

# 光频域反射计的研究进展及应用

孙良, 白浩杰, 石玉伦, 路书祥\*

郑州大学物理学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 光频域反射计(OFDR)作为分布式光纤传感(DOFS)领域的重要分支,具有高灵敏度和高空间分辨率等优势,是近年来该领域的研究热点。介绍了 OFDR 的原理及关键技术,系统综述了高空间性能光频域反射计及远程光频域反射计近年来国内外的研究进展,分析了 OFDR 在不同领域的最新应用,并对不同 OFDR 的特点进行总结。

**关键词** 光频域反射计; 分布式传感; 非线性相位噪声; 空间性能; 远程测量

中图分类号 P215

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050007

## Research Progress and Application of Optical Frequency Domain Reflectometer

Sun Gen, Bai Haojie, Shi Yulun, Lu Shuxiang\*

School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

**Abstract** As an important branch in the field of distributed optical fiber sensing, optical frequency domain reflectometer (OFDR) has the advantages of high sensitivity and high spatial resolution, and is the research hotspot in the field of distributed optical fiber sensing in recent years. The principle and key technologies of OFDR are introduced and the recent progress of optical frequency domain reflectometer is systematically reviewed from two aspects of high spatial performance and remote frequency domain reflectometer. Then, the latest applications of OFDR in different fields are analyzed and the characteristics of different OFDRs are summarized.

**Key words** optical frequency domain reflectometer; distributed sensing; nonlinear phase noise; spatial performance; remote measurement

**OCIS codes** 060.2310; 060.2300; 060.2370

## 1 引言

分布式光纤传感器(DOFS)有许多优点,如介电和非导电性、抗电磁干扰、体积小、无源、灵敏度高,可以解决测量周界监测领域的众多难题<sup>[1-3]</sup>,测量或监控沿光纤传输路径的空间分布和随时间变化的信息,如应力、应变、温度、振动、3D 形状、流速、磁场辐射和气体。针对光纤固有后向散射的测量,已经出现了瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射等多种 DOFS 技术,基于瑞利散射的 DOFS 通常分为光时域反射计(OTDR)和光频域反射计(OFDR)。OTDR 在光纤通信领域和传感领域中有广泛的应

用,产生较早,技术也已普遍成熟,通常应用于远距离传感,但是信噪比(SNR)和空间分辨率较低,不能满足某些应用的要求<sup>[2]</sup>。

一般情况下,OFDR 比 OTDR 的空间分辨率高,且可以保持良好的温度性能<sup>[3]</sup>,因此受到了广泛关注,是一项很有发展前景的技术<sup>[4]</sup>。本文介绍了 OFDR 的原理及技术关键,综述了国内外高空间性能 OFDR 以及远程 OFDR 最新的研究进展,并将研究成果进行了总结,然后对近几年出现的基于 OFDR 技术的新兴应用进行了系统综述,总结了国内外 OFDR 技术在理论研究与应用方面的特点。

收稿日期: 2019-07-19 修回日期: 2019-08-16 录用日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(U1704155,51175479)、河南省高校科技创新团队(18IRTSTHN016)

\* E-mail: lushuxiang@zzu.edu.cn

## 2 OFDR 原理和关键技术

### 2.1 OFDR 原理

Eickhoff 等<sup>[5]</sup>在 1981 年提出基于瑞利后向散射的 OFDR 方法,类似于调频连续波(FMCW),最初在电子雷达系统中进行了研究。OFDR 的基本装置如图 1(a)所示,可调谐激光源(TLS)在没有跳模情况下对激光频率进行线性调谐, TLS 的频率  $\nu$  随时间  $t$  进行调谐,在时间  $T$  内的频移为  $\Delta F$ ,调谐率为  $\gamma$ 。干涉仪包括测试路径和参考路径,本振参

考光(LO)连接参考光纤,测试光路连接长度为  $Z$  的待测光纤,该路激光在传输时会产生瑞利后向散射和菲涅耳反射,在耦合器与参考光纤中的本振光发生干涉,光电探测器接收到混频信号进行快速傅里叶变换(FFT)得到拍频  $f_{\text{beat}}$ ,如图 1(b)所示。图中  $\tau$  为延时时间,  $T_{\text{sw}}$  为拍频信号持续的时间。如果 TLS 的调谐率  $\gamma$  是常数,则拍频  $f_{\text{beat}}$  与待测光纤的长度  $Z$  成正比,当测试光纤中发生参量改变时,拍频信号的频率也发生相应改变,因而测试拍频信号的频移即可检测光纤中某点参量的变化<sup>[4]</sup>。

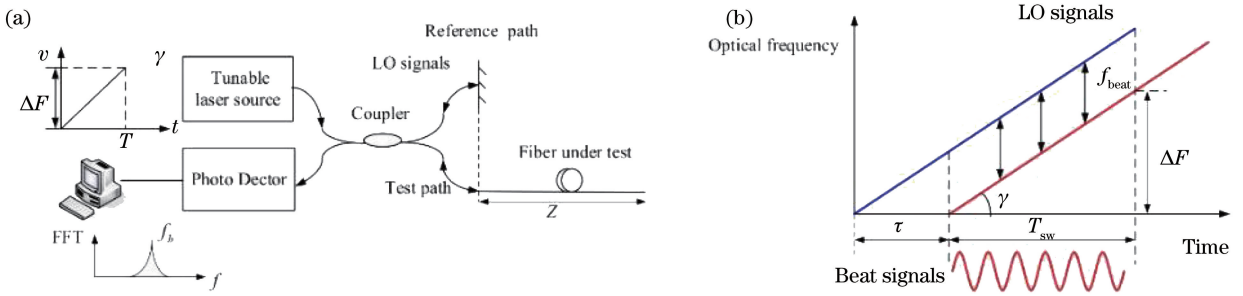


图 1 OFDR 原理。(a)OFDR 基本装置;(b)拍频信号的产生<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Principle of OFDR. (a)Basic configuration of OFDR; (b) generation of beat frequency signal<sup>[4]</sup>

### 2.2 OFDR 关键技术

宽频率范围内能够实现快速和线性频率调谐的光源是 OFDR 实现高性能的关键<sup>[6]</sup>,实际中激光器会表现出非线性调谐特性。以恒定时间间隔对干扰信号进行采样,会导致光学频率的非均匀采样,拍频不是常数,从而降低了 OFDR 测量的空间分辨率,如图 2 所示。同时激光器存在跳模现象,这主要是由驻波腔内一个模式通过模式竞争取代当前稳定振荡模式形成起振所导致的<sup>[7]</sup>。光源在跳模时其光频会发生改变,严重影响了系统信号接收质量和测量

