

# 激光与光电子学进展

## 光纤瑞利散射传感抗干涉衰落技术研究进展

林圣涛<sup>1</sup>, 王子南<sup>1,2\*</sup>, 熊吉<sup>1</sup>, 吴悦<sup>3</sup>, 饶云江<sup>4,1</sup>

<sup>1</sup>电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731;

<sup>2</sup>电子科技大学信息地学研究中心, 四川 成都 611731;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

<sup>4</sup>之江实验室光纤传感研究中心, 浙江 杭州 311121

**摘要** 基于光纤瑞利散射的相位敏感光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR),具有对环境变化敏感、响应速度快等特点,是分布式光纤传感领域最重要的分支之一。然而, $\Phi$ -OTDR使用的高相干探测光波在散射过程中会不可避免地出现干涉衰落效应,相应位置会成为传感的盲区。此现象是多年来本领域的关注重点之一。本文首先简述了干涉衰落的产生机理和数学特征;然后,系统地介绍了 $\Phi$ -OTDR的典型传感机制,以及干涉衰落对传感信号解调造成的影响;随后,全面地回顾了 $\Phi$ -OTDR抗干涉衰落技术的研究历程;最后,对 $\Phi$ -OTDR的未来发展进行了探讨。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 瑞利散射; 光时域反射仪; 相位测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306008

## Progresses of Anti-Interference-Fading Technologies for Rayleigh-Scattering-Based Optical Fiber Sensing

Lin Shengtao<sup>1</sup>, Wang Zinan<sup>1,2\*</sup>, Xiong Ji<sup>1</sup>, Wu Yue<sup>3</sup>, Rao Yunjiang<sup>4,1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communications (Education Ministry of China), University of Electronic Science & Technology of China (UESTC), Chengdu, Sichuan 611731, China;

<sup>2</sup>Center for Information Geoscience, UESTC, Chengdu, Sichuan 611731, China;

<sup>3</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>4</sup>Research Center for Optical Fiber Sensing, Zhejiang Laboratory, Hangzhou, Zhejiang 311121, China

**Abstract** The phase-sensitive optical time domain reflectometry ( $\Phi$ -OTDR) utilizes distributed Rayleigh scattering sensing to achieve sensing, and it has the advantages of high sensitivity and fast response speed to environmental disturbances. It has become one of the most important branches in the field of distributed optical fiber sensing. However, the high-coherence lightwave of  $\Phi$ -OTDR will inevitably induce interference fading during the scattering process, and the corresponding positions will become blind zones for the sensing system. Fading phenomenon has been a research focus in this field for many years. In this paper, we first briefly describe the generation mechanism and mathematical characteristics of interference fading. Then, typical sensing mechanisms of  $\Phi$ -OTDR are systematically introduced, as well as the influence of interference fading on the sensing signal demodulation. In addition, the research progress of anti-interference fading technologies is comprehensively reviewed. Finally, the future developments of  $\Phi$ -OTDR are discussed.

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-05-15; 录用日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(62075030, 41527805)、国家万人计划青年拔尖人才项目(W030211001001)、四川省杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0024)、111项目(B14039)

通信作者: \*znwang@uestc.edu.cn

**Key words** fiber optics; optical sensing and sensors; Rayleigh scattering; optical time domain reflectometry; phase measurement

**OCIS codes** 060.2370; 280.4788; 290.5870; 120.4825; 120.5050

## 1 引言

光纤瑞利散射是由光纤折射率起伏引起的一种弹性散射,相比于布里渊散射和拉曼散射,其对外界物理量变化更敏感并且无阈值效应,基于瑞利散射效应的分布式光纤传感是光纤传感领域最具代表性的技术之一。早在 20 世纪 70 年代,光纤瑞利散射已用于测量光纤的传输损耗、插入损耗、断点等静态本征特征;近年来,随着激光、相干探测等技术的成熟,以相位敏感型光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR)为代表的分布式瑞利散射传感技术得到了飞速发展,并在光纤动态特征测量方面取得了显著的进展,目前已被推广应用于周界安防<sup>[1-2]</sup>、管道安全监测<sup>[3]</sup>、天然地震波探测<sup>[4-5]</sup>、地球物理勘探<sup>[6-8]</sup>、水下线缆检测<sup>[9-10]</sup>等领域<sup>[11-13]</sup>。

在信号解调方式上, $\Phi$ -OTDR 大体可以分为强度解调和相位解调两类,其中相位解调型  $\Phi$ -OTDR 具有灵敏度高、扩展性强、能够定量还原外界物理量变化等特点,展现出了显著的性能优势和巨大的应用潜力。然而,相干探测脉冲光经由光纤这一随机散射介质后,产生的瑞利散射信号在相干叠加的过程中会出现干涉衰落现象,这会极大地恶化衰落点的信噪比,进而造成传感信息的严重失真。自 1983 年相干探测技术引入光时域反射仪起<sup>[14]</sup>,干涉衰落一直是学术界和工业界希望彻底解决的瓶颈问题。近年来,随着软硬件技术的突破和对  $\Phi$ -OTDR 传感机制的不懈探索,抗干涉衰落技术得到了长足的发展,在提升  $\Phi$ -OTDR 综合性能的同时,也促进了其在诸多领域的应用。

本文首先从干涉衰落成因、统计规律和对信号解调的影响三个角度进行了阐述,以信息系统中普遍存在的衰落现象为背景,以  $\Phi$ -OTDR 相位解调机制为分析对象,探讨了衰落点相位解调过程中面临的挑战;随后,回顾了近年来  $\Phi$ -OTDR 消除干涉衰落的技术研究进展,包括  $\pi$  相移脉冲抗干涉衰落技术、常规频分复用技术、基于啁啾脉冲的频分复用技术、基于编码脉冲的频域调控抗衰落技术等,并介绍了不受干涉衰落影响的信息提取方法;最后,本文对  $\Phi$ -OTDR 的发展提出了展望。

