

激光与光电子学进展

光频域反射计研究进展

朱坤垚^{1,2}, 江毅^{1,2*}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

摘要 光频域反射计(OFDR)是一种分布式光纤测量技术。将扫频激光注入光纤链路,对后向瑞利散射光进行频域分析,定位光纤链路上的反射点位置及强度。由于其具有高精度、高空间分辨率等特点,广泛地应用于航空航天、智能结构、材料加工、光学网络监测、生物医学等高精度测量及制造领域。本文阐述了OFDR的基本原理,介绍了提升OFDR系统性能的关键技术研究进展,最后总结了OFDR在不同领域的应用,展望了未来的发展趋势。

关键词 光频域反射计; 分布式光纤传感; 后向瑞利散射; 频域分析

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230768

Recent progresses of Optical Frequency Domain Reflectometry

Zhu Kunyao^{1,2}, Jiang Yi^{1,2*}¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China

Abstract Optical frequency domain reflectometer (OFDR) is a distributed optical fiber measurement technology. The scanning laser is injected into the optical fiber link, and the position and intensity of the reflection points on the optical fiber link are located by analyzing the Rayleigh backscattering scattering light in the frequency domain. Because of its high precision, high spatial resolution and other characteristics, it is widely used in aerospace, intelligent structure, material processing, optical network monitoring, biomedicine and other high precision measurement and manufacturing fields. In this paper, the basic principle of OFDR is described. The research progress of key technologies to improve OFDR performance is introduced. Finally, the application of OFDR in different fields and to the future development trend are summarized and prospected.

Key words optical frequency domain reflectometry; distributed optical fiber sensing; Rayleigh backscattering; frequency-domain analysis

1 引言

1981年,德国的Eickhoff等^[1]对光纤的后向瑞利散射进行频域分析,提出光频域反射计(OFDR)的概念。在典型的OFDR系统中,可调谐光源产生的激光被送入光纤,作为传感光与参考光发生干涉,根据所得信号的频谱信息,测量反射光的空间分布。其中,反射光一般由光纤固有的瑞利散射产生,可通过低反射率的连续写入的光纤布拉格光栅进行信号放大,OFDR技术最早用于分析光纤元件中光学光路的反射特性。

此后,OFDR被用于测试待测光纤(FUT)链路的衰减和缺陷,可在数十至数百米量级的短距离内达到毫米级空间分辨率。随着窄线宽可调谐激光器(TLS)的发展及对OFDR相位噪声抑制的深入研究,传感范围可达到百公里量级,且可进一步测量温度及应变。在多种光纤传感技术中,OFDR在短距离测量方面具备良好的空间分辨率、测量精度和传感实时性,因而在精密设备测试、组件测试、材料与装配测试等高精度测试场合下有着独特的优势。目前,OFDR传感参量已经从温度及压力扩展到振动、折射率、形状等多个方

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-04-01; 录用日期: 2023-04-20; 网络首发日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金企业联合创新重点基金项目(U20B2057)

通信作者: bitjy@bit.edu.cn

面,在航空航天、智能结构、材料加工、油气管道泄漏检测、光学网络监测、生物医学等领域的应用中有着重要意义。

近 30 年来,分布式光纤传感(DOFS)相关技术得到了大量研究,OFDR 也是 DOFS 的重要分支。不同的 DOFS 技术通过分析光纤中的后向散射信号的不同参数来实现分布式传感。目前最为常见的 DOFS 主要有光时域反射计(OTDR)和光频域反射计(OFDR)两种类型。其中 OTDR 使用脉冲光信号作为光源,通过对光纤后向瑞利散射进行时域分析,实现光纤线路监测,以测量待测光纤的衰减及缺陷。该技术可进一步细分为用于振动传感的 POTDR、 φ -OTDR、C-OTDR^[2-3],用于温度传感的 ROTDR^[4],同时可用于温度应变测量的 BOTDR 和 BOTDA^[5]。OTDR 相关技术已经较为成熟,且得到较为广泛的应用。但空间分辨率和信噪比的相互制约,限制了其在高精度传感方面的发展。OFDR 的出现,打破了这一局限性,但更为复杂的系统结构以及信号处理算法也为 DOFS 领域带

来新的挑战。

本文介绍了 OFDR 系统的传感机制以及信号解调原理,总结了 OFDR 系统性能的改进、优化方法,包括对相位噪声补偿方法,空间分辨率、传感距离以及解调算法的改进。列举了 OFDR 的相关应用,最后展望了 OFDR 的未来发展趋势。

2 OFDR 相关原理

2.1 OFDR 基本原理

OFDR 技术最初起源于雷达系统中的调频连续波(FMCW)技术,其基本结构和原理如图 1 所示,其中光源是线性调谐光源,通过耦合器将光波分为两束,其中一束光作为参考光注入参考臂,经过反射后重新进入耦合器;另一束作为探测光注入待测光纤(FUT),后向瑞利散射信号与参考信号在探测器上发生拍频。由于传感光纤不同的位置处对应的散射光相对于参考光具有不同的时间延迟,因此拍频信号的频率不同。通过频谱分析,即可解调出不同位置的瑞利散射信息。

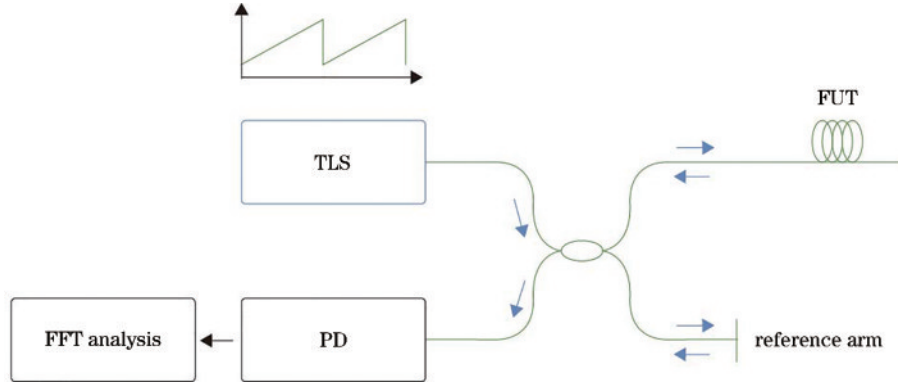


图 1 OFDR 系统典型结构

Fig. 1 Typical structure of OFDR system

以 ν_0 为起始光频, γ 为扫描频率的激光器输出光信号的频率可以表示为

$$\nu(t) = \nu_0 + \gamma t. \quad (1)$$

考虑到扫频光源存在相位噪声,因此参考光信号 $E_r(t)$ 可表示为

$$E_r(t) = E_0 \exp\{j[2\pi\nu_0 t + \pi\gamma t^2 + e(t)]\}, \quad (2)$$

式中: E_0 为参考光的光信号强度; $e(t)$ 为相位噪声。后向瑞利散射信号可写为

$$E_s(t) = \sqrt{R(\tau)} E_0 \exp\left\{j\left[2\pi\nu_0(t - \tau) + \pi\gamma(t - \tau)^2 + e(t - \tau)\right]\right\}, \quad (3)$$

式中: $R(\tau)$ 是与时间延迟 τ 相关的待测光纤反射率衰减。 $E_r(t)$ 和 $E_s(t)$ 相干涉产生的拍频信号可表示为

$$I(t) = 2\sqrt{R(\tau)} E_0^2 \cos\left\{2\pi\left[\gamma\tau t + f_0\tau + \frac{1}{2}\gamma\tau^2 + e(t) - e(t - \tau)\right]\right\}, \quad (4)$$

式中: $e(t) - e(t - \tau)$ 是拍频信号的相位噪声。测试光

纤上距离环形器 z 处的瑞利散射光信号与参考比信号经过混频后拍频信号频率 f_b 可以表示为

$$f_b = \gamma\tau = \frac{2n\gamma z}{c}. \quad (5)$$

由此可知,拍频信号的频率与 FUT 上的瑞利散射点的位置 z 线性相关。将时域上的拍频信号转化为频域进行分析,可以获得 FUT 上不同位置瑞利散射信号幅度信息。

2.2 OFDR 的信号解调

相较于 OTDR, OFDR 的解调过程更为复杂。由于后向瑞利散射是由光纤折射率的随机波动而引起的,可将 OFDR 类比为随机静态的长周期的弱光纤光栅(FBG),沿待测光纤某一位置的温度、应力等物理量的变化可以引起相应位置的光栅周期发生变化,从而使后向瑞利散射移动。为量化移动,可使用互相关法,将原始拍频信号和施加应力或改变温度后的拍频信号进行互相关,通过分析互相关后的偏移量实现分布式温度或应变传感。如图 2 所示, OFDR 系统