精度,可以通过稳定激光器的环境因素、引入反馈等方式消除跳模。

OFDR 系统在检测端进行相干检测时相位信息会转换为频率或幅度信息,受激光器线宽的影响,到反射点的距离接近激光信号的相干长度时,拍频信号幅度以拍频分量为中心呈指数衰减,相位噪声以洛伦兹线形叠加分布在回波信号的两侧<sup>[8]</sup>。因此,激光器线宽对 OFDR 性能有决定性影响,激光器快速线性调频特性建立在其线宽或相干性之上。由于激光相干长度有限,到传感的距离接近或大于激光的相干长度时,相位噪声会更加严重,直接限制了空间性能和传感距离<sup>[9]</sup>。

除了光源和光路的非线性噪声以外,传感光路的后向散射光大小、信号采集和处理算法<sup>[10]</sup>、系统调制解调等都会限制 OFDR 技术的应用效果。而激光频率扫描范围能决定空间分辨率,若调谐范围足够宽,就能获得很高的分辨率<sup>[8]</sup>。

## 3 OFDR 研究进展

### 3.1 高空间性能 OFDR 研究进展

高空间性能如高空间分辨率和高灵敏度特性是 OFDR 技术的主要优势,近年来除使用高性能光源和提高激光扫描范围等常规方法外,在现有技术条件下,通过使用特殊光纤提高 OFDR 的后向散射,

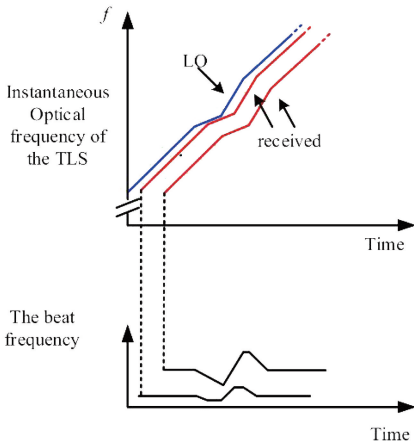


图 2 非线性光学频率调谐条件下的拍频信号图<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Beat signal diagram of nonlinear optical frequency tuning<sup>[4]</sup>

采用新的信号处理算法和利用偏振进行信号调制等方法能进一步提高 OFDR 系统的空间性能。

### 3.1.1 特殊光纤结构提高后向散射

在 DOFS 中, 光纤既是传感元件也是传输元件, 光纤制备过程中的缺陷会产生后向散射<sup>[5,8-9]</sup>, 而采用更加有效的特殊光纤可以直接提高后向散射。2016 年, Ding 等<sup>[4]</sup> 通过将标准单模光纤 (SMF) 及还原包层 (RC) SMF 并排作为 OFDR 系统的传感光纤, 因两种光纤对应变和温度变化有不同的灵敏度响应, 通过监测瑞利后向散射光谱偏移获得相应信号, 提高了空间性能。实验证明其能达到的温度误差为  $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 应变误差为  $7.97\text{ }\mu\epsilon$ , 测量范围为

50 m, 空间分辨率为 18 cm。该课题组<sup>[11]</sup> 还通过 OFDR 中的局部后向反射光谱的光学频移来测量围绕锥形光纤外部介质的折射率, 图 3 为该锥形光纤装置示意图。在 2.1 cm 的锥形光纤腰部中可以达到的 4.25 mm 的空间分辨率, 当折射率范围为  $1.3574\sim 1.3686$  时, 该 OFDR 系统的灵敏度约为  $68.52\text{ nm/RIU}$  (RIU 为折射率单元)。2018 年, Naeem 等<sup>[12]</sup> 提出了一种适用于 OFDR 传感系统的 Ge 掺杂芯光子晶体光纤 (PCF), 这种特制光纤在芯、空气和二氧化硅包层之间折射率差异较大, 实验测得该系统能达到的应变灵敏度和温度灵敏度分别为  $0.138\text{ GHz}/\mu\epsilon$  和  $1.46\text{ GHz}/^{\circ}\text{C}$ , 空间分辨率为 5 cm。

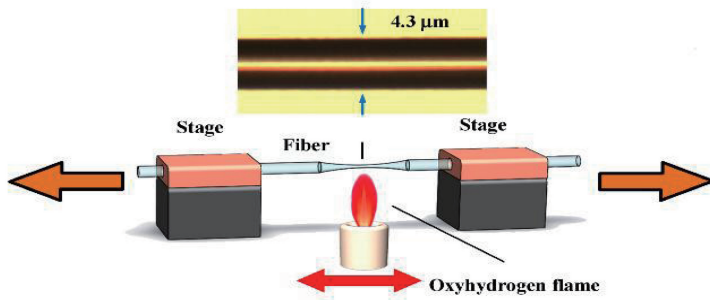


图 3 小型锥形光纤装置结构<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Configuration of small-scale fiber-tapering device<sup>[11]</sup>

基于光纤布拉格光栅 (FBG) 阵列的准分布式 OFDR 传感器是一项新的技术, 特别适用于恶劣环境, 如高温、强电磁场或高电压<sup>[13-14]</sup>。2017 年, Gui 等<sup>[15]</sup> 研制了一种大型多路复用容量密集超短的 (DUS)-FBG 阵列, 用于高空间分辨率 OFDR 系统, 其中每一个超短 FBG 具有 1 mm 的长度和  $500\text{ }\mu\text{m}$  的间隙。为了改善 OFDR 系统的检测距离, 克服光谱阴影和多反射串扰, 提出了一种使 FBG 的中心波长和间距在适当范围内随机变化的新方法, 可达到  $1.5\text{ mm}$  的空间分辨率、 $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度误差和  $20.02\text{ }\mu\epsilon$

