
- [40] NAKAMURA K, HARA T, YOSHIDA M, et al. Optical frequency domain ranging by a frequency-shifted feedback laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 36(3): 305-316.
- [41] FUJIWARA N, ISHII H, OKAMOTO H, et al. Suppression of thermal wavelength drift in super-structure grating distributed bragg reflector (SSG-DBR) laser with thermal drift compensator [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(5): 1164-1169.
- [42] NDIAYE C, HARA T, ITO H. Performance of a solid-state frequency-shifted feedback laser in optical ranging [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2009, 4: 09010.
- [43] TKACHENKO A Y, LOBACH I A, KABLUKOV S I. Coherent optical frequency-domain reflectometer based on a fibre laser with frequency self-scanning [J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(12): 1121-1126.
- [44] KOSHIKIYA Y, FAN X, 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.
- [45] 范佳诺, 李文健, 罗强, 等. 薄膜铌酸锂电光调制器研究进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2024, 54(11): 19-37.
- FAN J N, LI W J, LUO Q, et al. Advances in thin-film lithium niobate electro-optic modulators [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica and Astronomica)*, 2024, 54(11): 19-37.
- [46] 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.

- [47] 朱坤垚, 江毅. 光频域反射计研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(5): 23-39.  
ZHU K Y, JIANG Y. Recent progresses of optical frequency domain reflectometry [ J ]. Laser and Optoelectronics Progress, 2024, 61(5): 23-39.
- [48] XU D, DU J B, FAN X Y, et al. 10-times broadened fast optical frequency sweeping for high spatial resolution OFDR[C]. OFC 2014. IEEE, 2014: 1-3.
- [49] 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.
- [50] HIRAMATSU S, IWASHITA K. A novel phase-noise cancelled optical frequency domain reflectometry using modulation sidebands [ C ]. 2011 International Topical Meeting on Microwave Photonics Jointly Held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. IEEE, 2011: 292-295.
- [51] BADAR M, HINO T, IWASHITA K. Phase noise cancelled OFDR with cm-level spatial resolution using phase diversity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(9): 858-861.
- [52] BADAR M, KOBAYASHI H, IWASHITA K. Spatial resolution improvement in OFDR using four wave mixing and DSB-SC modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(15): 1680-1683.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 帅禄玮, 叶蕾, 李璇, 等. 基于实时 STF-VCFIR 滤波器系统的 OFDR 谐波噪声消除[J]. 中国激光, 2025, 52(2): 178-185.  
SHUAI L W, YE L, LI X, et al. OFDR harmonic-noise elimination based on a real-time STF-VCFIR filter system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(2): 178-185.
- [59] LIU Q W, FAN X Y, HE Z Y. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25988-25995.
- [60] WANG S, FAN X Y, LIU Q W, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR [ J ]. Optics Express, 2015, 23(26): 33301-33309.
- [61] 戴建平, 邱锦波, 刘宏睿, 等. 基于内调制 DFB 激光器的高空间分辨率 TGD-OFDR[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 261-268.  
DAI J P, QIU J B, LIU H R, et al. High spatial resolution TGD-OFDR based on internally modulated DFB laser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 43(7): 261-268.
- [62] LI J X, DU J B, WANG S, et al. Improving the spatial resolution of an OFDR based on recirculating frequency shifter[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-10.
- [63] CHEN J G, LIU Q W, HE Z Y. Feedforward laser linewidth narrowing scheme using acousto-optic frequency shifter and direct digital synthesizer [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4657-4664.
- [64] 董毅, 谢玮霖, 冯宇祥, 等. 延迟自外差锁相控制的激光线性扫频技术及其应用[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 30-38.  
DONG Y, XIE W L, FENG Y X, et al. Laser linear sweep frequency technique based on delay self-heterodyne optical phase locking and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 30-38.
- [65] 梁昌硕, 白清, 延敏, 等. 基于光 IQ 调制的 OFDR 系统定位研究 [ J ]. 光学技术, 2021, 47(3): 315-320,333.  
LIANG CH SH, BAI Q, YAN M, et al. Positioning research on OFDR system with optical modulation [ J ]. Optical Technique, 2021, 47(3): 315-320,333.
- [66] 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.
- [67] 张嘉彤, 苏丽文, 刘畅, 等. 基于电流内调制 DFB 激光器的高空间分辨率 OFDR[J]. 光学学报, 2023, 43(23): 181-189.  
ZHANG J T, SU L W, LIU CH, et al. High spatial resolution OFDR based on in-current modulation of DFB laser[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(23): 181-189.