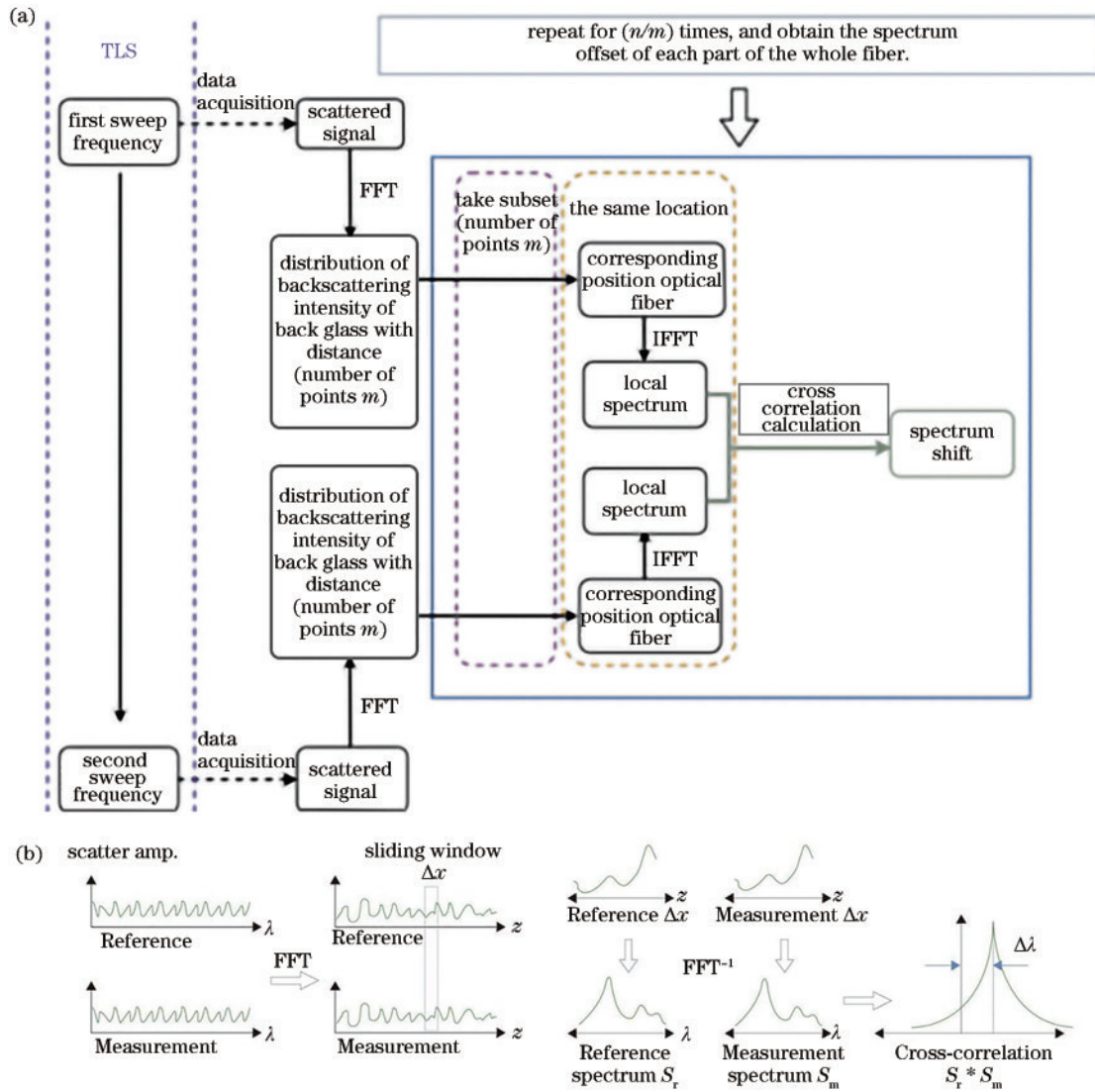


图 2 OFDR 系统解调过程。(a)解调步骤；(b)信号处理示意图

Fig. 2 Demodulation process of OFDR system. (a) Demodulation steps; (b) schematic diagram of signal processing

分别采集静止状态和施加应变或温度状态下的信号作为参考信号及测量信号,将两路信号分别做快速傅里叶变换,转换到距离域。利用长度为 Δx 的滑动窗将光纤分为若干段,最后对每段内的参考信号和测量信号进行傅里叶逆变换转换回频域,进行互相关分析,可以在多段传感光纤上得到光谱的偏移大小,进而得到温度或应变的变化^[6]。

3 提高 OFDR 传感系统性能的关键方法及研究现状

自 OFDR 提出以来,由于其在测量精度和实时性方面的独特优势而受到研究人员的关注,逐步探究提高系统性能的方法。OFDR 系统的性能受到 TLS 质量,信号采集及处理等方面的影响。本节主要介绍 OFDR 系统性能改善的相关方法。包含非线性扫频问题的改善,空间分辨率、测量范围的提升方法。

3.1 OFDR 系统非线性扫频改进方法

OFDR 依靠快速傅里叶变换将频域信号转换为空间域信号,需要对拍频信号以等光频间隔采样,因此系统的正常运作高度依赖作为光源的可调谐激光器 (TLS) 的线性特性。但由于传统 TLS 的扫频机制,普遍存在一定的非线性扫频问题,扫描频率会随时间发生变化,因此频域反射峰展宽,反射强度降低,信号峰值功率分散,空间分辨率降低^[7],如图 3 所示。非线性扫频问题显著影响 OFDR 系统的空间分辨率,进而影响解调质量及系统性能。

抑制 TLS 非线性噪声是提高 OFDR 系统性能的关键。解决这一问题的方法主要分为两种:1) 改变 TLS 的调谐原理以降低非线性;2) 采用相应算法对含有相位噪声的信号进行补偿。

3.1.1 内调制 TLS 的非线性补偿

针对非线性扫频引起的空间分辨率下降问题,最直接的方法是提高 TLS 的扫频质量。按调制方式区

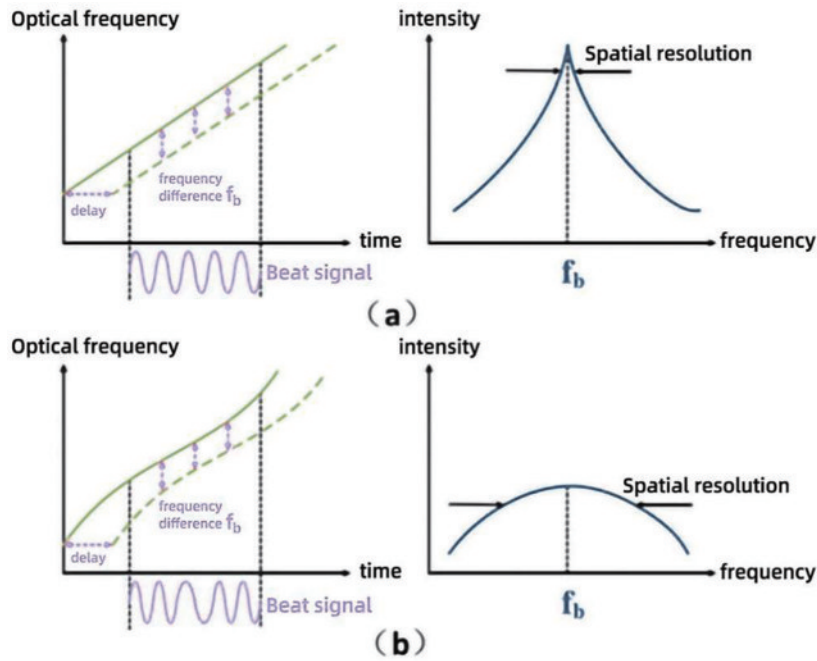


图3 TLS扫频与空间分辨率^[7]。(a)无非线性扫频；(b)有非线性扫频

Fig. 3 TLS sweep frequency and spatial resolution^[7]. (a) Without nonlinear sweep frequency; (b) with nonlinear sweep frequency

分,用于OFDR的TLS可分为内调制和外调制。内调制TLS的优化,主要集中在调谐速率。

2010年,Boukari等^[8-9]将直接调制分布式反馈激光器(DFB)用于OFDR系统,实现在230 GHz/ μ s扫频速率下的线性扫频,验证了DFB激光器作为OFDR可调谐光源的可行性。2015年,西安交通大学的刘志刚团队采用基于子空间状态的系统辨识方法,对外腔激光二极管的非线性建立等效模型^[10],通过校正压电转换器驱动信号对其进行反向补偿,有效抑制了光频率扫描的非线性,实现0.99975决定系数的线性扫频,使用此光源的OFDR系统,定位标准偏差减小到7 μ m以下。2019年,Tkachenko等^[11]使用自扫描单频激光器作为光源,通过脉冲数变化进行频率调制,从而实现线性扫频,在9 m测量距离上实现-80 dB的传感灵敏度。Ndiaye等^[12]在OFDR的高精度光学测距系统中,研究了Nd:YVO₄晶体为增益介质的移频反馈激光器(FSFL)的性能,FSFL在45 GHz带宽范围内产生带有啁啾分量梳状结构的。在测量距离为5 m、数据测量时间为2 ms时,距离精度高于25 μ m。内调制TLS易于实现,扫描范围较大,理论上更容易在OFDR系统中获得更高的空间分辨率,且不需要额外的外调制源,然而较外调制TLS而言,其光源线宽更宽,相干长度更短,这也限制了其在长距离测量方面的应用。

3.1.2 外调制TLS的非线性补偿

2011年,He等^[13]提出了延迟移位平均(DSAV)方案,通过使用调谐频率梳来抑制衰落噪声,使用可调延迟线(TDL)在不同光学延迟下获得多个OFDR信号,可达到300 m的测量距离和5 cm的空间分辨率。2019年,上海交通大学的Qin等^[14]提出一种长距离OFDR

系统,该系统使用基于光学锁相环(OPLL)的相干增强型光纤激光器。扫频光纤激光器首先由外部预失真压电陶瓷(PZT)电压驱动,初步消除扫描非线性。将输出光锁定到全光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)之中,以进一步抑制扫描的非线性并提高光源的相干长度。其实验系统如图4所示,使用线宽约为5 kHz的单模分布式反馈(DFB)光纤激光器,通过压电调谐实现激光器频率调谐,调制带宽约为20 kHz。输出光被分为两部分,90%的输出光用于FMCW测距实验,10%的部分又分为两束,其中一束耦合到参考MZI中,用于有源线性化OPLL的控制。参考MZI的一臂带有40 MHz的声光移频器(AOFS),另一臂使用保偏光纤用于避免偏振衰落问题。另一束耦合到辅助MZI,用于PZT驱动电压的预失真和扫频光纤激光器的动态频率噪声频谱测量。该方法成功降低了扫描期间的激光频率噪声。如图5所示,在OPLL锁相状态下(5 ms后),动态频率噪声得到有效抑制,成功实现了在25 ms时间内1 GHz范围的高相干线性扫描,在200 km的光纤链路上达到0.72 m的空间分辨率。

2021年,北京理工大学的董毅课题组报道了基于延迟自外差光锁相的激光扫频非线性和相位噪声控制方法^[15],锁相控制的扫频激光生成原理如图6所示。波长可调谐光纤激光器在预畸变锯齿信号的驱动下,输出频率扫描激光,部分光经由光纤延迟线和声光频移器组成马赫-曾德尔干涉结构,与平衡光电探测器进行延迟自外差拍频,将激光扫频误差转换为拍频信号相频误差,经环路滤波后,反馈控制扫频驱动信号,校正扫频误差,实现扫频范围为8 GHz,扫频速度为160 GHz/s

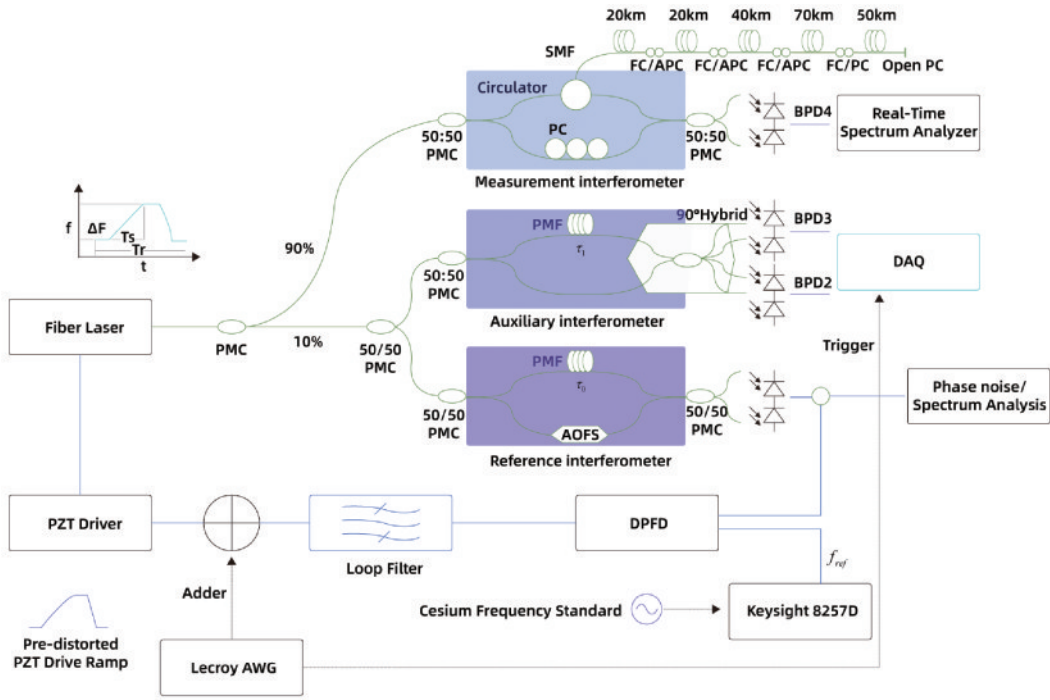


图 4 基于 OPLL 的长距离 OFDR 系统结构^[14]