的应变误差, 测量光纤长度为 10 m。2019 年, Monet 等<sup>[3]</sup> 提出在刻录 FBG 的过程中随机添加相位噪声就可以制备一种使后向散射增加几个数量级的新型 FBG, 称之为 ROUGH-FBG。图 4(a) 为普通 FBG 的光谱, 可看出其带宽将随着光纤长度而减小, 在光纤长度为 1 m 时带宽通常为  $2\text{ pm}$ 。图 4(b) 为 ROUGH 光栅的光谱, ROUGH 的半峰全宽 (FWHM) 不随光纤长度变化而改变。这种后向散射增强 ROUGH-FBG 可以将 OFDR 系统的信噪比提高至 50 dB 甚至更多, 且精度相对于 SMF-28 光纤系统提高 4.5 倍。

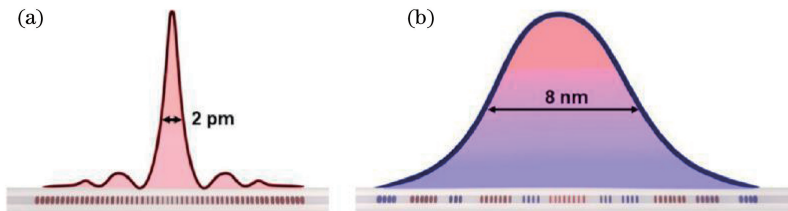


图 4 1 m 光栅长度下光谱带宽对比。(a) FBG 光谱; (b) ROUGH 光谱<sup>[3]</sup>

Fig. 4 Spectral bandwidth comparison under 1 m grating length. (a) FBG spectrum; (b) ROUGH spectrum<sup>[3]</sup>

### 3.1.2 新的算法处理

2018 年 Feng 等<sup>[16]</sup> 研究了瑞利散射 (RS) 光谱相似性的退化机制, 发现了 RS 指纹谱的局部相似特征, 据此, 建立了基于最小二乘法的新的相似性评

价函数来代替 Pearson 相关系数, 显著减少了计算量。实验证实当 OFDR 扫描波长范围仅为  $10\text{ nm}$  时, 可实现 SNR 的变化范围从  $1\sim 2$  提高至  $2\sim 12$ , 测量应变范围高达  $3000\text{ }\mu\epsilon$ 。如图 5 所示, 最高空间

分辨率低至 3 mm 时的非线性小于 0.5%，应变分辨率优于  $10 \mu\epsilon$ 。2019 年该团队<sup>[17]</sup>又提出了一种基于 Morlet 小波变换(WT)的方法来解决 OFDR 中的光时频信号处理问题,显著提高了频谱和传感参数的分辨率。实验结果表明,在 5 mm 的空间分辨率下,应变分辨率提高到  $1 \mu\epsilon$ ,在整个应变范围( $3000 \mu\epsilon$ )的平均重复性从  $18.6 \mu\epsilon$  提高至  $4.3 \mu\epsilon$ ,提高了 4.3 倍。

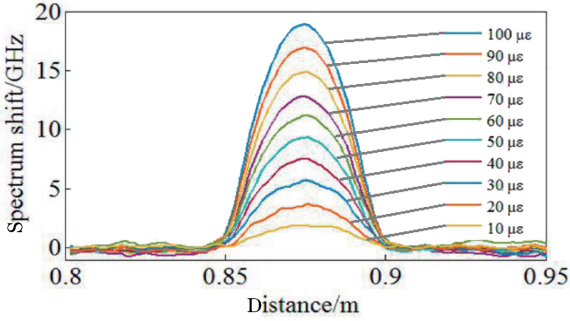


图 5 在 3 mm 的最高空间分辨率下感测微分布应变分辨率的实验<sup>[16]</sup>

Fig. 5 Experiments on sensing micro distributed strain or strain resolution under the highest spatial resolution of 3 mm<sup>[16]</sup>

2019年Xing等<sup>[18]</sup>提出了一种基于时间尺度因

子校正 TLS 的频率扫描非线性数据处理方法,所设计的 OFDR 系统<sup>[19]</sup>如图 6 所示。其中,辅助干涉仪拍频信号的过零点用于校准非线性时标,而不是直接重新采样主干涉仪的信号。信号处理过程中,首先过零检测辅助干涉仪的时域信号  $c(t)$ ,计算校准系数,校准  $c(t)$  的横坐标,然后采用三次样条插值法重采样主干涉仪的拍频信号  $s(t)$ ,得到每个积分坐标的数据,最后使用 FFT 将重采样的差拍信号转换到频域获得拍频谱。辅助干涉仪中延迟光纤的长度约为 200 m,主干涉仪中被测光纤(FUT)往返行程约为 310 m,结果如图 7 所示。图 7(a)为没有校正的 OFDR 光谱,C1~C5 为光纤耦合器,BPD1 和 BPD2 为平衡探测器,DAQ 为数据采集卡。由于非线性频率扫描,光谱变宽,空间分辨率估计为 11.2 m。图 7(b)为使用基于时标因子的光谱,能够清楚地分辨分布的反射点,空间分辨率达到 0.17 mm。该方法克服了辅助干涉中延迟光纤的长度限制,即使辅助干涉仪的光程差小于主干涉仪的光程差,仍然可以获得满意的空间分辨率,显著降低了对采样率的要求。同时,不需要计算频率扫描曲线,为实现实时测量提供了可能性。

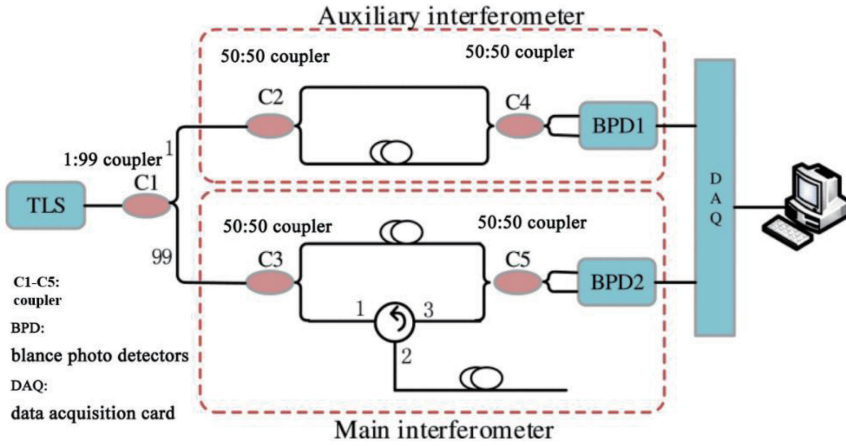


图 6 OFDR 系统示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of the OFDR system<sup>[19]</sup>