## 2 干涉衰落的泛在特性

相干信号的多径效应是干涉衰落产生的直接原因,信号源或接收机周边存在的大量反射/散射介质,使得传输信号可以通过不同的路径到达接收机。从信号源传播到接收机时,每个信号副本的衰减、延迟和相移都存在差异,这将导致接收信号干涉相消的产生。

早在 20 世纪 70 年代,无线通信<sup>[15]</sup>、光学成像<sup>[16-18]</sup>等诸多领域已对干涉衰落现象有了初步的研究。而在基于光纤瑞利散射的测量系统中,该现象是于 1984 年由英国电信研究实验室的 Healey<sup>[19]</sup> 理论预测并首次实验观察到的。虽然,这些干涉衰落现象出现的场景不同,但其物理本质一致,都是由大量相干副本信号叠加的结果,因此具有类似的统计特性。

在此,以三维复杂环境为例,假设多路信号  $(\sqrt{N})^{-1} a_k(x, y, z)$  同时被接收机所接收,如图 1 所示,其接收端电场和矢量  $A(x, y, z)$  可表示为<sup>[16]</sup>

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N (\sqrt{N})^{-1} a_k(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \exp(i\phi_k), \quad (1)$$

式中:  $k=1, 2, \dots, N$  代表信道编号,对于任意第  $k$  个信号的振幅  $a_k/\sqrt{N}$  和相位  $\phi_k$  是相互独立的量;  $\phi_k$  在  $[-\pi, \pi]$  范围内服从均匀分布。 $A(x, y, z)$  的实部和虚部可以表示为

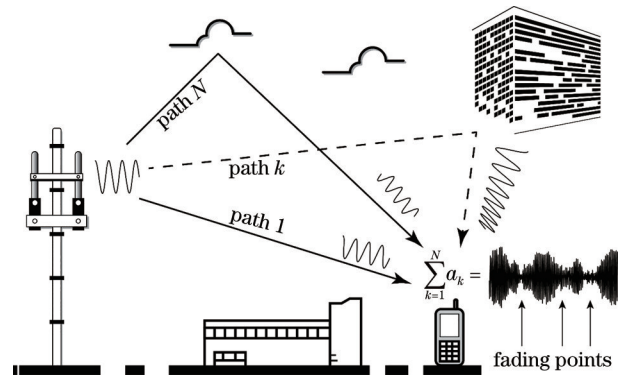


图 1 多径效应

Fig. 1 Multipath effects

$$A^{(r)} = \operatorname{Re}\{A\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \cos \phi_k, \quad (2)$$

$$A^{(i)} = \operatorname{Im}\{A\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \sin \phi_k. \quad (3)$$

一般而言,当信道数  $N$  足够大时 ( $N \rightarrow \infty$ ), 根据中心极限定理,  $A^{(r)}$  和  $A^{(i)}$  将服从正态分布, 其联合概率密度为

$$p_{r,i}(A^{(r)}, A^{(i)}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{[A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2}{2\sigma^2}\right\} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (4)$$

其方差  $\sigma^2 = \langle [A^{(r)}]^2 \rangle = \langle [A^{(i)}]^2 \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\langle |a_k|^2 \rangle}{2}$ 。因此, 电场矢量满足高斯分布, 而探测器接收到信号的强度  $I = [A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2$  和相位  $\theta = \arctan(A^{(i)}/A^{(r)})$  的统计规律, 可以通过雅可比行列式获得。

$$p_{I,\theta}(I, \theta) = p_{r,i}(A^{(r)}, A^{(i)}) \|J\|, \quad (5)$$

式中:  $A^{(r)} = \sqrt{I} \cos \theta$ ;  $A^{(i)} = \sqrt{I} \sin \theta$ 。雅可比行列式  $\|J\|$  表示为  $\|J\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial A^{(r)}}{\partial I} & \frac{\partial A^{(r)}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial A^{(i)}}{\partial I} & \frac{\partial A^{(i)}}{\partial \theta} \end{vmatrix} =$

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{2\sqrt{I}} \cos \theta & -\sqrt{I} \sin \theta \\ \frac{1}{2\sqrt{I}} \sin \theta & \sqrt{I} \cos \theta \end{vmatrix} = \frac{1}{2}。因此, (5) 式的解为$$

$$p_{I,\theta}(I, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), & I \geq 0 \text{ \& } -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (6)$$

由边缘概率密度可得, 信号强度和相位的分布情况为<sup>[16]</sup>

$$p_I(I) = \int_{-\pi}^{\pi} p_{I,\theta}(I, \theta) d\theta = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), & I \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (7)$$

$$p_\theta(\theta) = \int_0^{\infty} p_{I,\theta}(I, \theta) dI = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

因此, 经过多径效应后的接收信号强度服从指数分布, 振幅为瑞利分布, 而相位在  $[-\pi, \pi]$  范围内服从均匀分布<sup>[20]</sup>。其中振幅极小的点被称为是干涉衰落点, 其不同系统中将分别造成通信中断、成像质量恶化、传感信号失真等问题。

$\Phi$ -OTDR 的衰落点目前并不存在一个统一的定义。斯伦贝谢公司 Hartog 等<sup>[21]</sup>认为强度低于均值 20% 的点即为干涉衰落点, Zabihi 等<sup>[22]</sup>则将低于强度信噪比 (SNR) 10 dB 的点定义为衰落点, 此外还可以基于解调出的相位信息来鉴别是否为衰落点<sup>[23-24]</sup>。

### 3 $\Phi$ -OTDR 的信号解调方式

光时域反射仪 (OTDR) 是最早出现的分布式光

纤瑞利散射测量技术, 由 Barnoski 等<sup>[25]</sup>于 1976 年首次报道; 当时采用 800~900 nm 非相干光源, 通过后向瑞利散射光的强度特征来测量多模光纤的长度、损耗和断点。但在单模光纤通信波段 (1550 nm), 由于其瑞利散射光更弱 (瑞利散射强度与波长的四次方成反比), 光纤远端的散射信号难以被探测到, 该难题直到 1982 年相干探测技术的引入才得以有效解决<sup>[14]</sup>。但高度相干的散射光会造成瑞利散射图样呈散斑状, 也就是存在衰落点, 为了消除偏振衰落、平滑瑞利散射曲线, 早期措施是进行成千上万次平均<sup>[14]</sup>。