- [68] 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.
- [69] 刘仁华, 罗义军. 基于 LMS 算法和线性插值的光纤扰动定位系统[J]. *光通信技术*, 2019, 43(4): 58-62.  
LIU R H, LUO Y J. Optical fiber disturbance location system based on LMS algorithm and linear interpolation[J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(4): 58-62.
- [70] 余有龙, 王雪微, 王浩. 不同采样方式下光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1274-1278.  
YU Y L, WANG X W, WANG H. Analysis of peak-detection algorithms in fiber bragg grating by different sampling methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1274-1278.
- [71] BOWER B A, ZHAO M T, ZAWADZKI R J, et al. Real-time spectral domain Doppler optical coherence tomography and investigation of human retinal vessel autoregulation[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2007, 12(4): 041214-041214-8.
- [72] GÖTZINGER E, PIRCHER M, LEITGEB R A, et al. High speed full range complex spectral domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 583-594.
- [73] YÜKSEL 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.
- [74] VERGNOLE S, LÉVESQUE D, LAMOUCHE G. Experimental validation of an optimized signal processing method to handle non-linearity in swept-source optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10446-10461.
- [75] LIU J F, LYU K X, FAN X J, et al. A phase sensitive OFDR-based distributed optical fiber strain sensing system with high precision and spatial resolution [C]. 2023 IEEE 15th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). IEEE, 2023: 334-337.
- [76] LEITGEB R A, DREXLER W, UNTERHUBER A, et al. Ultrahigh resolution fourier domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2156-2165.
- [77] CHEN Y P, ZHAO H, WANG Z. Investigation on spectral-domain optical coherence tomography using a tungsten halogen lamp as light source [J]. *Optical Review*, 2009, 16(1): 26-29.
- [78] ABDULMOHSIN H A, WAHAB H B A, HOSSEN A M J A. A novel classification method with cubic spline interpolation [J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2022, 31(1): 339-355.
- [79] 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): 1-8.
- [80] FANG Z, LIANG C S, XU S W, et al. Spatial resolution enhancement of OFDR sensing system using phase domain-interpolation resampling method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3202-3210.
- [81] 申振, 张建国, 白清, 等. 频域插值与窗宽优化提升外调制 OFDR 空间分辨率研究[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(10): 1615-1621.  
SHEN ZH, ZHANG J G, BAI Q, et al. Study on spatial resolution improvement of externally-modulated OFDR with frequency domain interpolation and window width optimization [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(10): 1615-1621.
- [82] 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]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 066110.
- [83] SHILOH L, EYAL A. Distributed acoustic and vibration sensing via optical fractional fourier transform reflectometry [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4296-4306.
- [84] ZHU M S, MURAYAMA H. Fast demodulation of OFDR based long length FBG sensing system for noisy signals[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 19804-19814.
- [85] SONG M P, ZHUANG S W, WANG Y X, et al. Nonlinear phase compensated OFDR based on match fourier transform algorithm[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020, 1607(1): 012110.
- [86] 郁胜过, 张玲, 谢玮霖, 等. 基于遗传算法与 Zoom FFT 的光频域反射仪快速高精度频谱分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 80-86.  
YU SH G, ZHANG L, XIE W L, et al. Fast and high-resolution spectrum analysis of optical frequency domain reflectometry based on genetic algorithm and Zoom FFT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 80-86.
- [87] WU H, ZHAO C, LIAO R L, et al. Performance enhancement of ROTDR using deep convolutional neural networks[C]. *Optical Fiber Sensors*. Optica Publishing Group, 2018: TuE16.

- [88] LI S, XU Y P, LIU Z J, et al. High spatial resolution implementation method for OFDR system based on convolution neural network[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(24): 30481-30489.
- [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] 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.
- [91] 张昆, 白清, 周晓旭, 等. 基于中值滤波的 OFDR 二维形状感知精度提升研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 186-192.  
ZHANG K, BAI Q, ZHOU X X, et al. 2D shape sensing accuracy improvement based on OFDR using median filter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 186-192.
- [92] GUO H H, HUA P D, DING Z Y, et al. Elimination of side lobe ghost peak using wiener deconvolution filter in OFDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(21): 7208-7218.
- [93] 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.
- [94] LI S, XU Y P, LIU Z J, et al. High spatial resolution OFDR system based on independent component analysis algorithm for long-range distributed strain measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 42(5): 1716-1724.

- [95] 艾腾华, 吕悦娟, 艾轲, 等. 基于图像滤波的 OFDR 高性能分布式应变传感系统[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(13): 52-60.

AI T H, LYU Y J, AI K, et al. OFDR high-performance distributed strain sensing system based on image filtering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(13): 52-60.

## 作者简介



柯程虎(通信作者), 2006年和2011年于西安电子科技大学分别获得学士和硕士学位, 2020年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安文理学院教授, 主要研究方向为无线光通信及其组网技术研究。

E-mail: chenghuke@xawl.edu.cn

**Ke Chenghu** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xidian University in 2006, M. Sc. degree from Xidian University 2011 and Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2020. Now he is a professor at Xi'an University. His main research interests include wireless optical communication and its networking technology.



柯熙政, 1996年于中国科学院大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 主要研究方向为无线光通信理论与技术。

E-mail: xzke@263.net

**Ke Xizheng** received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1996. Now he is a professor at Xi'an University of Technology, Foreign academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His main research interest includes theory and technology of optical wireless communication.