2018 年 Clement 等<sup>[20]</sup>研制了一种基于相位调制(PM)链路的频移干涉测量(FSI)反射计(PM-OFDR),具有基于 FBG 的光学鉴别特性<sup>[21]</sup>。非相干光频域反射计由 9 GHz 相位调制的 FSI 系统实现,由激光线和平衡双向调制方案提供,带宽为 9 GHz。利用所提出的调制,从光谱相位变化校正记录的干涉图,仅需要校准其包络,就可使用整个调制带宽来增加分辨率,通过相位抖动和对记录的干扰水

平进行时间平均来实现相干串扰的抑制。该系统在单频扫描中达到 cm 分辨率,灵敏度为 -55 dB,动态范围为 25 dB。这是对使用直接或自零差检测的 FSI 系统灵敏度和动态范围的分析<sup>[22-23]</sup>,分辨率、灵敏度和动态范围值与基于矢量网络分析和高带宽检测的标准 I-OFDR 相当,同时只需要一个相位调制器和一个低带宽强度的光电探测器,是基于网络矢量分析的标准 I-OFDR 的有力竞争对手。

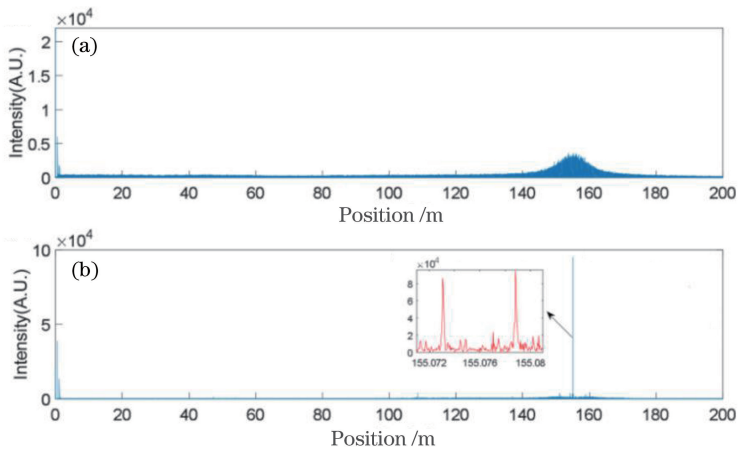


图7 实验结果。(a)未校正时 OFDR 拍频谱;(b)经时标因子校正的拍频谱<sup>[19]</sup>

Fig. 7 Experimental result. (a) Beat spectrum without nonlinearity correction; (b) beat spectrum with time-scale factor correction<sup>[19]</sup>

### 3.1.3 偏振调制

2010年, Palmieri等<sup>[24]</sup>在特定拉锥光纤中进行弯曲诱导双折射的偏振光学频域反射仪(P-OFDR)测量,第一次实现对弯曲双折射进行分布式逐点测量。由于P-OFDR的高空间分辨率和数据分析算法的准确性,能够记录沿着光纤样品的双折射矢量的局部变化。设计的OFDR允许控制探针场偏振态(SOP)和反向散射的偏振分析,测量的弯曲双折射系数与理论预测一致。2016年Wei等<sup>[25]</sup>提出一种P-OFDR,可同时测量空间分辨的横向应力和沿

着光纤的光反射。通过沿一段光纤在多个点处引入横向应力和光学后向反射,实现了区分光纤长度超过800 m的光纤背向反射的应力,空间分辨率为0.5 mm,最大应力水平高达1379 MPa,最小应力约为69 MPa。2018年Shang等<sup>[26]</sup>使用偏振分析光频域反射仪(PA-OFDR),实验装置如图8所示。其测量的光纤距离100 m,空间分辨率为250  $\mu\text{m}$ ,可定量测量被测SMF(SMF-UT)中的弯曲诱导双折射,并准确获得了弯曲诱导双折射系数为 $5.499 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。

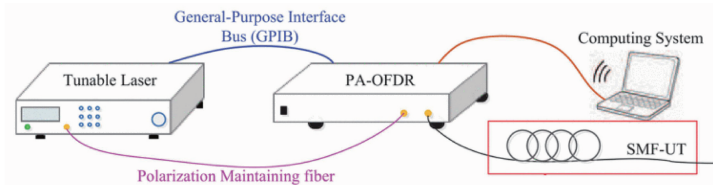


图8 PA-OFDR 实验装置<sup>[25]</sup>

Fig. 8 PA-OFDR experimental setup<sup>[25]</sup>

### 3.1.4 小结

通过分析几种不同OFDR的研究进展发现,通过采用特殊光纤、改进算法等方法,可进一步提高OFDR的空间性能。将几种方案达到的温度误差( $E_T$ )、应变误差( $E_S$ )、空间分辨率( $R_S$ )及信噪比( $R_{SN}$ )总结至表1。

### 3.2 远程OFDR研究进展

OFDR在空间分辨率上已经达到亚mm级<sup>[18,26-27]</sup>,是OFDR技术相较于其他分布式传感技术的优势<sup>[28]</sup>,但在实现高分辨率、高信噪比的同时,代价是牺牲扫描范围,因此OFDR技术的缺点是测量距离通常被限制在数百米或者几公里之内<sup>[3,29]</sup>。所以,如何拓展OFDR的测量范围是目前研究的

热点。

2016年Ohno等<sup>[30]</sup>提出了一种超出激光相干长度的远程相干光频域反射计(C-OFDR)测量技术,并利用信号平均来减小相位噪声对测量距离带来的限制,实现了100 km下小于30 m的空间分辨率。在2016年激光与电光学会议(CLEO)上Liu等<sup>[31]</sup>提出一种合成频率扫描技术克服了电子和光学调制器的带宽有限这一硬性缺陷,在70 km的光纤上实现0.7 m的空间分辨率。2017年,Shiloh等<sup>[32]</sup>提出用快速正弦频率扫描(SFS-OFDR)光源代替传统线性频率扫描光源来提高OFDR系统空间分辨率,并为此设计了基于两个连续的快速傅里叶变换(FFT)的数据处理算法来将检测器的输出还