Fig. 4 Structure of long-distance OFDR system based on OPLL^[14]

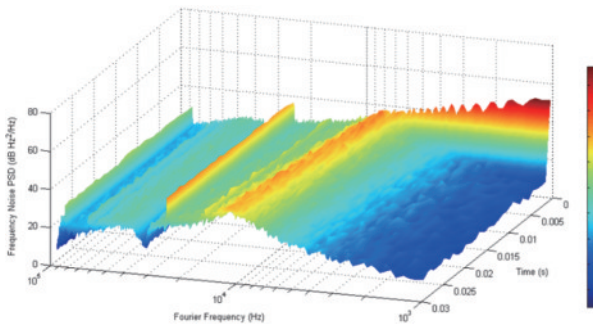


图 5 使用 OPLL 的 OFDR 系统动态频率噪声^[14]

Fig. 5 Dynamic frequency noise of OFDR system using OPLL^[14]

的低相频噪声高线性激光扫频,完成动态范围为 27 dB、空间分辨率为 4.3 cm 的 240 km 光纤链路损耗测量及空间分辨率为 5 cm 的分布式光纤应变传感。

3.1.3 硬件补偿

1993 年,Glombitza 等^[16]为传统 OFDR 系统加入辅助干涉仪,以辅助干涉仪的采样信号作为主干涉仪系统信号的采样触发时钟,得到了等频率间隔的采样信号,从而实现非线性调谐与相位噪声的补偿,这种方法称为频率采样法,即硬件补偿法。其示意图如图 7 所示,辅助干涉仪的零点用于触发采样时钟以保证等频率间隔的采样。这一方法成功在 35 m 测量距离上实现了 50 μm 空间分辨率的传感。

由奈奎斯特采样定律,传感光纤的最大长度 L 由辅助干涉仪光纤长度^[17]决定,可表示为

$$L = \frac{c\tau}{4n}, \quad (6)$$

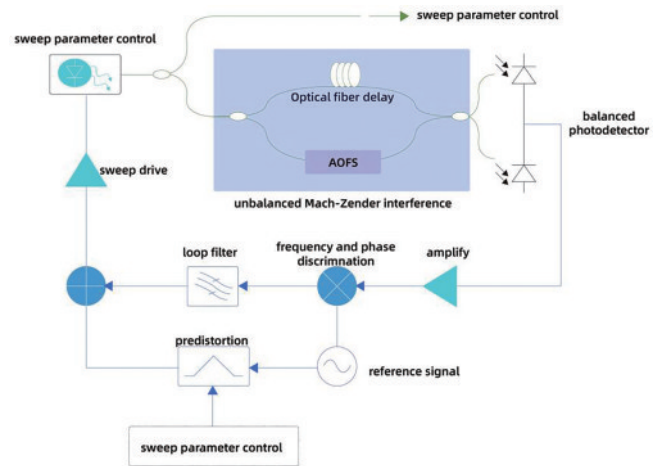


图 6 光锁相控制的扫频激光生成原理图^[15]

Fig. 6 Schematic diagram of sweep laser generation controlled by optically locked phase^[15]

式中: c 为真空光速; τ 表示辅助干涉仪引入的延迟; n 表示光纤长度。由此可知,在频率采样法中,传感光纤的最大长度受限于辅助干涉仪的光程差,这一方法仅适用于传感距离较短的应用场合。

2006 年,Iiyama 等^[18]为硬件补偿 OFDR 系统中的辅助干涉仪加入 PLL 电路对辅助干涉仪的时钟触发信号进行倍频,等比例提升了辅助干涉仪信号频率,获得更高的采样频率,使得测量距离达到了 4.48 km,空间分辨率达到 100 μm。2008 年,Moore 等^[19]分析了频率采样误差的来源,并在实验中利用不同种误差之间的相互抵消作用,将相位误差改善了一个数量级。在这一研究的基础上,2016 年,天津大学的刘琨团队建

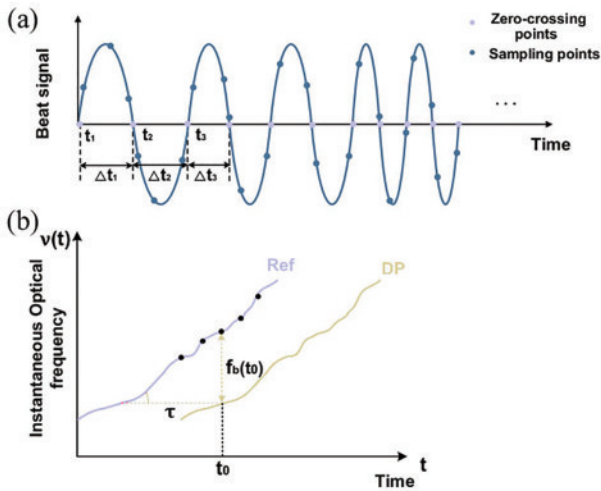


图 7 硬件补偿法^[16]。(a)非线性扫频下的拍频信号及采样点示意图;(b)拍频信号产生示意图

Fig. 7 Hardware compensation method^[16]. (a) Schematic diagram of beat signal and sampling point under nonlinear frequency sweep; (b) schematic diagram of beat signal generation

立了外部时钟采样误差模型^[20],通过该模型推导出外部时钟信号的瞬时抖动与空间分辨率之间的解析表达式并进行实验验证。在 310 m 的测量长度下,通过减少 OFDR 系统中外部时钟的采样误差,空间分辨率达到 4.8 cm,应变传感精度达到 0.15 m。2019 年,哈尔滨工业大学的 Zhao 等^[21]采用定制电路产生过零检测的外部时钟,实现拍频为 20 MHz 的过零检测,最大传感距离达到与辅助干涉仪相同的长度。如图 8 所示,将辅助干涉仪信号取反,与未取反的原始信号送入两个比较器。两个比较器的输出送入异或门,辅助干涉仪信号每半个周期即出现一次方波信号。使用微分单元将方波信号转换为窄脉冲,用作触发信号。触发信号的上升沿出现在辅助干涉仪信号过零之后,延时 ΔT 取决于电路延时。

硬件补偿具有信号处理难度低、实时性高等优势,但奈奎斯特采样定律限制了测量长度,辅助干涉仪的臂长差对测量距离存在制约,不适用于长距离 OFDR 的传感。

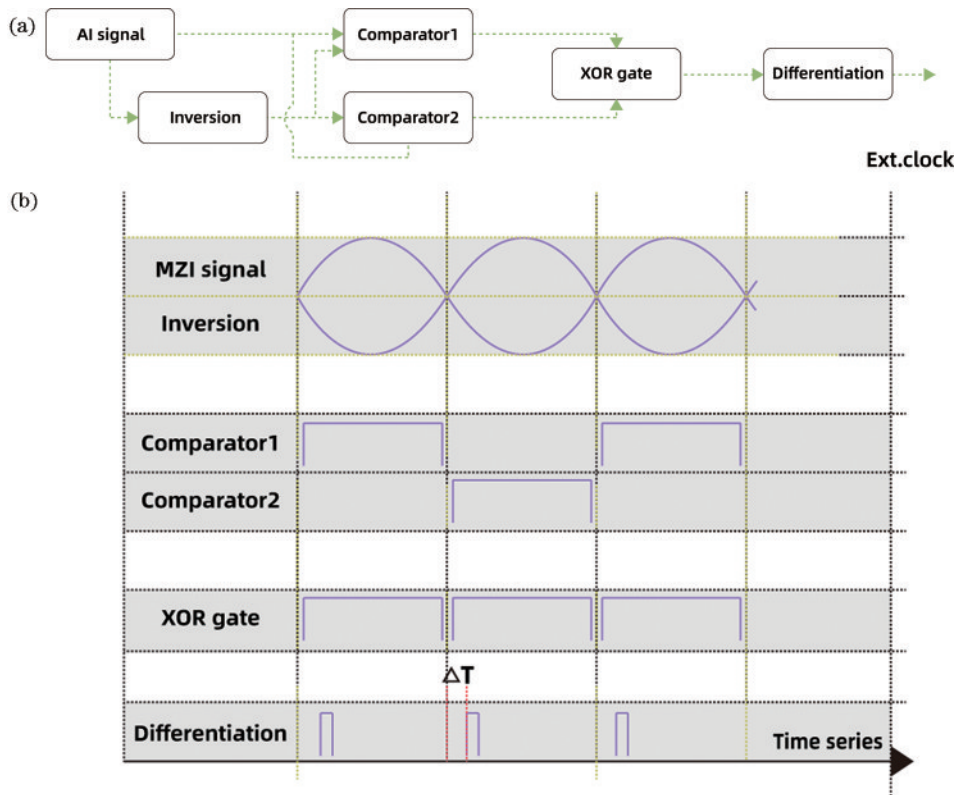


图 8 过零检测 OFDR^[21]。(a)辅助干涉仪信号过零检测电路方案;(b)电路各节点时序分析

Fig. 8 Zero-crossing detection OFDR^[21]. (a) Auxiliary interferometer signal zero-crossing detection circuit scheme; (b) timing analysis of each node of the circuit

3.1.4 软件补偿

相较于硬件补偿,软件补偿是应用更为广泛的补偿方法,其系统结构与硬件补偿相似,包含主干涉仪及辅助干涉仪,不同的是,辅助干涉仪的信号不用于触发采样,而是用于获取相位信息,从这些相位信息中推断

每个采样点调谐光频率。2005 年, AHN 等^[22]在 OFDR 系统中通过对辅助干涉仪信号进行希尔伯特变换获取相位信息,这也是目前最常用的 OFDR 辅助干涉仪相位信息获取方法。

软件补偿方法主要包括重采样法和去斜滤波器

法。对于理想情况下的线性扫频而言,以等时间间隔采样的数据点,频率间隔也相等,其相位呈线性变化。但由于非线性调谐现象,需要对等时间间隔的采样点进行重采样,转化为等频率间隔采样,这种方法称为重采样法。