1993 年, Taylor 等<sup>[26]</sup>在传统 OTDR 的基础上, 提出强度解调型相位敏感光时域反射仪 ( $\Phi$ -OTDR), 利用相干光相位对扰动敏感的特征, 来监测外界微

弱的扰动。该工作使研究人员的关注点从光纤静态本征特征的测量,逐渐转向了光纤动态传感领域。随后,国内外研究人员在此基础上进行了深入探索,2010年 Lu 等<sup>[27]</sup>采用滑动平均的方法,探测到了铅笔断裂的微弱振动信号;2014年,本课题组使用二阶随机激光放大、一阶拉曼放大和布里渊放大技术实现了无中继距离 175 km 的强度解调型  $\Phi$ -OTDR<sup>[28]</sup>。

然而,强度解调型  $\Phi$ -OTDR 对外界扰动的响应是非线性的,一般只能探测出扰动的位置和频率。为了定量感知外界扰动信号,相位解调型  $\Phi$ -OTDR

以测量瑞利散射回光的相位变化(与光程变化成正比)为基础,可实现对外界扰动信息的定量解调<sup>[29]</sup>。其中,光纤应变和相位变化的定量关系已有多篇文献报道,例如 Dong 等<sup>[30]</sup>的标定结果。目前,相位解调型  $\Phi$ -OTDR 因其性能优越、扩展性强,从而在学术界和工业界得到了广泛关注<sup>[13,31-32]</sup>,成为了分布式声波传感(DAS)的主要技术解决方案之一。

### 3.1 $\Phi$ -OTDR 相位解调技术

$\Phi$ -OTDR 后向瑞利散射信号的相位解调技术主要分为两类:直接探测和相干探测,如图 2 所示。

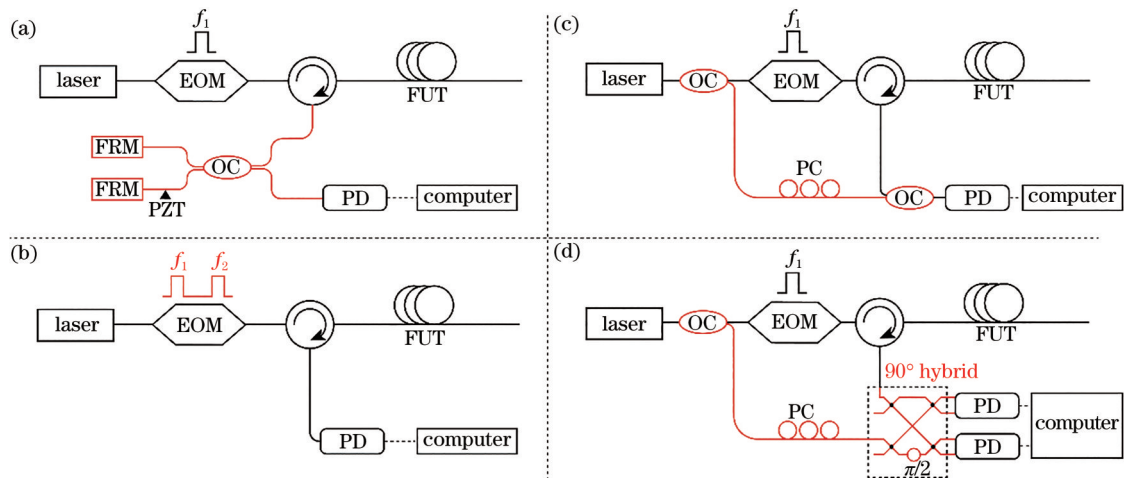


图 2  $\Phi$ -OTDR 中相位解调方案。(a)干涉仪型;(b)双脉冲型;(c)数字域相干解调;(d)基于光桥的光学相干解调  
Fig. 2 Phase demodulation scheme in  $\Phi$ -OTDR. (a) Interferometer structure; (b) double pulse structure; (c) digital domain coherent demodulation; (d) coherent demodulation based on optical hybrid

直接探测  $\Phi$ -OTDR 的相位解调方案主要包括干涉仪型相位解调、双脉冲型相位解调两类。干涉仪型  $\Phi$ -OTDR 的扰动定量解调方案,需要在接收端引入非平衡的干涉仪,通过干涉臂实现光学相位差分的效果,其相位解调可以通过  $3 \times 3$  耦合器<sup>[33-36]</sup>或相位生成载波调制解调<sup>[37]</sup>。双脉冲型  $\Phi$ -OTDR 则在传感光纤中分时打入两个不同频率的探测脉冲,外界扰动会改变两脉冲间的光程差,进而影响它们的干涉结果,根据其干涉特性的变化可以定量恢复外界环境信息<sup>[24,38-39]</sup>。

相干探测  $\Phi$ -OTDR 的相位解调方案分为:数字相干解调、光学相干解调两类。2011年, Pan 等<sup>[40]</sup>报道了数字相干解调的实验,与直接探测  $\Phi$ -OTDR 不同,该方案从光源引出一部分光作为本振光,通过对本振光与瑞利散射光的拍频信号做傅里叶积分变换获取相位信息。另外一种数字域获取相位的相干解调方案是希尔伯特变换,通过 Kramers-Kronig 关系获得信号的实部和虚部,进而获取相位信

息<sup>[41-44]</sup>。此外,本课题组还提出了一种通过信号实部和相位的 Kramers-Kronig 关系直接获取  $\Phi$ -OTDR 信号相位的方法<sup>[45]</sup>,该方案可以消除回波信号自拍频的影响进而提升信噪比。整体而言,数字相干解调的  $\Phi$ -OTDR 硬件结构简单,本振光对瑞利散射信号可提供较大的增益,能够有效提升系统的灵敏度。