表 1 高空间性能 OFDR 技术最新研究进展

Table 1 Recent research progress of high-spatial-performance OFDR technology

Time (publication of papers)	Core technology	Spatial performance	Reference
2016	two fibers side by side	$E_s = 7.97 \mu\epsilon/$ $E_T = 0.31 \text{ }^\circ\text{C}/R_s = 18 \text{ mm}$	[11]
2010	P-OFDR	$R_s = 0.5 \text{ mm}$	[24]
2018	Ge-doped core photonic crystal fibers	$R_s = 50 \text{ mm}$	[12]
2017	DUS-FBG	$E_s = 20.2 \mu\epsilon/$ $E_T = 1 \text{ }^\circ\text{C}/R_s = 1.5 \text{ mm}$	[15]
2018	degradation mechanism of spectral similarity	$E_s = 10 \mu\epsilon/R_s = 3 \text{ mm}$	[4]
2018	FSI-reflectometer	$R_s \approx 1 \text{ cm}$	[20]
2018	PA-OFDR	$R_s = 0.25 \text{ mm}$	[26]
2018	taper fiber	$R_s = 4.25 \text{ mm}$	[11]
2019	ROUGH-FBG	$R_{SN} = 50 \text{ dB}$	[3]
2019	wavelet transform	$E_s = 1 \mu\epsilon/R_s = 5 \text{ mm}$	[17]
2019	time scale factor correction	$R_s = 0.17 \text{ mm}$	[18]

原为光纤后向散射分布,在 400 Hz 的扫频速率下实现 64 km 的传感距离,空间分辨率约为 3 m。同年, Wang 等<sup>[33]</sup>使用具有线性扫描射频(RF)信号的外部调制方法实现非线性扫描,如图 9 所示。 $\Delta\omega$  为线性光源的扫频范围,通过非线性调制可得其  $N$  阶信号,虽然高阶信号可能重叠,但仍可采用注入锁定技术从重叠的高阶边带中提取扫频信号,获得约 25 GHz 的扫频范围。之后通过级联配置以获得多级四波混频(FWM),进一步将频率扫描范围扩展至

100 GHz,原理如图 10 所示。利用超线性扫描光源 OFDR 系统的光源,在 2 km 测量范围内实现了 1.1 mm 的空间分辨率。之后提出利用光纤延迟环来补偿远程 OFDR 中的激光相位噪声<sup>[34]</sup>,实现了在超过 30 km 测量范围下 10 cm 的空间分辨率。2019 年, Qin 等<sup>[35]</sup>将频率扫描光纤激光器锁定在基于全光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)上,抑制扫描非线性的同时增强激光器的相干性,实现了在 200 km 光纤上 72 cm 的空间分辨率。

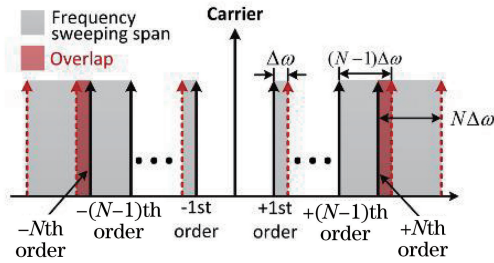


图 9 具有外部调制的高阶边带的频率扫描频谱示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 9 Schematic illustration of the spectrum for the frequency sweep with high-order sidebands of external modulation<sup>[33]</sup>

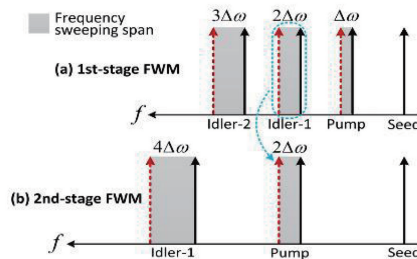


图 10 四波混频过程。(a)使用第一阶段 FWM 扩大扫频范围;(b)使用第二阶段 FWM<sup>[33]</sup>

Fig. 10 Four-wave mixing process. (a) Broadening the frequency sweep using first stage FWM; (b) using second stage FWM<sup>[33]</sup>

对上述提高 OFDR 测量范围的各种方法进行总结,如表 2 所示。发现远程 OFDR 的测量范围

或分辨率逐步提高,目前在亚 m 级空间分辨率等级下达到的最远测量距离为 200 km。

表 2 远程 OFDR 技术最新研究进展

Table 2 Recent research progress of remote OFDR technology

Time (publication of papers)	Core technology	Spatial resolution / m	Measuring distance / km	Reference
2016	exceeding laser coherence length	<30	100	[30]
2016	synthetic frequency scanning	0.7	70	[31]
2016	optical fiber delay loop	0.1	>30	[34]
2017	SFS-OFDR	~3	64	[32]
2019	coherence-enhanced highly linear frequency-swept fiber laser source	0.72	200	[35]

## 4 OFDR 的应用

2006 年, Luna 公司推出了世界上第一款成熟的 OFDR 产品, 让该技术从实验室走到实际应用阶段。2016 年, 上海交大的课题组推出了第一款国产产品样机<sup>[36]</sup>, 在 2 km 的测量范围下实现了 2 mm 的空间分辨率。近年来, OFDR 凭借其逐渐提高的高空间性能, 不再局限于对应变和温度等进行测量, 基于 OFDR 技术的基本特点衍生了一些较为新颖的应用, 如结构健康监测、温度监测、磁场检测。其原理主要是通过不同的转换方法直接或间接检测传感光纤中某点的长度或者折射率改变引起应变等参数的改变, 进而达到测量目的。不同领域对于 OFDR 的性能要求主要是高灵敏度和高分辨率, 但在不同的应用场景下传感结构要进行相应的设计和改变。

### 4.1 结构健康监测

OFDR 技术已广泛应用于应变监测系统, 但主要在土木结构和建筑物的结构健康监测 (SHM)<sup>[37-38]</sup> 中。近年来, 随着 OFDR 空间分辨率等性能的提高以及科研人员的尝试<sup>[39]</sup>, 出现了不少新兴应用。2018 年, Daichi 等<sup>[40]</sup> 研制了一款基于 OFDR-FBG 技术的飞机舱壁监测装置, 通过在频域解调反射布拉格光栅的光谱空间信息即光纤光栅内部的分布剖面, 获得应变数据。图 11 为原理图, 通过将传感器放置在飞机的纵梁和舱壁上监测应力分布, 可以有效地评估结构部件疲劳状况。2019 年, Gomes 等<sup>[41]</sup> 将 OFDR 技术用于印刷电路板 (PCB) 应变分析, PCB 板上的应变变化会改变光纤局部折射率, 从而在幅度和频率方面改变瑞利后向散射光。通过比较在外部刺激之前和之后从相同位置反射的信号, 将其与被测量的扰动相关联。如图 12 所示, 粗线是电缆线, 细线是光纤, 数字标注的是应变测量