在重采样法中,需要进行插值处理,找到等频率间隔的采样点。为提高重采样方法的插值结果的精度,2014年,Song等^[23]采用三次样条插值法补偿OFDR系统温度或应变测量的非线性,光源扫描范围为6 nm,在300 m的测量长度下可实现0.3 mm的空间分辨率,温度和应变的分辨率分别达到0.7 °C和2.3 με,与线性插值相比,插值精度有明显提升。2019年,Xing等^[24]提出一种基于时间尺度因子方法来校正非线性频率扫描。采用扫频范围1541~1550 nm的扫频光源,

当辅助干涉仪的延迟光纤长度为200 m时,可测范围达到155 m,空间分辨率达到0.17 mm。

非均匀傅里叶变换(NUFFT)方法也是重采样方法之一。2012年,天津大学的丁振扬团队首次将NUFFT用于OFDR中^[25]。NUFFT的计算步骤如图9所示。将实心圆所代表的原始非均匀采样数据 $x(\nu_n)$ 与高斯窗函数 $w(\nu_n)$ 进行卷积,以均匀频率间隔对卷积结果进行重采样得到 $x(\nu_k)$ 。利用傅里叶变换将 $x(\nu_k)$ 和 $w(\nu_n)$ 转换为频域信号 $X_G(z_n)$ 和 $W(z_n)$ 。用 $W(z_n)$ 将 $X_G(z_n)$ 反卷积,得到 $X_{app}(z_n)$ 。 $X_{app}(z_n)$ 即为重采样后的频域信号。通过这一方法消除TLS频率调谐非线性的影响,与常规傅里叶变换(FFT)方法相比,空间分辨率提高了100倍。

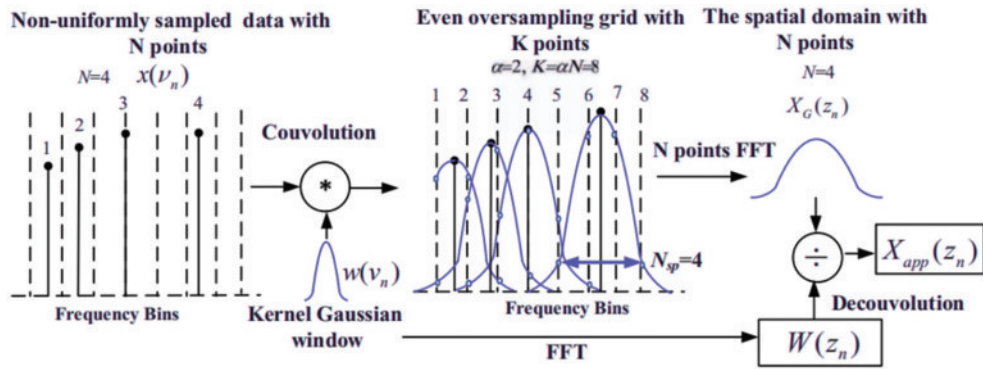


图9 NUFFT信号处理步骤^[25]
Fig. 9 NUFFT signal processing steps^[25]

Fan等^[26-27]提出基于“串联生成相位”(CGP)法的相位补偿OFDR(PNC-OFDR),其系统结构如图10所示。辅助干涉仪的时延为 τ_{ref} 时,常规的重采样方法仅可有效地补偿FUT上时延与 τ_{ref} 相近的部分,远超辅助干涉仪的部分无法补偿。在CGP方法中,具有 $N\tau_{ref}$ (N 为正整数)时延的辅助干涉仪,其相位 $X_N(t)$ 满足:

$$X_N(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_1(t - n\tau_{ref}), \quad (7)$$

式中: $X_1(t - n\tau_{ref})$ 是辅助干涉仪在时延为 $t - n\tau_{ref}$ 下的拍频相位项。将采集到的信号进行希尔伯特变换后,可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仪臂长的FUT进行相位补偿。Ito等^[27]使用CGP法,对扫频范围12 GHz的TLS,通过16阶相位噪声补偿,实现40 km测量距离下6 cm的空间分辨率,补偿前后的空间分辨率提升了20倍,如图11所示。在OFDR长距离光纤测试方向取得了显著的成果。

去斜滤波器法最早用于微波领域中消除调频连续合成孔径雷达(SAR)系统中,以消除非线性效应^[28]。Ding等^[29-31]使用优化的去斜滤波器用于消除OFDR系统相位噪声,其算法流程如图12所示。使用扫频范围1 GHz的TLS,可在80 km的测量距离上达到80 cm的空间分辨率,与不采用非线性补偿的OFDR系统相比,空间分辨率扩大了187倍。

3.1.5 短调谐范围法

随着调谐范围的增加,TLS的相位噪声会相应加剧,通过减小扫频范围,可以减小相位噪声,短周期调谐

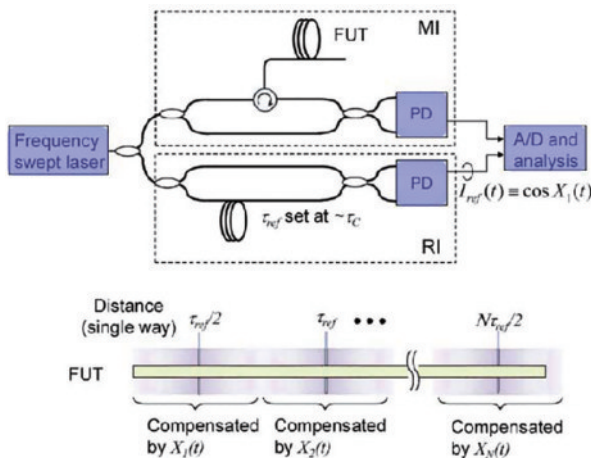


图10 使用GCP进行相位补偿的PNC-OFDR系统示意图^[26]
Fig. 10 Schematic diagram of PNC-OFDR system using GCP for phase compensation^[26]

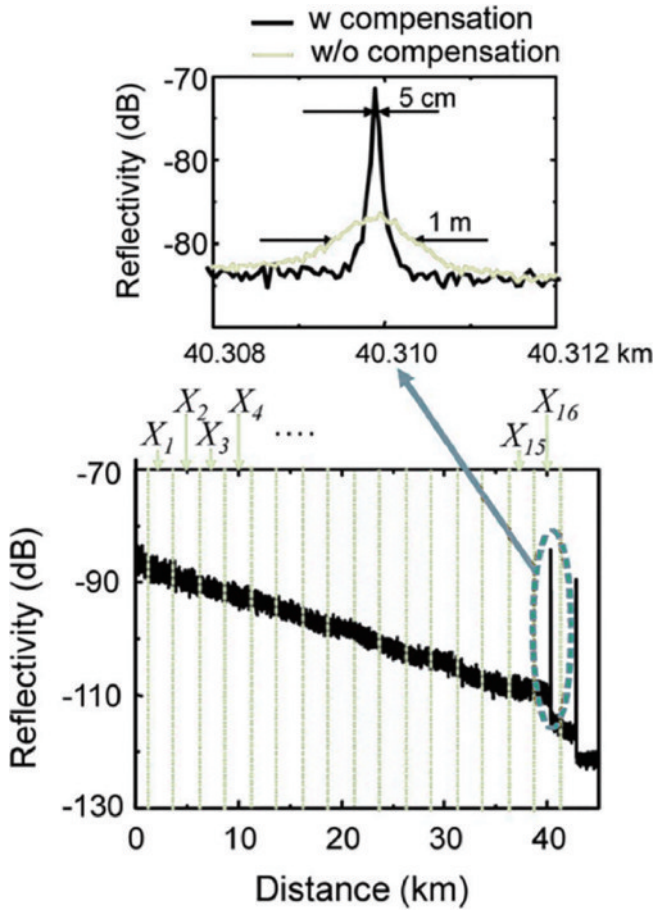


图 11 PNC-OFDR 系统相位噪声补偿前后瑞利强度曲线及 40 km 处的空间分辨率^[27]
 Fig. 11 Rayleigh intensity curve of PNC-OFDR system before and after phase noise compensation and spatial resolution at 40 km^[27]

可进一步增加扫描线性度,提升测量范围,但空间分辨率会显著下降。Arbel 等^[32]使用调谐速率 1012 Hz/s 的 TLS,缩短调谐周期至 16 μ s,成功检测到 10 km 测量长度上局部脉冲和正弦激励,实现分布式动态声学传感。

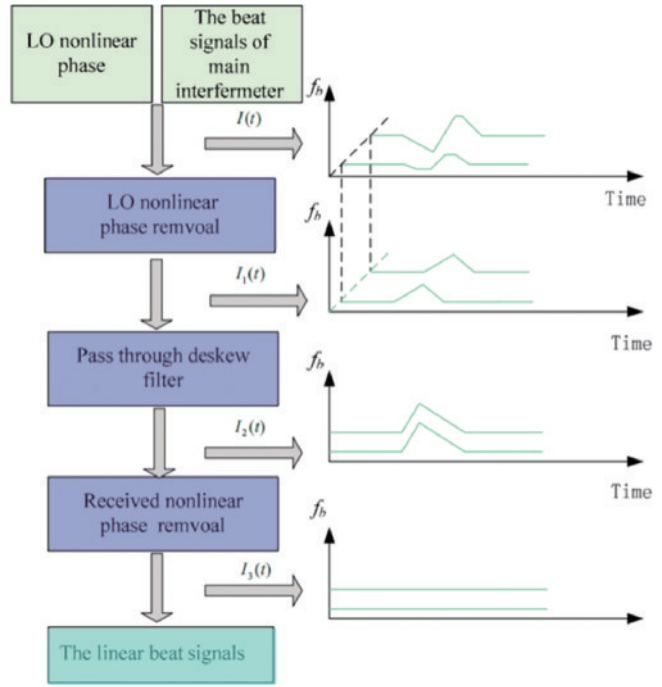


图 12 去斜滤波器法信号处理示意图^[29]
 Fig. 12 Signal processing diagram of declining filter method^[29]

3.1.6 其他相位噪声补偿方法

2015 年,上海交通大学的 Liu 等^[33]提出时间门控技术用于 OFDR (TGD-OFDR),实验装置如图 13 所示。使用标称线宽为 1 kHz 的光纤激光器作为光源。AOM 由射频信号发生器 (RFSG) 驱动,频率扫描范围为 150~250 MHz,时间窗口为 8 μ s,仅受 AOM 带宽的限制。为了增加光波频率啁啾范围,采用了带有法拉第旋转镜 (FRM) 的双通道结构。在两次通过 AOM 后,探测光束从 300 MHz 啁啾到 500 MHz。在 8 μ s 的时间窗下,激光啁啾率高达 25 THz/s,对应距离与拍频的比值为 4 mm/kHz。该技术产生与 FUT 长度无关的高频啁啾,有效抑制激光相位噪声和环境扰动,实现