光学相干解调一般需要借助于  $90^\circ$  光桥或  $2 \times 4$  耦合器来实现。2014年,本课题组基于光学相干解调技术首次在  $\Phi$ -OTDR 中实现了基于零差探测的定量扰动解调<sup>[46]</sup>。该方案降低了模/数转换卡的采样率要求,减小了接收机数据采集、存储和后续信号处理的运算压力。然而,  $90^\circ$  光桥和  $2 \times 4$  耦合器这类光学元器件存在一些固有缺陷,会造成解调后的传感信号失真<sup>[47-48]</sup>。针对此现象,本课题组进行了定量分析,并根据  $\Phi$ -OTDR 接收信号的特征,提出了针对  $90^\circ$  光桥幅度不平衡和相位偏移问题的实时补偿方法<sup>[47-48]</sup>。此外, Chen 等<sup>[49]</sup>还提出了一种结合双脉冲的光学相干解调方案,通过对泵浦脉冲进

行正交编码,仅使用单通道探测以及数字域滤波的方式,即可同时获取 I/Q 两路的回波信号,进而解调出相位信息。

整体而言,这 4 类扰动定量解调方案各有优劣,可按照具体应用需求进行选择。干涉仪和双脉冲探测  $\Phi$ -OTDR 直接在光路上实现了相位差分,一定程度上降低了后期数据信号处理的工作量;相干探测  $\Phi$ -OTDR 信号处理量较大,但方案灵活易扩展、抗衰落方法多样,因此下文将重点阐述相干探测  $\Phi$ -OTDR 的抗干涉衰落技术。

### 3.2 干涉衰落对相位解调的影响

无论是数字域还是光域的相干相位解调,都面临从干涉衰落点正确提取相位的难题,本小节重点介绍强度噪声在相位解调过程中的影响,为后续干涉衰落的抑制技术提供理论依据。

对于典型的相干探测  $\Phi$ -OTDR(单载波频率、单偏振探测脉冲),其后向瑞利散射信号与本振光拍频的  $i$  路和  $q$  路,可以表示为

$$\begin{cases} i(k, t) = A_{k,t} \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi_{k,t}] + n_i(k, t) \\ q(k, t) = A_{k,t} \sin[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi_{k,t}] + n_q(k, t) \end{cases}, (9)$$

式中:  $t$  为快时间轴,对应光纤长度方向上的不同位置;  $k$  为慢时间轴,代表同一光纤位置下不同探测脉冲获得的信号;  $\omega_s$  为探测脉冲的角频率;  $\omega_{LO}$  为本振光的角频率;  $n_i$  和  $n_q$  代表互不相关的高斯白噪声,其均值都为 0,方差为  $\sigma_n^2$ 。根据第 2 节对衰落特性的分析,  $A$  为瑞利散射信号的振幅,满足瑞利分布;  $i$  路和

$q$  路信号的输出为高斯分布,均值为 0,方差为  $\sigma^2$ <sup>[50-52]</sup>。需要说明的是,如果外界没有扰动,同一位置的信号振幅  $A_{k,t}|_{t=t'}$  可以认为是不随时间变化的<sup>[53]</sup>。

通常而言,  $n_i$  和  $n_q$  为相互独立的变量,服从二维高斯分布,其归一化噪声的联合概率密度函数为

$$P_{x,y}(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\delta^2} + \frac{y^2}{\delta^2}\right)\right], (10)$$

式中:  $x = n_i(k, t')/A(t')$ ;  $y = n_q(k, t')/A(t')$ ;  $\delta^2 = \sigma_n^2/A^2(t')$  为归一化的噪声方差。此外,  $i$  路和  $q$  路的输出中存在的强度噪声会对解调后的相位信号产生影响,也就是说,强度噪声会在相位解调的过程中转换为相位噪声。该过程可以表示为<sup>[52]</sup>

$$\Delta(k, t') = \arctan\left[\frac{\sin\Phi(k, t') + x}{\cos\Phi(k, t') + y}\right] - \Phi(k, t'), (11)$$

式中:  $\Phi(k, t') = (\omega_s - \omega_{LO})t' + \phi_{k,t'}$  包含了本振光与探测光的相位差和外界扰动两部分。通过改进的雅可比行列式<sup>[54]</sup>和强度噪声与相位噪声的关系,即可将强度噪声的概率分布改写为转移相位噪声的概率分布<sup>[52]</sup>,

$$P_\Delta(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{x,y}[x(y, \Delta), y] \left| \frac{\partial x}{\partial \Delta} \right| dy, (12)$$

式中:  $x(y, \Delta)$  为(11)式的逆函数;  $\frac{\partial x}{\partial \Delta}$  为归一化噪声  $x$  关于转移相位噪声  $\Delta$  的偏导数。对于相对较小的强度噪声,(12)式的积分结果为<sup>[52]</sup>

$$P_\Delta(\Delta) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left(-\frac{\sin^2\Delta}{2\delta^2}\right) \cos(\Delta) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\delta^2}\right). (13)$$

值得注意的是,(13)式近似满足高斯分布,因此强度噪声转移到相位上的噪声方差约为  $\delta^2$ 。在强度噪声小于信号强度的情况下,转移的相位噪声与后向瑞利散射信号的强度成反比。对于散射信号强度的极小点(干涉衰落点),(13)式的线性关系将失效,但可以确定的是干涉衰落点会带来更大的相位噪声,使得定位和解调外界扰动的难度急剧增加<sup>[23,55]</sup>。

此外,  $\Phi$ -OTDR 的相位沿光纤长度方向存在相位累加过程,为了避免前端扰动信息对之后相位信息的串扰,通常需要进行差分相位处理。解调出信号的信噪比实际上与两个差分点的强度有关<sup>[50]</sup>,

$$R_{\text{SNR}\phi} = \frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_n^2 [1/A^2(t_1) + 1/A^2(t_2)]}, (14)$$

式中:  $\sigma_\phi^2$  为外界扰动强度;  $t_1$  和  $t_2$  为两差分点位置。因此,解调出的相位信噪比是波动的,且波动情况与强度曲线的波动情况有关。其波动的均值为<sup>[50]</sup>

$$\mu(R_{\text{SNR}\phi}) = \frac{2}{3} \sigma_\phi^2 R_{\text{SNR intensity}}, (15)$$