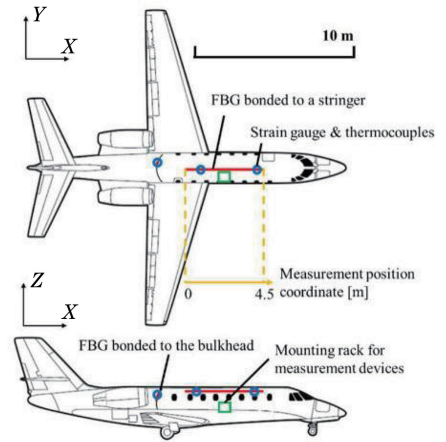


图 11 OFDR 用于飞机舱壁监测<sup>[40]</sup>

Fig. 11 OFDR for aircraft bulkhead monitoring<sup>[40]</sup>

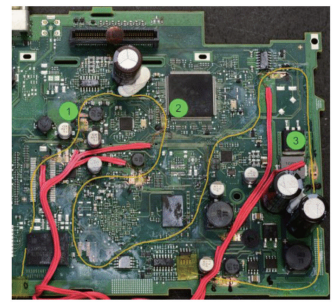


图 12 OFDR 用于 PCB 应变监测<sup>[41]</sup>

Fig. 12 OFDR for PCB strain monitoring<sup>[41]</sup>

的关注点。经多次测量, 对比于传统的箔应变计测量方式, 偏差在 3.5% 之内, 不仅光纤体积小而且质量轻, 在 PCB 应变测量这一精密环境下极具优势, 可以替代箔应变计测量方案。

### 4.2 温度监测

OFDR 技术用于实时空间温度分布的测量已是一项成熟的技术<sup>[42-43]</sup>, 通过测量 OFDR 的后向瑞利散射在温度变化下的光谱偏移, 可精确监测当前的温度值<sup>[44]</sup>。2019 年, Lu 等<sup>[45]</sup> 成功将高灵敏度和

高空间分辨率 OFDR 系统用于实时监测带电变压器铁芯的温度,如图 13 所示,传感光纤安装在跑道形变压器铁芯的四个面及内、外环上,穿过两个测量表面之间时,大的光纤环留在空气中,可以清楚地识别测量温度曲线中的表面位置,还可以在难以进行连续热成像的位置监测动态升温过程。同年,Zhu 等<sup>[46]</sup>利用 OFDR 测量钻孔期间碳纤维增强聚合物(CFRP)引起的温度变化,精确重建了钻孔周围的二维(2D)温度剖面,空间分辨率为 2 mm。最近出现的基于 FBG-OFDR 原理的准分布式温度传感系统,可以同时监测应变和温度<sup>[47-48]</sup>。

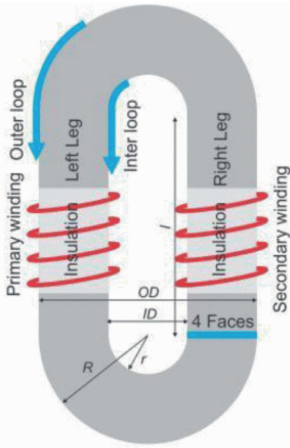


图 13 变压器铁芯上传感光纤的布置示意图<sup>[45]</sup>

Fig. 13 Layout diagram of sensor fiber on transformer core<sup>[45]</sup>

### 4.3 磁场检测

OFDR 用于磁场检测始终是一个研究热点,但方法各不相同<sup>[49-51]</sup>。磁场的变化导致磁致伸缩材料对 SMF 产生应变,应变变化引起局部瑞利背向散射光谱(RBS)偏移,光谱偏移可通过 OFDR 实现分布式应变测量,进而测得磁场强度。2015 年, Du 等<sup>[51]</sup>将磁致伸缩 Fe-Co-V 合金薄膜拼接在长度为 51 m 的 SMF 上,通过 OFDR 测量随磁场改变而施加给传感光纤的应变,实现对磁场的测量。当感应空间分辨率为 4 cm 时,可测量磁场强度的最小变化为 12.9 mT;当感应空间分辨率提高至 14 cm 时,可以将其减小到 5.3 mT。

20 年前研究人员就已经利用 FBG 的法拉第效应检测磁场<sup>[49]</sup>,但灵敏度很低,FBG 是具有适当内接的周期性折射率调制光纤,当宽带光信号发射到 FBG 中时,由于附着换能器,反射波长随施加的磁场变化而改变。根据 OFDR 传感系统观察和测量反射的布拉格波长偏移确定沿光纤的外部磁场。2019 年,Kaplan 等<sup>[52]</sup>将 FBG 附着在磁致伸缩合金

TbDyFe(Terfenol-D)的小杆上,磁场会使 Terfenol-D 杆长度增加,进而影响 FBG 反射的波长,利用 OFDR 检测 FBG 的反射波长偏移,实现对磁场的测量,原理如图 14 所示,其灵敏度约为 2.2 pm/mT。

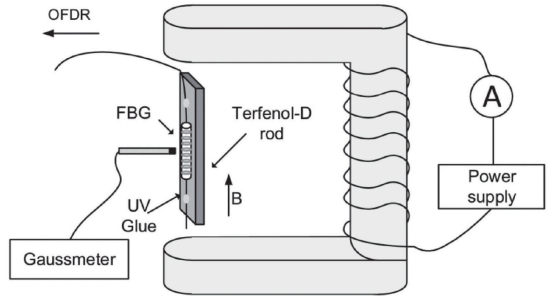


图 14 使用粘贴在 Terfenol-D 棒上的 FBG 进行磁场测量的设置<sup>[52]</sup>

Fig. 14 Magnetic field measurement using FBG pasted on Terfenol-D rod<sup>[52]</sup>