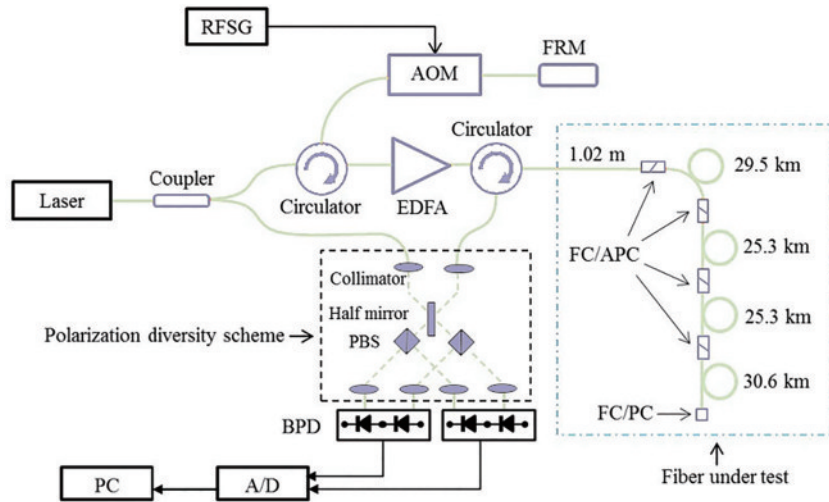


图 13 TGD-OFDR 系统实验装置^[33]
 Fig. 13 TGD-OFDR system experimental configuration^[33]

测试距离 110 km 处的 1.64 m 空间分辨率。戴建平^[34]利用内调制频率调谐实现高空间分辨率 TGD-OFDR,设计基于 MZI 和 PID 算法的扫频非线性预失真系统,在 74 km 的光纤链路上实现 10 cm 的空间分辨率。Wang 等^[35]提出并验证了一种利用光纤延迟环补偿 OFDR 相位噪声的方法,该光纤延迟环主要由延迟光纤和频移器组成。采用延时光纤来缩短干涉仪两臂间的光程差,采用移频器作为计数器来计算环路中循环的光波数。实验表明,该方法具有良好的补偿效果,采用 80 MHz 扫频范围的 TLS,在 30 km 的测量范围内实现了 10 cm 的空间分辨率。2020 年,浙江大学的 Song 等^[36]提出基于匹配傅里叶变换(MFT)算法的非线性相位补偿方法,将差频信号的非线性相位表示为多项式相位函数,主干涉仪的非线性相位可通过匹配傅里叶变换进行补偿。该系统采用 1.3 GHz 的频率扫描激光器,经过补偿后的系统在 4.3 km 测量距离处,达到 0.2 m 的空间分辨率。

2022 年, Fang 等^[37]提出使用相域插值重采样法(PDIR)补偿非线性,以提高 OFDR 传感系统空间分辨率。其算法流程如图 14 所示。辅助干涉仪产生的拍频信号相位与扫描时间存在对应关系,采用希尔伯特变换得到的拍频信号的瞬时相位,由于 TLS 调谐频率与相位变化近似成正比,因此可以通过 PDIR 方法直接对主干涉仪信号进行插值,拍频信号在相位域中

进行处理,处理时间大幅减少,由插值引起的误差显著降低。采用 8.9 nm 扫频范围的窄线宽 TLS,该团队验证了在 302 m 的单模光纤中 0.15 mm 的空间分辨率。

3.1.7 小结

对于几种典型相位噪声补偿方案的系统性能指标,总结见表 1。

表 1 几种典型相位噪声补偿方法比较
Table 1 Comparison of several typical phase noise compensation methods

Phase noise compensation method	Spatial resolution	Measurement range
FSFL ^[12]	25 μm	5 m
DSAV ^[13]	0.97 cm	710 m
OPLL ^[14]	0.72m	200 km
CGP ^[27]	6 cm	40 km
Cubic spline interpolation ^[23]	0.3 mm	300 m
NUFFT ^[25]	5 cm	51 m
Deskew filter ^[30-32]	80 cm	80 km
TGD-OFDR ^[33]	1.64 m	110 km
MFT ^[35]	0.2 m	4.3 km
PDIR ^[36]	0.15 mm	302 m

目前,相位噪声补偿的相关研究重点,在于优化光源及相位噪声补偿算法。针对光源优化方法主要为改变其频率扫描方式,减小线宽、改变频率扫频范围。但以上几个指标之间在一定程度上会相互制约,且窄线宽、大扫频范围光源成本高昂,限制了 OFDR 的广泛应用。相位噪声补偿方法中,数据的处理必须要在数据全部采集完成后进行,无法实现非线性的实时补偿,且非线性补偿效果依赖于扫频曲线计算的准确性,当激光器非线性较大时,扫频曲线的计算容易出现误差,补偿效果变差。因此,效率更高,成本更低,准确度更高的非线性补偿方法有着重要的研究意义和较大的发展空间。

3.2 系统性能优化

目前,OFDR 相关研究及应用逐渐朝着高分辨率、长距离、高精度方向发展,系统信号更为复杂,信号处理难度大且更容易受噪声影响。高性能的 OFDR 系统不仅需要良好的光源,也对相关的软硬件技术提出了挑战。

3.2.1 提高空间分辨率

在 OFDR 系统中,空间分辨率不仅与 TLS 扫频线性度有关,也与光学扫频范围有关。光源扫频范围与 OFDR 系统空间分辨率 ΔZ 的关系为

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

式中: λ 表示光源中心波长; $\Delta\lambda$ 代表扫频范围。由此可知,更宽的扫频跨度有助于获得更高的空间分辨率。

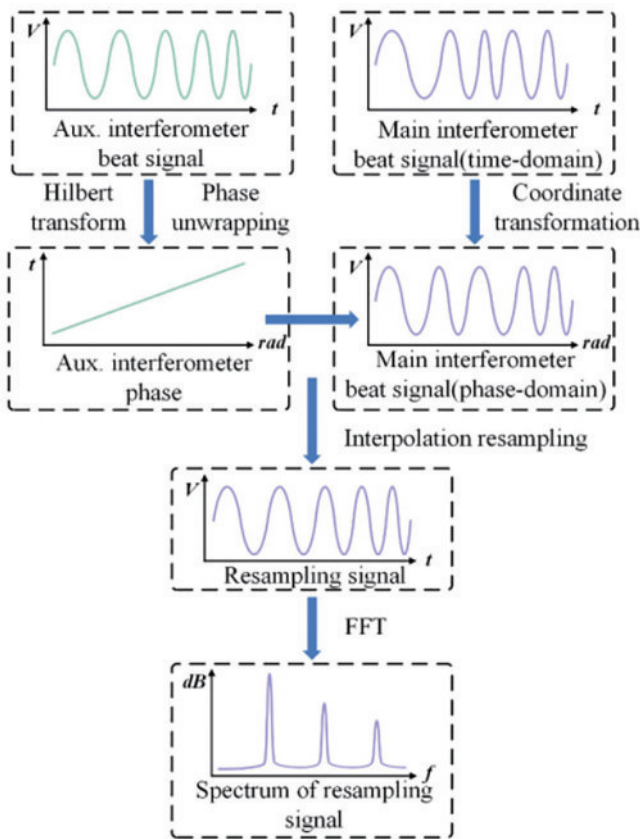


图 14 PDIR 算法流程^[37]

Fig. 14 PDIR algorithm flow^[37]

目前 OFDR 系统^[38]采用单边带调制器(SSB-SC)或双边带调制器(DSB-SC)实现扫频。然而,由于电子器件的瓶颈,射频扫描的广度和速度受到限制。一般来说,线性和连续的光学扫频跨度被限制在几 GHz 的范围内,而且高频组件通常很昂贵。当射频信号在较大的频率范围内扫频时,SSB 调制性能会产生波动。因此,利用窄范围的射频扫频调制实现更宽的光学扫频具有重要的实际应用意义。

2015 年,上海交通大学的刘庆文团队等利用循环移频器(RFS)获得 12 倍加宽的频率扫描范围,在 710 m 测量距离上实现 0.97 cm 空间分辨率的传感^[39-40]。Xu 等^[41]使用高阶调制边带的方法得到了 10 倍的扫频范围展宽,并对该技术进行进一步的优化,与退化四波混频(FMW)相结合,与射频扫频相比,实现了 21 倍宽的

光学扫频,在 638.4 MHz 的扫频范围下,获得 0.75 cm 空间分辨率^[42],显著提高了扫频范围。

Hiramatsu 等^[43-45]提出了使用双边带抑制载波调制(DSB-SC)消除相位噪声的方法。2016 年,Badar 等^[46]将 DSB-SC、四波混频(FWM)与注入锁定技术相结合,用于 OFDR 的外调制光源,使用仅具有单个光源的退化四波混频,在保证相干长度的前提下,通过增加扫频范围提高 OFDR 空间分辨率,其系统结构如图 15 所示。与传统 OFDR 相比,使用这一技术可将扫频范围扩大 3 倍。在 1 GHz 频率扫描跨度下实现约 10 cm 的空间分辨率。2017 年,Wang 等^[47]使用注入锁定技术和四波混频技术实现扫频范围 100 GHz 的超线性扫频光源,在 2 km 测量范围内达到 1.1 mm 的空间分辨率。

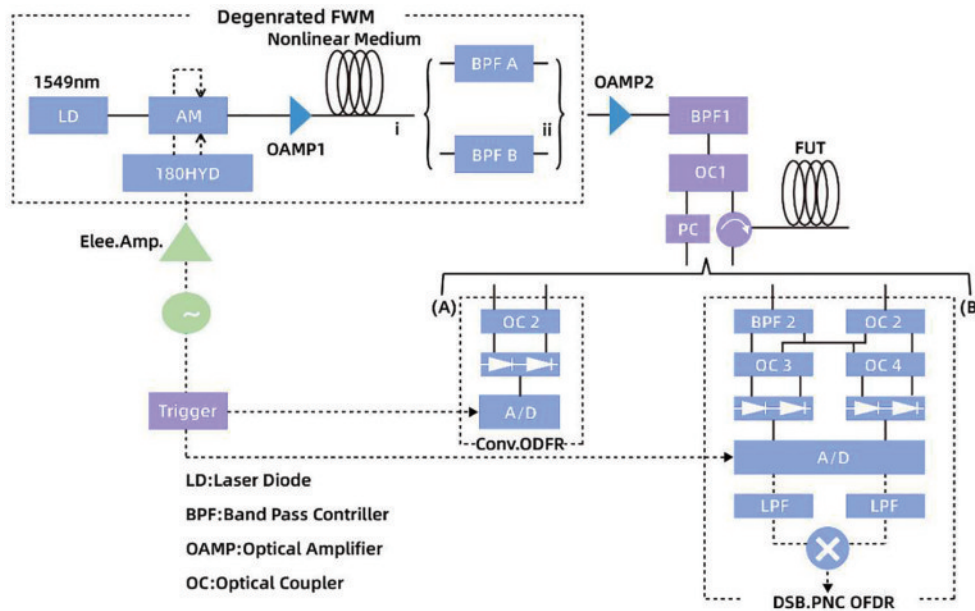


图 15 传统 OFDR 与 DSB-PNC OFDR^[46]。(A)传统 OFDR; (B) DSB-PNC OFDR

Fig. 15 Typical OFDR and DSB-PNC OFDR^[46]. (A) Typical OFDR; (B) DSB-PNC OFDR

在提高空间分辨率的算法研究方面。2019 年, Feng 等^[48]提出 Morlet 小波变换提高 OFDR 系统分布式传感物理量的分辨率,证明了小波参数与传感参数之间存在的关系,解决了小波参数优化问题,实现应变分辨率 1 $\mu\epsilon$,空间分辨率为 5 mm,且达到了 4.3 $\mu\epsilon$ 的稳定性 OFDR 系统。2022 年,Guo 等^[49]使用维纳反卷积滤波器方法,消除由 TLS 多峰和辅助干涉仪的反射对 FUT 测量的影响,得到 1.3 mm 的空间分辨率。