式中:  $R_{\text{SNR intensity}} = \sigma^2/\sigma_n^2$  为强度信号的信噪比。而相位信噪比波动的归一化标准差为<sup>[52,56-57]</sup>

$$C_V(R_{\text{SNR}\phi}) = \frac{\sigma(R_{\text{SNR}\phi})}{\mu(R_{\text{SNR}\phi})} \approx \sqrt{\frac{4}{5}} = 0.8944, (16)$$

式中:  $\sigma(R_{\text{SNR}\phi})$  为相位信噪比的标准差;在系统结构不变的前提下,  $C_V(R_{\text{SNR}\phi})$  的值不随信号整体质量

的提升而改变。

综上所述,  $\Phi$ -OTDR 解调出的相位信号质量与差分两点的强度信噪比直接相关, 干涉衰落点极低的强度信噪比将严重制约信号解调质量。因此, 抗干涉衰落的一种直接思路是提升  $\Phi$ -OTDR 的强度信噪比, 比如通过小波降噪、经验模态分解等方式实现<sup>[58]</sup>。但是, 典型的  $\Phi$ -OTDR [如图 2(c)、(d) 中单频、单偏振系统] 其相位信噪比波动的归一化标准差始终为 0.89; 即系统强度信噪比越高, 解调出的相位信息信噪比波动程度越大。因此, 单独提升强度信噪比不能保证完全消除干涉衰落, 仍需提出一些新方案, 以降低系统的归一化标准差  $C_V(R_{SNR\phi})$ 。

## 4 抗干涉衰落技术

为了消除干涉衰落对信号解调的影响, 一种常

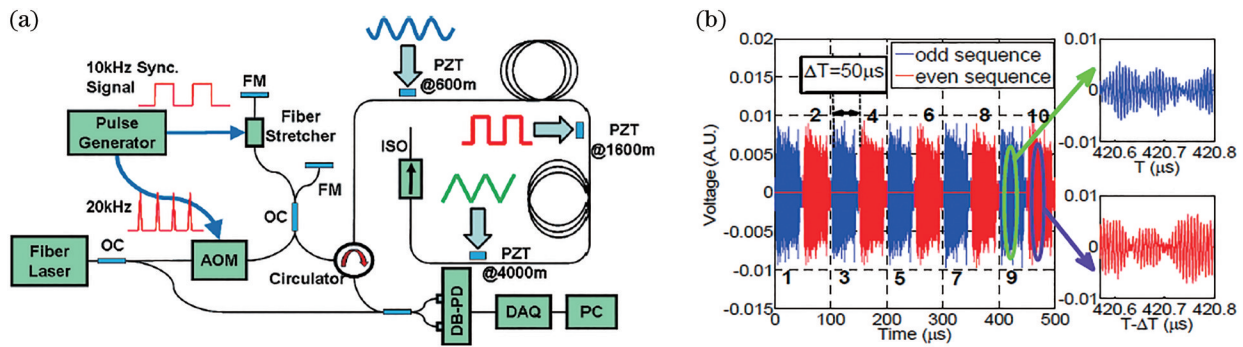


图 3 相移双脉冲法消除干涉衰落<sup>[64]</sup>

Fig. 3 Phase shift double pulse method for eliminating interference fading<sup>[64]</sup>

随后, 该课题组<sup>[65]</sup>对相移双脉冲法进行了改进, 对相邻两探测脉冲的后半部分分别施加 0 和  $\pi$  的相移, 产生无相移和  $\pi$  相移的两种探测脉冲。根据优化的相位信息选择算法, 在不牺牲带宽的情况下降低了衰落点对相位解调的影响。2021 年, He 等<sup>[66]</sup>对相移双脉冲法做了进一步改进, 通过在数字域对瑞利散射信号不同频段引入  $\pi$  相移的变换, 获取了多达 6 条干涉衰落位置不同的信号曲线, 相位信息经过加权平均算法(旋转矢量求和<sup>[51]</sup>)很大程度上降低了干涉衰落的影响, 其原理和实验结果如图 4 所示。

### 4.2 频域调控抗干涉衰落技术

早在 1984 年, 英国的 Healey<sup>[67]</sup>即预测了调控 OTDR 探测信号波长来抑制干涉衰落的可行性, 1992 年日本 NTT 公司的 Shimizu 等<sup>[20]</sup>通过频率扫描平均的方法, 实现了相干 OTDR 干涉衰落的消除。随后, Mermelstein 等<sup>[68]</sup>研究了光纤瑞利散射中频率的相关性, 发现当脉冲的频率间隔大于等于

用的方式是叠加多个自由度(即统计独立)的信号, 比如无线通信中使用的正交频分复用(OFDM)<sup>[15]</sup>、光学成像中使用的多模光源<sup>[17]</sup>。在  $\Phi$ -OTDR 中也可通过多个自由度叠加的方式消除衰落, 比如偏振分集接收<sup>[59-61]</sup>、多芯光纤空间分集接收<sup>[62]</sup>、多模光纤中模式分集接收<sup>[63]</sup>等; 目前,  $\Phi$ -OTDR 最常用的干涉衰落消除方法是叠加多个不相关或相关度低的相位(频率)自由度。

### 4.1 $\pi$ 相移脉冲抗干涉衰落技术

在调控相位消除干涉衰落方面, Pan 等<sup>[64]</sup>于 2012 年提出利用相移双脉冲法来消除干涉衰落。该方案将两个相位差为  $\pi$  的脉冲依次打入光纤, 利用干涉图样互补的特性以获取两路干涉衰落点位置各不同的信号, 两路信号叠加后可以消除多数的干涉衰落位置点, 其实验装置和实验结果如图 3 所示。

脉冲宽度的倒数时, 两组瑞利散射曲线几乎失去相关性。在此基础上, Lu 等<sup>[69]</sup>报道了通过声光调制器调制出多频脉冲, 对相干探测型 OTDR 中的干涉衰落现象进行消除。这些研究成果对后续  $\Phi$ -OTDR 采用频域调控技术消除干涉衰落提供了研究基础。