### 4.4 医学领域

OFDR 系统广泛应用于医学领域手术导管上的形状感测<sup>[53]</sup>,应变传感器记录沿着光纤轴的机械变形,形状传感器也能够区分应变方向测量应变矢量,从而重建手术针的形状<sup>[54]</sup>。使用频率扫描激光器连续询问三个光纤轴,然后在频域中检测和分析其反向散射信号,通过使用干涉测量,可以沿光纤感知应变。2017 年,Parent 等<sup>[55]</sup>将三根光纤固定在一起形成光纤三元组以获得三个自由度,利用 OFDR 技术测量光纤曲率半径的差异还原手术器械形状,如图 15 所示,并对光纤进行紫外线曝光,使其具有更高的瑞利散射,精度提高了 47%。

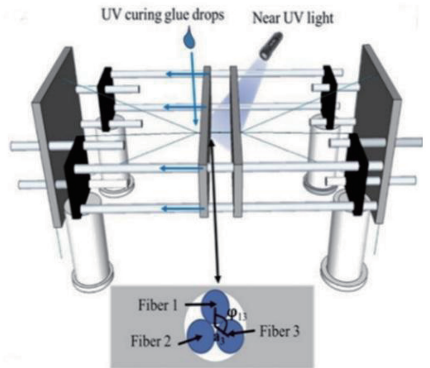


图 15 用于将三根光纤粘合成纤维三元组的定制装置的示意图<sup>[55]</sup>

Fig. 15 Schematic of the custom setup built to glue three fibers into a fiber triplet<sup>[55]</sup>

### 4.5 辐射探测

在辐射监测时,X 射线、 $\gamma$  射线或中子会增加光纤的吸收损耗,通过 OFDR 检测传感光纤中的



吸收损耗即可确定其辐射剂量<sup>[56]</sup>。2017年 Zaghoul 等<sup>[57]</sup>成功将能够承受超过 10000 Gy 总剂量的特殊光纤用于辐射传感,采用瑞利 OFDR 技术实现了以 1 cm 的空间分辨率在圆柱体的整个表面上绘制累积的伽马辐射剂量,辐射源和光纤分别位于圆柱体内部和外部。这种装置能用在诸如蒸汽管或电缆类似的核能系统中,进行核辐射的实时监测。

#### 4.6 小 结

将应用在不同领域下 OFDR 系统的原理和探测方法总结为表 3。从应用实例及相关的研究进展可看出,当前国外的 OFDR 已经处于应用阶段,各种新领域中的应用层出不穷,而国内起步晚,还处于理论研究阶段。但就目前的研究趋势来看,国内的研究理论已达到国际水平<sup>[16,33]</sup>,随着技术的发展,OFDR 在国内将取得广泛的应用。

表 3 OFDR 应用在不同领域间的对比

Table 3 Comparison of OFDR applications in different fields

Application area	Concrete application	Basic principles	Detection method
structural health monitoring	aircraft bulkhead monitoring <sup>[40]</sup>	FBG strain effect	spatial information of reflective Bragg grating demodulated in frequency domain to obtain strain data
	PCB strain analysis <sup>[41]</sup>	SMF strain effect	change of strain data obtained by detecting backscattered light
temperature monitoring	monitoring transformer core temperature <sup>[45]</sup>	SMF temperature effect	sensor fiber optic winding transformer for temperature monitoring
magnetic field monitoring	magnetic measuring field <sup>[51,52]</sup>	strain effect of magneto-strictive alloys Faraday effect of FBG	measuring strain with the change of magnetic field measurement of magnetic field by reflective Bragg wavelength offset
medical field	reduction of the shape of surgical instruments <sup>[55]</sup>	shape effect of optical fibers	detection and analysis of shape-dependent backscattering signals
radiation detection	real-time monitoring of nuclear radiation <sup>[57]</sup>	radiation increases absorption loss of optical fibers	measuring the absorption loss of optical fiber and determining the radiation dose

## 5 结 论

分析了 OFDR 的原理及技术关键,指出激光源的非线性相位噪声对空间分辨率、灵敏度及感测范围的影响,同时也分析了其他关键技术。目前 OFDR 前沿发展主要在空间性能和测量距离上的提高,重点介绍了 OFDR 在光纤技术、处理算法等方面的最新技术,综述了 OFDR 在应变、温度、磁场、辐射、医学等方面的创新应用。OFDR 技术由国外研究人员提出,并且发展迅速,技术基本成熟,近几年多倾向于实际应用,国内目前更多偏向于理论研究。OFDR 凭借高灵敏度这一特点,将会在越来越多的领域中得到应用。

## 参 考 文 献

- [1] Sabatier C, Rizzolo S, Morana A, et al. 6-MeV electron exposure effects on OFDR-based distributed fiber-based sensors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1598-1603.
- [2] Li J, Gan J L, Zhang Z S, et al. High spatial resolution distributed fiber strain sensor based on phase-OFDR [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27913-27922.
- [3] Monet F, Loranger S, Lambin-Iezzi V, et al. The ROGUE: a novel, noise-generated random grating [J]. Optics Express, 2019, 27(10): 13895-13909.
- [4] Ding Z Y, Yang D, Du Y, et al. Distributed strain

- and temperature discrimination using two types of fiber in OFDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 6804608.
- [5] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(9): 693-695.
- [6] 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.
- [7] Tang K, Wang J J, Ma M X, et al. Experimental study on mode hopping detection of fiber ring laser based on heterodyne detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(s1): s102003.  
唐凯, 王俊杰, 马明祥, 等. 基于光学外差的光纤环形激光器跳模检测实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s102003.
- [8] Xie W L, Dong Y, Zhou Q, et al. Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706003.  
谢玮霖, 董毅, 周潜, 等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706003.
- [9] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [10] Yu S 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): 0406003.  
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): 0406003.
- [11] Ding Z Y, Sun K L, Liu K, et al. Distributed refractive index sensing based on tapered fibers in optical frequency domain reflectometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13042-13054.
- [12] Naeem K, Kwon Y S, Chung Y, et al. Bend-loss-free distributed sensor based on Rayleigh backscattering in Ge-doped-core PCF [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(5): 1903-1910.
- [13] Werzinger S, Koehler A, Engelbrecht R, et al. Spatially resolved fiber Bragg grating sensing using wavelength scanning incoherent OFDR [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 20-22, 2016, Anaheim, California, United States.  
Washington, D.C.: OSA, 2016: M2D.2.
- [14] Bellido J C, Peralta J H, Madrigal J M, et al. Fast incoherent OFDR interrogation of FBG arrays using sparse radio frequency responses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4393-4400.
- [15] Gui X, Li Z Y, Wang F, et al. Distributed sensing technology of high-spatial resolution based on dense ultra-short FBG array with large multiplexing capacity[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28112-28122.
- [16] Feng K P, Cui J W, Jin Y H, et al. Enhancement of the performance and data processing rate of an optical frequency domain reflectometer distributed sensing system using a limited swept wavelength range [J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3480.
- [17] Feng K P, Cui J W, Dang H, et al. A OFDR signal processing method based on wavelet transform for improving its sensing performance [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(13): 1108-1111.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Clement J, Maestre H, Torregrosa G, et al. Incoherent optical frequency domain reflectometry using balanced frequency-shifted interferometry in a down-converted phase-modulated link [C] // *2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, October 22-25, 2018, Toulouse, France. New York: IEEE, 2018: 18306337.
- [21] Chen B, Zheng S L, Zhang X M, et al. Simultaneously realizing PM-IM conversion and efficiency improvement of fiber-optic links using FBG [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, 23(2/3): 161-170.
- [22] Hervás J, Fernández-Pousa C R, Barrera D, et al. An interrogation technique of FBG cascade sensors using wavelength to radio-frequency delay mapping [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(11): 2222-2227.
- [23] Clement J, Torregrosa G, Hervás J, et al. Interrogation of a sensor array of identical weak FBGs using dispersive incoherent OFDR [J]. *IEEE*