3.2.2 提升测量距离

传统 OFDR 技术采用基于距离域滑动窗分析和频率域互相关的解调算法进行传感数据解调,这一方案能满足常规小幅度应变、温度变化场景中实现较准确的传感数据解调,在某些特殊的环境中性能显著下降、适用性差 FFT 过程中,会产生对称的频谱,一半频谱为频域数据,另一半频谱为其镜像,这一问题使得传统 OFDR 系统的测量距离为相干长度的一半。为克

服这一测量范围限制,韩国 Kim 等^[50]提出并仿真了能够扩展动态范围的 OFDR 模型,采用 $\pi/2$ 相移技术,得到复杂的干扰信号,并进行处理,去除频域的直流峰和镜像峰,显著增大动态范围。Kim 等^[51]在这一工作的基础上,提出一种适用于分布式应变和温度传感 OFDR 系统的双向决定技术。其系统示意图如图 16 所示,在该系统中,采用 3×3 耦合器进行移相,得到两个相位差 $\pi/2$ 的信号,将获得的两个信号调整为复数,使零频点以下的频域信号包含更多信息,通过区分为正负位置的双向决定算法进行数据处理,成功进行了双向分布式应变和温度传感。在 200 m 的全相干长度测量距离上,成功进行了双向分布式应变和温度传感,达到 0.1 m 的空间分辨率,有效增加了一倍的测量距离。Gabai 等^[52]在 OFDR 系统中采用同相正交检测(I/Q)获得双向散射谱。如图 17 所示,在这一系统中使用 90° 光学混合接收器检测反向散射干涉光波的同

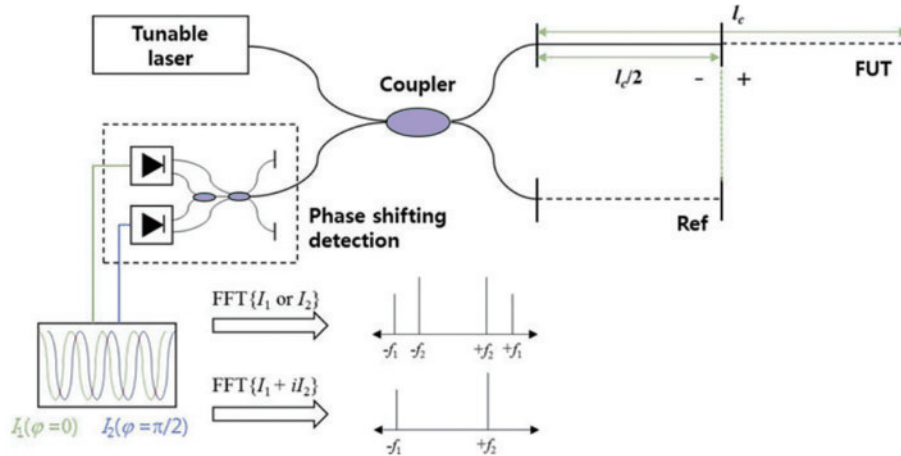


图 16 采用双向决策算法的 OFDR 系统^[51]

Fig. 16 OFDR system with bidirectional decision algorithm^[51]

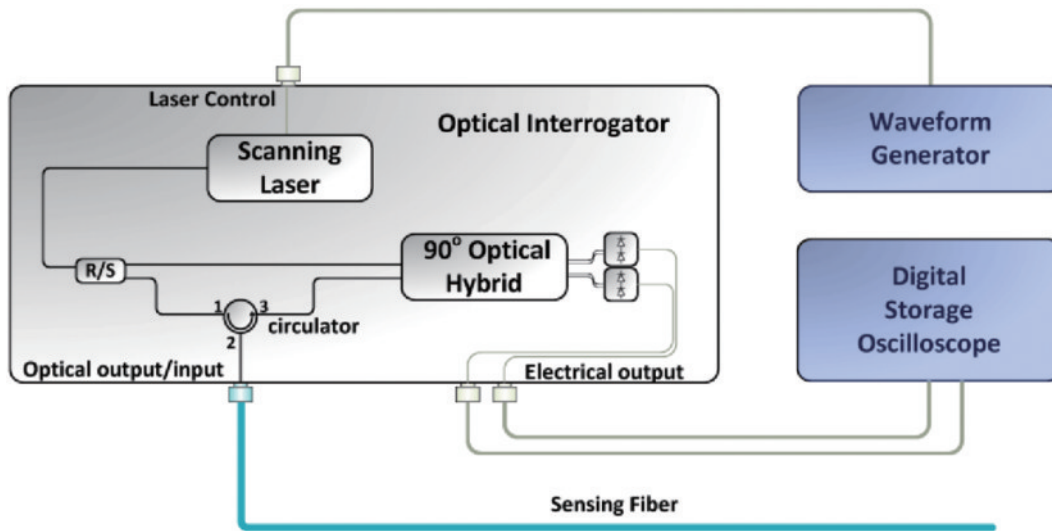


图 17 基于同相正交检测的 OFDR 系统^[52]

Fig. 17 OFDR system based on I/Q detection^[52]

相(I)和正交(Q)分量。I和Q分量组合以产生复杂的后向散射信号,对这一信号进行处理,使FUT的一半映射为正拍频,另一半映射成负拍频,有效增加频率响应范围。吕明星等^[53]设计了基于I/Q调制的光频域反射仪多芯光纤传感系统。使用I/Q调制技术,实现光源线性扫频,利用多芯光纤结构关系,获得OFDR系统中七芯光纤的应变矢量信息,当光源扫频范围990 MHz时,在87 m七芯光纤中得到28.35 cm弯曲应变空间分辨率。

当被测光纤长度超过光源的相干长度时,可使用OFDR技术探测弱相干信号,如Ding等^[54]探测超相干情况下的菲涅耳反射,实现对170 km光纤末端菲涅耳反射峰的探测,反射点的空间分辨率为200 m。Baker等^[55]通过在OFDR系统中加入克尔介质实现超相干情况下的光纤测量,测量的强反射点为151 km,空间分辨率为11.2 cm。弱相干测量可以实现更长的测试距离,但仅能测试分立式强反射信号。

3.2.3 降低测量误差

2019年,重庆大学的Shao等^[56]提出局部光谱匹配方法,通过匹配光谱中的最相似部分确定应变引起的波长偏移。与传统互相关方法相比,减少了数据计算量,将测量速率提高到800 Hz,且有效消除传统互相关法的多峰、假峰问题,有效提高了空间分辨率。在1 m的光纤测量长度下,二维形状重建误差小于1 cm。2019年,Luo等^[57]使用位置补偿算法,计算了由热光系数计算系统偏差,重建瑞利散射光谱。该方法在25 m的FUT末端实现0.5 mm的空间分辨率和15 με的测量精度。2020年,Cheng等^[58]针对OFDR应变传感系统中的位置偏差,提出递归解调补偿算法,如图18所示。该算法补偿了每个测量点的位置偏差,其在30 m长的测量范围内,实现5 mm的空间分辨率。

3.2.4 小结

本小节所列举的性能提升方法及相关指标总结见表2。

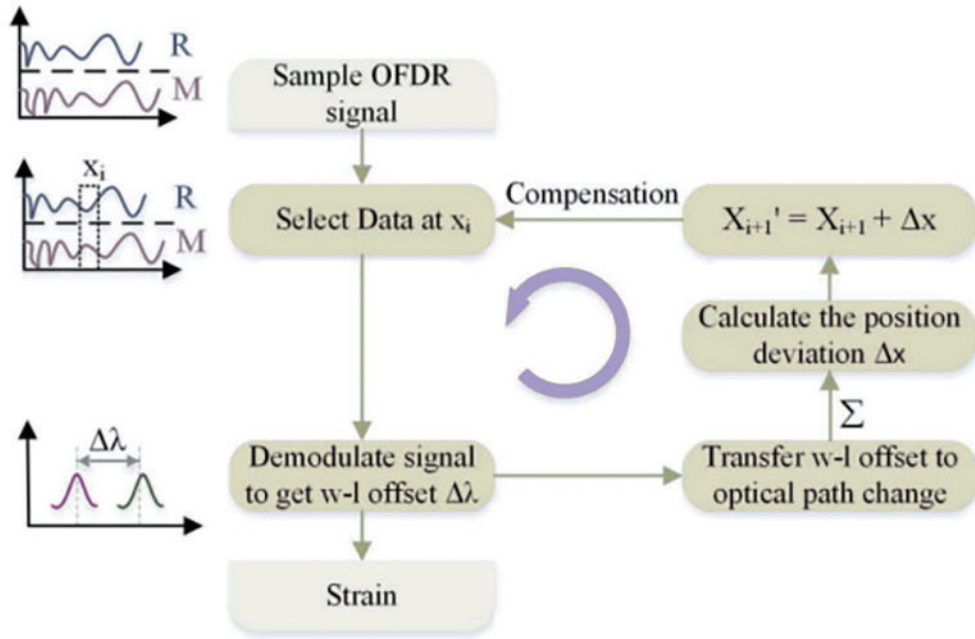


图 18 递归解调补偿法求解 FUT 应变分布^[58]

Fig. 18 FUT strain distribution solved by recursive demodulation compensation method^[58]

表 2 典型 OFDR 系统提升性能的方法对比

Table 2 Comparison of improving performance methods of typical OFDR systems

Method	Spatial resolution	Sensing range
RFS ^[38-39]	0.3 mm	300 m
DSB-SC+FWM ^[45]	10 cm	10 km
Injection locking +FWM ^[46]	1.1 mm	2 km
Morlet wavelet transform ^[47]	5 mm	Not mentioned
Wiener deconvolution filter ^[48]	1.3 mm	Not mentioned
Bidirectional determination ^[50]	0.1 m	200 m