#### 4.2.1 针对单脉冲 $\Phi$ -OTDR 的频域调控抗衰落技术

2013 年, Zhou 等<sup>[70]</sup>探讨了一种  $\Phi$ -OTDR 的理论模型, 并指出多频率  $\Phi$ -OTDR 具有消除干涉衰落的潜力。随后, 该课题组通过电光调制器和声光调制器在一个光往返时间内产生了 100 组不同频率脉冲, 在 9.6 km 的待测光纤上实现了 0.5 MHz 的测量带宽<sup>[71]</sup>。同时该方案中还指出, 在牺牲部分测量带宽的前提下, 可用于消除干涉衰落, 其实验方案如图 5 所示。Zabihi 等<sup>[22]</sup>则利用 3 只声光调制器同时生成了 3 组频率不同的探测脉冲, 在不牺牲空间分

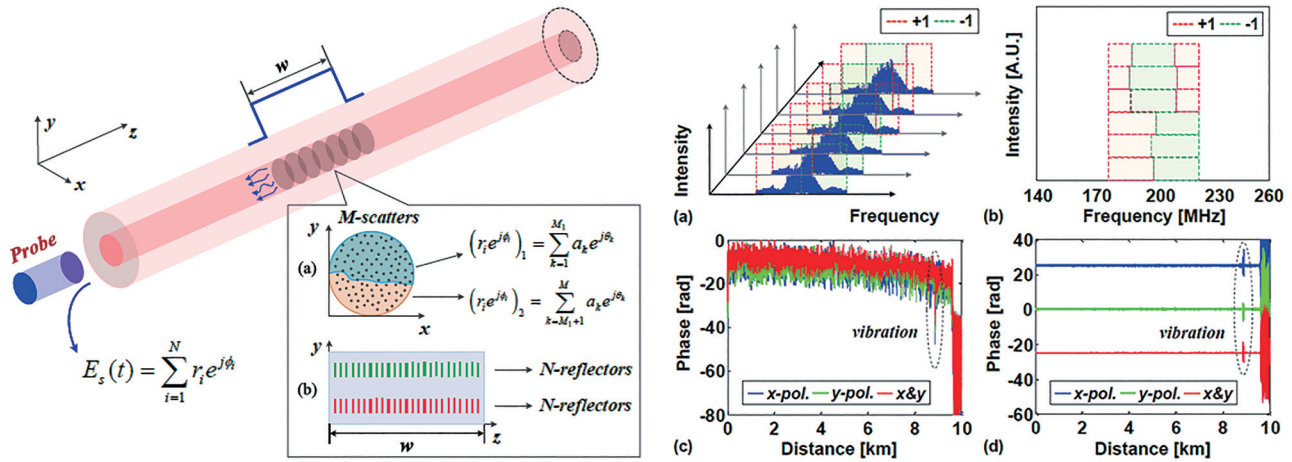


图 4 脉冲相移法消除干涉衰落<sup>[66]</sup>

Fig. 4 Pulse phase shift for eliminating interference fading<sup>[66]</sup>

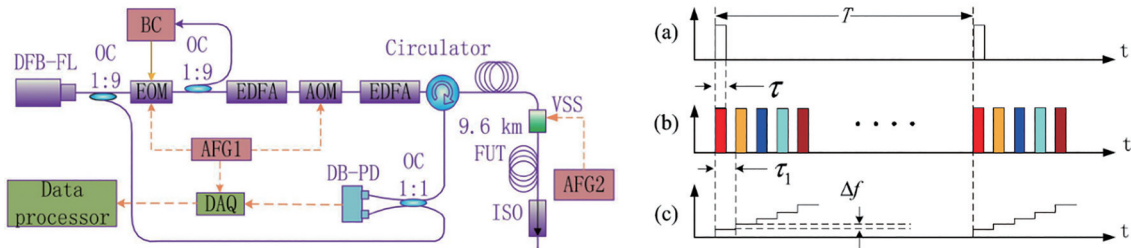


图 5 短时多频序列<sup>[71]</sup>

Fig. 5 Temporally sequenced multi-frequency<sup>[71]</sup>

分辨率的情形下消除干涉衰落;此外,该方案在相位重构的过程中,以振幅为依据,应用优化追踪的算法,在任何时刻都能够选择最为准确的相位信息进行重构。该方案能够在不改变传统Φ-OTDR系统结构的情形下,实现外界扰动信息的准确重构,大幅降低衰落点相位解调的错误率。

2013年,Hartog等<sup>[43]</sup>在其专利中提出了一种基于光频梳消除干涉衰落的方案。通过在环腔中引入一个具有固定移频的声光调制器,持续、等间隔地将窄线宽激光调制为多频、准连续的探测脉冲序列,系统概念图如图6所示。上述方案大都需要通过滤波的方式将各个频率的信息进行分