- Photonics Technology Letters, 2016, 28(10): 1154-1156.
- [24] Palmieri L, Geisler T, Galtarossa A. Distributed characterization of bending-induced birefringence in spun fibers by means of P-OFDR[C] // Optical Fiber Communication Conference, March 21-25, 2010, San Diego, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2010: OWS2.
- [25] Wei C J, Chen H X, Chen X J, et al. Distributed transverse stress measurement along an optic fiber using polarimetric OFDR[J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2819-2822.
- [26] Shang Y L, Feng T, Wang X C, et al. Distributed measurement of bending-induced birefringence in single-mode fibers with PA-OFDR[C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2018: JTh2A.117.
- [27] 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, 2014, September 1-4, 2014, Palma de Mallorca, Spain. New York: IEEE, 2014: 107-108.
- [28] Zhou Z C, Wang X L, Su R T, et al. Application of distributed fiber sensing in fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080006.  
周子超, 王小林, 栗荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080006.
- [29] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [30] Ohno S, Iida D, Toge K, et al. Long-range measurement of Rayleigh scatter signature beyond laser coherence length based on coherent optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19651-19660.
- [31] Liu Q W, Chen D, Fan X Y, et al. Optical frequency domain reflectometry with synthesized frequency sweeping technique[C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: JTu5A.110.
- [32] Shiloh L, Eyal A. Fast sinusoidal frequency scan OFDR for long distance distributed acoustic sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103230P.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Qin J, Zhang L, Xie W L, et al. Ultra-long range optical frequency domain reflectometry using a coherence-enhanced highly linear frequency-swept fiber laser source [J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19359-19368.
- [36] Xu Y. Research of linear frequency sweeping technology in optical frequency domain reflectometer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016: 5-10.  
许妍. 光频域反射仪中激光线性扫频技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016: 5-10.
- [37] Barrias A, Casas J, Villalba S. Embedded distributed optical fiber sensors in reinforced concrete structures: a case study[J]. Sensors, 2018, 18(4): 980.
- [38] Schenato L, Palmieri L, Camporese M, et al. Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14686.
- [39] Gao L, Gong Y H, Liu H L, et al. Experiment and numerical study on deformation measurement of cast-in-place concrete large-diameter pipe pile using optical frequency domain reflectometer technology [J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1450.
- [40] Daichi W D, Igawa H, Tamayama M, et al. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(2): 025014.
- [41] Gomes M, Cruz S, Lopes H, et al. Distributed optical fiber sensors for PCB-strain analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8181-8188.
- [42] Reinsch T, Henniges J. Temperature-dependent characterization of optical fibres for distributed temperature sensing in hot geothermal wells [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094022.
- [43] Cram D, Hatch C, Tyler S, et al. Use of distributed temperature sensing technology to characterize fire

- behavior[J]. *Sensors*, 2016, 16(10): 1712.
- [44] Lu X, Soto M A, Thévenaz L. Impact of the fiber coating on the temperature response of distributed optical fiber sensors at cryogenic ranges[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 961-967.
- [45] Lu P, Buric M P, Byerly K, et al. Real-time monitoring of temperature rises of energized transformer cores with distributed optical fiber sensors[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1588-1598.
- [46] Zhu P Y, Wang Y T, Wang S B, et al. Measuring the two-dimensional temperature profile of carbon fiber reinforced polymers during drilling using distributed fiber sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4687-4696.
- [47] Daichi W D, Igawa H, Murayama H. Simultaneous distributed measurement of the strain and temperature for a four-point bending test using polarization-maintaining fiber Bragg grating interrogated by optical frequency domain reflectometry[J]. *Measurement*, 2016, 94: 745-752.
- [48] Kaplan N, Jasenek J, Červeňová J. Simultaneous measurement of temperature and strain based on HiBi FBG using OFDR [C] // 2017 11th International Conference on Measurement, May 29-31, 2017, Smolenice, Slovakia. New York: IEEE, 2017: 91-94.
- [49] Arce-Diego J L, López-Ruisánchez R, López-Higuera J M, et al. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(9): 603-605.
- [50] Mora J, Diez A, Cruz J L, et al. A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for DC-current and temperature discrimination[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(12): 1680-1682.
- [51] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, et al. Distributed magnetic field sensor based on magnetostriction using Rayleigh backscattering spectra shift in optical frequency-domain reflectometry[J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(1): 012401.
- [52] Kaplan N, Jasenek J, Červeňová J, et al. Magnetic optical FBG sensors using optical frequency-domain reflectometry[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(1): 4000704.
- [53] 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.
- [54] Tosi D, Schena E, Molardi C, et al. Fiber optic sensors for sub-centimeter spatially resolved measurements: review and biomedical applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 43: 6-19.
- [55] 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.
- [56] Morana A, Girard S, Marin E, et al. Radiation tolerant fiber Bragg gratings for high temperature monitoring at MGy dose levels[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5313-5316.
- [57] Zaghoul M A S, Yan A, Chen R, et al. High spatial resolution radiation detection using distributed fiber sensing technique[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(9): 2569-2577.