4 OFDR 相关应用

1998 年, Froggatt 等^[59]提出利用局部后向瑞利散射光谱位移的方式实现应变和温度传感。在 2.2 节阐述了其信号处理过程。该系统使用了标准单模光纤或梯度折射率多模光纤, 在数十米的测量距离上具有毫米级的空间分辨率, 应变分辨率超过 $1 \mu\epsilon$, 温度分辨率超过 1°C 。目前 OFDR 系统的传感参数不再局限于温度及应变, 振动、磁场感应、折射率、三维(3D)形状等其他物理量也可转换为 FUT 上温度、应变的变化, 从而进行测量。

4.1 振动测量

传统 OFDR 在静态测量中有着独特优势, 但受限于扫频重复率(扫频周期的倒数), 难以实现动态测量。2012 年, Zhou 等^[60]分析振动与非振动状态瑞利散射谱

平移量, 得到振动信息。实现空间分辨率 10 cm 的振动测量, 但该方法传感距离仅有 17 m, 且仅可测量 32 Hz 内的振动。同年, Ding 等^[61]提出互相关相似性分析方法(CCSA)。通过将振动、非振动状态的时域信号进行 FFT, 得到距离域信号。如图 19 所示, 以长度 Δx 的滑动窗口对两组距离域信号求解互相关。窗口滑动到振动位置处时, 两组信号的非相似水平会显著提高, 通过这一方法得到振动的位置。通过在频域上通过互相关的两组信号的频率平移量, 得到振动的频率信息。实现的测量频率达到 2 kHz, 空间分辨率为 5 m。

2017 年, Li 等^[62]提出相位解调方法的 φ -OFDR。对振动和非振动状态的瑞利散射信号进行互相关分析, 获得振动位置。利用 3×3 解调法对振动状态的瑞利背向散射信号进行处理, 获得振动频率及振幅信息。在 200 m 的 FUT 上, 获得 10 cm 空间分辨率, 可测量 100 Hz 振动信号。2020 年, Qu 等^[63]提出一种移动时间选通方法。如图 20 所示, 该系统采用保偏光纤作为 FUT, 与传统 OFDR 相比, 不需要参考信号, 系统传感信息通过自相关计算得到。其信号处理过程如图 21 所示, TLS 扫描一次后将数据存储在频域, 所有数据按时间平均分为 N 份, 得到的每份数据通过快速 FFT 转换到时域, 沿光纤长度缩放。通过傅里叶逆变换(IFFT)得到局部光谱, 通过自相关计算得到振动引入的后向瑞利散射光谱偏移, 振动位置的频率信息通过该时域信号的 FFT 来表示。实验证明, 该方法提高了采样率, 增大了振动信号的频率响应范围, 将有效采样率提高 4 倍, 可测量 30 Hz 的振动信号。

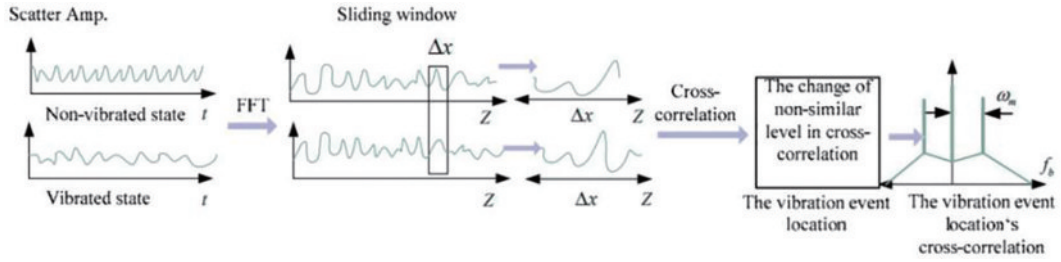


图 19 CCSA 流程^[61]
Fig. 19 CCSA process^[61]

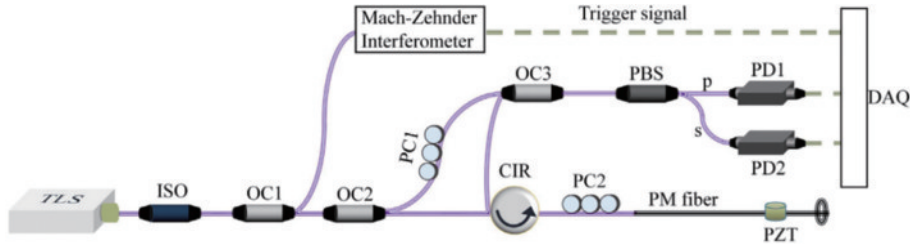


图 20 基于移动时间选通法的 OFDR 系统^[63]
Fig. 20 OFDR system based on moving time gating method^[63]

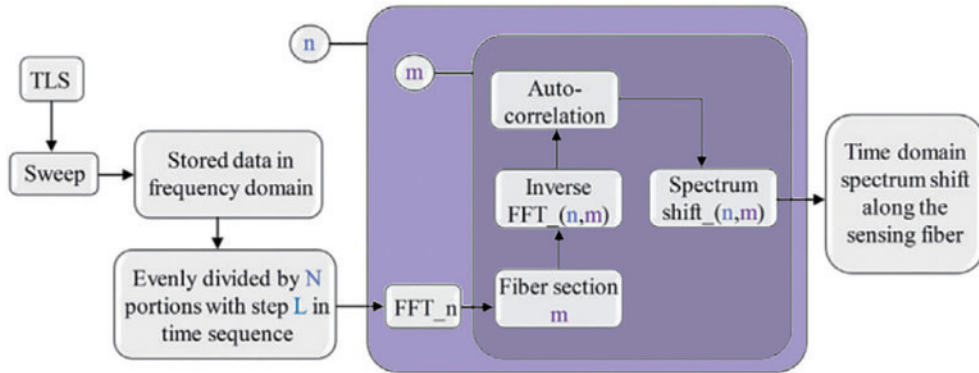


图 21 移动时间选通法信号处理流程^[63]
Fig. 21 Signal processing flow of moving time gating method^[63]

2022 年,赵艳夺等^[64]提出将 TGD-OFDR 与 MZI 相结合的分布式光纤振动传感系统,如图 22 所示,该系统能够同时对多个振动点进行定位,通过 I/Q 接收

技术实现振动信号频率和幅度的解调,通过仿真验证了 4 km 传感光纤上 0.5 m 的空间分辨率,检测频率可达 MHz 量级。

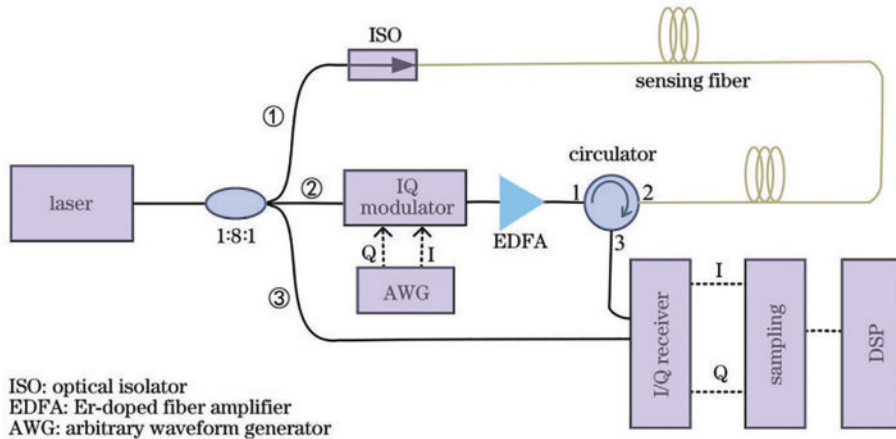


图 22 TGD-OFDR 与 MZI 融合的振动传感系统^[64]
Fig. 22 Vibration sensing system combined with TGD-OFDR and MZI^[64]

4.2 形状传感

OFDR 凭借高精度、高空间分辨率等优势,在形状传感领域逐渐得到关注。Duncan 等^[65]基于后向瑞利散射位移的分布式应变传感,提出 3D 形状传感,由三根平行光纤或一根多模光纤组成光纤三元体。将三元体分为多个部分,将每个部分的起始点都固定在参考点,测量每部分的应变传感数据,依次推断出每部分的位置和方向,从而重建三元体的整体 3D 形状。Zhou 等^[60]采用螺旋缠绕几何结构,使用 OFDR 进行测量。带有三个芯的多芯光纤在该几何缠绕结构下的应变,将其转换为 3D 形状,在 20~30 m 的范围内实现形状感应,精度达到 0.4%~1.3%。目前,OFDR 形状传感可应用于对实时性要求较高的医疗器械跟踪、形状重建^[66],以及飞机机翼的设计、测试等方面^[62]。

4.3 横向压力传感

OFDR 系统对横向压力灵敏度低,需要将横向压力转换为 FUT 上纵向应变的测量。因此,目前大多数横向压力测量 OFDR 需要在 FUT 上封装高泊松比和低杨氏模量的材料。Schenato 等^[67]提出基于 OFDR 的传感系统,可同时测量静水压力及温度,其示意图如图 23 所示,其中一腔填充聚合物,用于将横向压力转换为纵向施加在 FUT 上的应变,另一个为空腔,用于温度测量。这一传感器温度和压力精度分别为 0.502 °C 和 0.302 kPa。

使用 OFDR 对横向压力进行传感,可以为表面的压力监测提供较高的精度和灵敏度。由于其具有光纤传感器无源、安全等特点,可应用于石油和天然气工业、生物医学等领域。

4.4 折射率测量

折射率是光纤光学特性的一个重要参数。Du 等^[68]提出并研究了基于瑞利后向散射和宏弯单模光纤

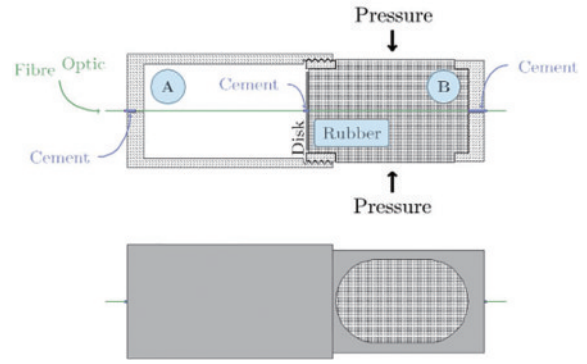


图 23 传感器原型示意图^[67]