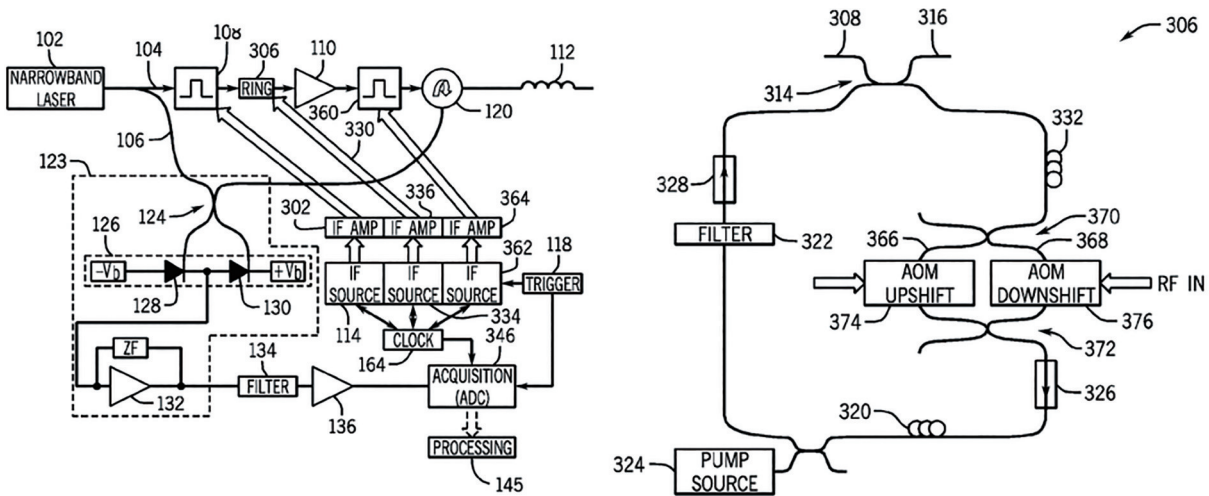


图 6 光频梳消除干涉衰落<sup>[43]</sup>

Fig. 6 Optical frequency comb for eliminating interference fading<sup>[43]</sup>

离,并分别提取里面的相位信息。而对多组相位信息进行分析的过程中,需要对这些信息进行筛选整合。2018年,Hartog等<sup>[21]</sup>通过实验和仿真分析比较了直接相位叠加、线性加权叠加、非线性加权叠加和间接叠加方案后,认为在最优情况下叠加 $M$ 组不同频率的信号能够实现解调信号信噪比近 $M$ 倍的提升;此外,他们还仿真发现,当叠加5~10组频率信号时消除干涉衰落的效应最为显著;叠加频率数超过10后,对消除衰落而言收益甚微,但能够提高解调信号的信噪比。但是,该工作并未给出信道数和衰落消除效果之间的解析关系。

#### 4.2.2 针对啁啾脉冲 $\Phi$ -OTDR的频域调控抗衰落技术

2014年,Yang等<sup>[72-73]</sup>将雷达信号处理中的脉冲压缩技术引入用于光纤静态本征参数测量的OTDR系统中,该方案在保证空间分辨率的同时,极大地提升了瑞利后向散射信号的信噪比。随后,Liu等<sup>[74]</sup>提出了时间门控数字光频域反射计(TGD-OFDR)系统,在110 km待测光纤中实现了1.6 m空间分辨率的反射点测量。为了实现扰动的定量测量,Wang等<sup>[75]</sup>在此基础上采用了 $90^\circ$ 光桥,给出了

相位提取的方法,在40 km传感光纤上实现了3.5 m的空间分辨率、0.08 g应变精度的传感。在线性啁啾脉冲优化方面,Mompó等<sup>[76]</sup>提出高斯窗型探测脉冲提升对旁瓣的抑制比,本课题组则提出通过预失真的方式降低IQ调制器高阶谐波的产生<sup>[77]</sup>,从而提升啁啾探测光的质量。

线性啁啾脉冲的使用大幅提升了 $\Phi$ -OTDR的信噪比,对减少衰落点的影响有一定帮助,而频分复用技术与啁啾脉冲的结合将大幅提升其抗干涉衰落的效果。2017年,Chen等<sup>[51]</sup>将一个包含四段频率的长啁啾脉冲作为探测光,通过匹配滤波分离出不同频率的瑞利散射曲线,并通过旋转矢量求和方法(RVSM)来整合相位信息消除干涉衰落,在5 m空间分辨率下35 km光纤的尾端解调信号的信噪比高达26 dB。旋转矢量求和法以各个频率的第一条瑞利散射矢量曲线作为参考,仅保留由外界扰动导致的相位变化;叠加过程中有效避免了两个矢量信号相位差超过 $90^\circ$ 时,传统叠加方式产生新衰落点的问题,具体原理如图7所示;此外,旋转矢量求和法不需要对每个频率信息分别进行解卷绕和相位差分操作,具有较快的信号处理速率。

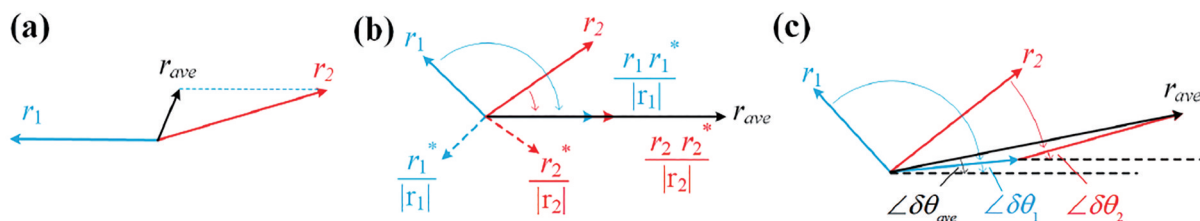


图7 旋转矢量求和消除干涉衰落<sup>[51]</sup>

Fig. 7 Rotated-vector-sum method for eliminating interference fading<sup>[51]</sup>

由于这种方法需要使用多个不同频率的瑞利散射信号来消除干涉,会倍增接收信号的带宽,增大了接收机带宽的压力。为此,本课题组提出了正负频复用技术<sup>[78]</sup>,倍增了系统的可用频谱范围,从而降低了对接收机带宽的需求;随后,Chen等<sup>[79]</sup>使用大带宽的任意波形发生器和高速强度调制器来产生宽扫频范围的啁啾脉冲,结合正负频复用有效地抑制了干涉衰落,在9.8 km光纤上实现了0.8 m空间分辨率,245.6 pε/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的最小可测应变。

为了在消除干涉衰落的同时,实现 $\Phi$ -OTDR关键性能指标(传感距离、传感带宽等)的进一步突破,本课题组先后报道了如下进展:在超长距离

(>100 km)传感方面,将正负频啁啾脉冲系统与FDM、拉曼放大技术结合<sup>[28,80-81]</sup>,实现了103 km的传感距离、9.3 m空间分辨率、97 pε/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 最小可测应变和高达21.6 kHz的测量重复率,实验系统如图8所示<sup>[82]</sup>;在提升传感带宽方面,提出了一种利用啁啾连续光作为探测光的方案,突破了 $\Phi$ -OTDR需基于脉冲光作为探测光的传统观念,使得基于线性啁啾 $\Phi$ -OTDR的时域和频域资源都得以充分利用,在千米级传感距离下实现了兆赫兹级传感带宽、皮应变级灵敏度的 $\Phi$ -OTDR,其实验系统如图9所示<sup>[83]</sup>。