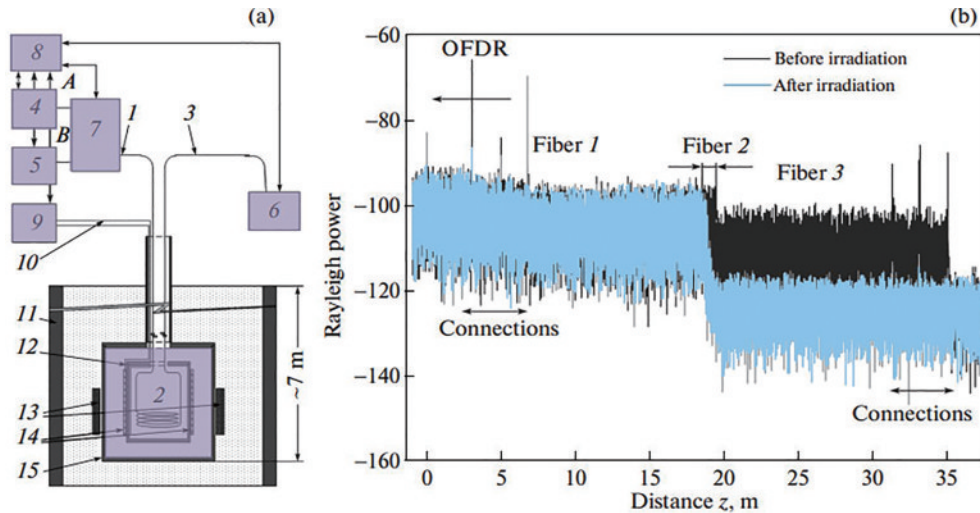
Fig. 23 Schematic diagram of sensor prototype^[67]

的新型分布式折射率(RI)传感器。首次使用 OFDR 检测了宏弯光纤周围外部介质的折射率。利用该传感器检测了多点 RI,在弯曲直径分别为 12.2 mm、11.3 mm 的情况下,灵敏度为 2319.24 GHz/RIU 和 2717.85 GHz/RIU。

OFDR 测量折射率可应用于多个领域。在电信领域中,折射率的精确测量对于优化光纤通信系统的性能至关重要。在生物医学成像领域,折射率测量可用于生物组织的非侵入性成像,提供有关组织结构和组成的信息。

4.5 辐射传感

当光纤暴露于辐射下时,光纤材料与辐射相互作用,影响光纤的折射率等特性,使相应位置的后向瑞利散射发生变化。2015 年,Faustov 等^[69]提出使用 OFDR 对 γ 辐射进行分布式测量。实验装置如图 24(a)所示,使用磷硅酸盐光纤作为 FUT,提高后向瑞利散射强度,增加光纤对辐射的敏感度。辐射前和辐射后测量的沿光纤瑞利散射情况如图 24(b)所示。



1-3: optical fibers; 4: OFDR reflectometer; 5: super-luminescent source; 6: spectrum analyzer; 7: fiber switch; 8: computer; 9: temperature controller; 10: thermocouple element; 11: water tank; 12: furnace; 13: 60Co sources; 14: heating elements; 15: irradiation container

图 24 使用 OFDR 进行 γ 辐射测量^[69]。(a) 实验装置;(b) 实验结果

Fig. 24 γ radiation measurement using OFDR^[69]. (a) Experimental setup; (b) experimental result

所提出的分布式 γ 辐射剂量传感,测量范围达到 100 kGy,相对精度约 20%,且能以 15 cm 的空间分辨率重建吸收剂量分布剖面。

OFDR 辐射传感可应用于核能工业、航天探测、医疗辐射治疗等领域。随着 OFDR 相关技术和光纤材料的不断进步,OFDR 在辐射传感领域将发挥越来越重要的作用。

5 结束语

本文对 OFDR 系统关键技术及相关应用方面进行概述。OFDR 因具有其他分布式传感所不具有的特性而受到广泛关注。目前 OFDR 的研究主要集中在提高空间分辨率、优化信号处理算法、增大传感距离等方面。在 OFDR 系统中,TLS 起到至关重要的作用,为补偿 TLS 非线性,研究人员提出了硬件、软件两种补偿方式消除非线性的影响,同时,窄线宽 TLS 可以增加 OFDR 系统的测量范围,更大的调谐范围以及线性程度影响了空间分辨率和信噪比。由于 TLS 线宽、调谐范围、调谐线性度之间存在相互制约的现象,同时满足指标的 TLS 往往成本高昂。因此,适用于 OFDR 的高性能 TLS 是未来 OFDR 的重点研究方向之一。

软件算法的研究,有助于 OFDR 系统以更低的成本获得更高的性能。但复杂的算法难以保证 OFDR 系统的实时性,需要在信号处理时间、处理精度之间进行取舍。研究高效率、高精度的信号处理算法,也是未来 OFDR 的研究重点。

随着 OFDR 相关技术的成熟,OFDR 的传感已经从温度、应变等传统物理参量,逐步扩展到生物、化学、建筑、能源、汽车及航空航天等多个领域参量的传感,未来 OFDR 可满足更多传感需求,在先进光学测量与传感技术中发挥更为重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fiber[J]. Applied Physics Letters, 1981, 39(9): 693-695
- [2] Wang Y, Jin B Q, Wang Y C, et al. Real-time distributed vibration monitoring system using Φ -OTDR [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5): 1333-1341.
- [3] Liu X, Jin B Q, Bai Q, et al. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1164.
- [4] Whitbread T W, Wassef W S, Allen P M, et al. Profile dependence and measurement of absolute Raman scattering cross-section in optical fibres[J]. Electronics Letters, 1989, 25(22): 1502-1503.
- [5] Wang L, Zhou B, Shu C, et al. Distributed temperature sensing using stimulated-brillouin-scattering-based slow light[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(6): 6801808.
- [6] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, et al. Cryogenic temperature measurement using Rayleigh backscattering spectra shift

by OFDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1150-1153.

- [7] 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.
- [8] Boukari O, Hassine L, Bouchriha H, et al. Study of dynamic chirp in direct modulated DFB laser for C-OFDR application[J]. Optics Communications, 2010, 283(10): 2214-2223.
- [9] Boukari O, Hassine L, Latry O, et al. Characterization of the chirp in semiconductor laser under modulation[J]. Materials Science and Engineering: C, 2008, 28(5/6): 671-675.
- [10] Deng Z W, Liu Z G, Li B, et al. Precision improvement in frequency-scanning interferometry based on suppressing nonlinear optical frequency sweeping[J]. Optical Review, 2015, 22(5): 724-730.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] He Z Y, Kazama T, Koshikiya Y, et al. High-reflectivity-resolution coherent optical frequency domain reflectometry using optical frequency comb source and tunable delay line[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B764-B769.
- [14] Qin J E, 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.
- [15] 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): 1306003.
- [16] 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): 1306003.
- [17] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [18] 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.
- [19] 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, E89-C(6): 823-829.
- [20] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhao S Y, Cui J W, Tan J B. Nonlinearity correction in OFDR system using a zero-crossing detection-based clock and self-reference[J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3660.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Meta A, Hoogeboom P, Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [29] 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.
- [30] Ding Z Y, Du Y, Liu T G, et al. Long-range high spatial resolution optical frequency-domain reflectometry based on optimized deskew filter method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9274: 927407.
- [31] 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.
- [32] Arbel D, Eyal A. Dynamic optical frequency domain reflectometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 8823-8830.
- [33] 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.
- [34] 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): 0728001.
- 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*, 2023, 43(7): 0728001.
- [35] Wang B, Fan X Y, Wang S, et al. Laser phase noise compensation in long-range OFDR by using an optical fiber delay loop[J]. *Optics Communications*, 2016, 365: 220-224.
- [36] Song M P, Zhuang S W, Wang Y X, et al. Nonlinear phase compensated OFDR based on Match Fourier Transform algorithm[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1607(1): 012110.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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): 6901310.
- [40] Sun L, Du J B, Li L, et al. High order SSB modulation and its application for advanced optical comb generation based on RFS[J]. *Optics Communications*, 2015, 354: 380-385.
- [41] Xu D, Du J B, Fan X Y, et al. 10-times broadened fast optical frequency sweeping for high spatial resolution OFDR[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 9-13, 2014, San Francisco, California, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2014: W3D.2.
- [42] Xu D, Du J B, Fan X Y, et al. High spatial resolution OFDR based on broadened optical frequency sweeping by four-wave-mixing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91576J.
- [43] 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, October 18-21, 2011, Singapore. New York: IEEE Press, 2011: 292-295.
- [44] 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.
- [45] Badar M, Kobayashi H, Iwashita K. Chromatic dispersion measurement with double sideband phase noise canceled OFDR[J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 350-355.
- [46] 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.
- [47] Wang B, Fan X Y, Wang S A, 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.
- [48] Feng K P, Cui J W, Dang H, et al. Investigation of a signal demodulation method based on wavelet transformation for OFDR to enhance its distributed sensing performance[J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 2850.
- [49] 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.
- [50] Kim M J, Kim Y H, Jung E J, et al. Simulation result for dynamic range extension in coherent optical frequency domain reflectometry[C]//Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, September 1-4, 2014, Palma de Mallorca, Spain. New York: IEEE Press, 2014: 107-108.
- [51] Kim Y, Kim M J, Rho B S, et al. Measurement range enhancement of Rayleigh-based optical frequency domain reflectometry with bidirectional determination[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 7106308.
- [52] Gabai H, Botsev Y, Hahami M, et al. Optical frequency domain reflectometry at maximum update rate using I/Q detection[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1725-1728.
- [53] 吕明星, 李新碗. 基于同相正交调制光学频域反射仪的分布式多芯光纤矢量传感[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(23): 2306005.
- Lü M X, Li X W. Distributed multi-core fiber vector sensing based on in-phase and quadrature modulated optical frequency domain reflectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(23): 2306005.
- [54] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Long measurement range OFDR beyond laser coherence length[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2): 202-205.
- [55] Baker C, Lu Y, Song J, et al. Incoherent optical frequency domain reflectometry based on a Kerr phase-interrogator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15370-15375.
- [56] Shao C, Yin G L, Lü L, et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8): 082010.
- [57] 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.
- [58] Cheng Y Y, Luo M M, Liu J F, et al. Numerical analysis and recursive compensation of position deviation for a sub-millimeter resolution OFDR[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5540.
- [59] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [60] Zhou D P, Qin Z G, Li W H, et al. Distributed vibration sensing with time-resolved optical frequency-domain reflectometry[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13138-13145.
- [61] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28319-28329.
- [62] Li H, Liu Q W, Chen D A, et al. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on Φ -OFDR with enhanced crosstalk suppression[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 563-566.
- [63] Qu S, Qin Z G, Xu Y P, et al. Distributed fiber vibration sensing with single-shot measurement and moving time-gating method[J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126053.
- [64] 赵艳夺, 王目光, 张静, 等. 高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1906004.
- Zhao Y D, Wang M G, Zhang J, et al. Distributed optical fiber vibration sensing system with high spatial resolution and large bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1906004.
- [65] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6530: 65301S.
- [66] 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.
- [67] Schenato L S, Aneesh R A, Palmieri L P, et al. Fiber optic sensor for hydrostatic pressure and temperature measurement in riverbanks monitoring[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 82: 57-62.
- [68] Du Y, Jothibas 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.
- [69] Faustov A V, Gusarov A V, Mégrét P, et al. The use of optical frequency-domain reflectometry in remote distributed measurements of the γ -radiation dose[J]. *Technical Physics Letters*, 2015, 41(5): 414-417.