除了线性啁啾脉冲,2019年Zhang等<sup>[84]</sup>提出了一种多载波非线性啁啾调频脉冲方案,使用非线性



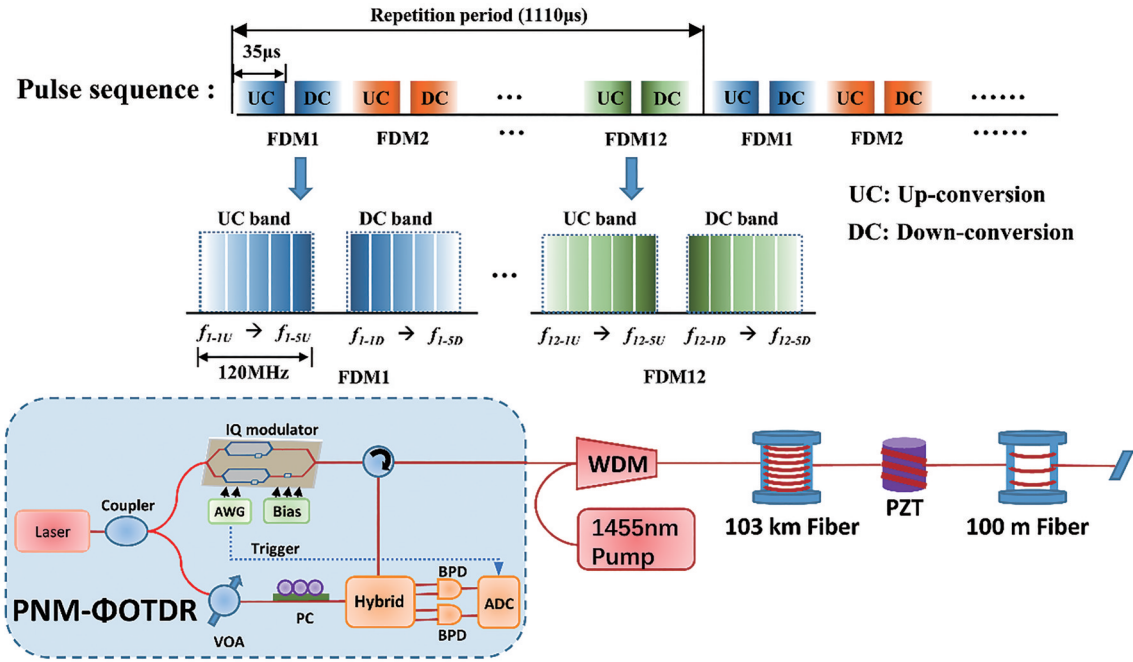


图 8 正负频消除干涉衰落<sup>[82]</sup>

Fig. 8 Positive and negative frequency band for eliminating interference fading<sup>[82]</sup>

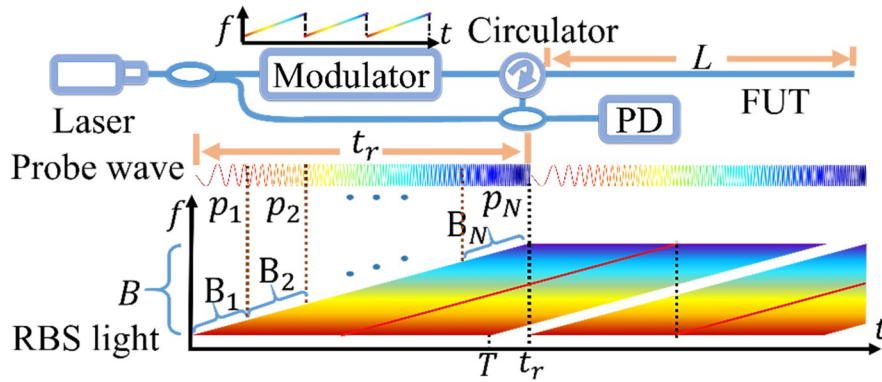


图 9 抗干涉衰落的啁啾连续光 Φ-OTDR<sup>[83]</sup>

Fig. 9 Continuous chirped-wave phase-sensitive OTDR with interference fading elimination<sup>[83]</sup>

啁啾脉冲压缩提升了旁瓣抑制比,综合多载波的瑞利散射信号消除了干涉衰落的影响,并有效提升了系统性能,其实验系统如图 10 所示。

表 1 汇总了国内外近年来基于啁啾脉冲 Φ-OTDR 的部分代表性工作,可以看到这些进展显著地拓展了 Φ-OTDR 的原有性能边界。

上述研究大都采用了旋转矢量求和法来消除衰落,但叠加自由度的数量(频分复用、正负频等方案中的独立信道数)与衰落抑制效果之间的定量关系不明朗。本课题组通过理论分析、数值仿真和实验验证,得出旋转矢量求和后重组的相位信息将获得近  $K$  倍的振幅增益,其中增益与叠加信道数  $M$  成正比<sup>[52]</sup>,

$$K^2 = \frac{3M((2M-1)!!)^{1/M}}{(2M+1)} \approx \frac{6M^2}{(2M+1)e} \approx 1.1M. \quad (17)$$

而(16)式中的相位信噪比的波动程度( $C_V$ )将呈指数下降<sup>[52]</sup>,

$$C_V(R_{SNR\phi}) = \sqrt{\frac{2M^2 + 5M + 1}{4M^3 + 6M^2}}. \quad (18)$$

研究人员可以根据应用需求和传感系统的硬件资源,参考(17)式、(18)式和图 11 的结果来选择叠加自由度(信道)的数量。

#### 4.2.3 针对编码脉冲 Φ-OTDR 的频域调控抗衰落技术

脉冲编码技术与啁啾脉冲类似,都能打破分布式光纤传感系统传感距离和空间分辨率之间的制

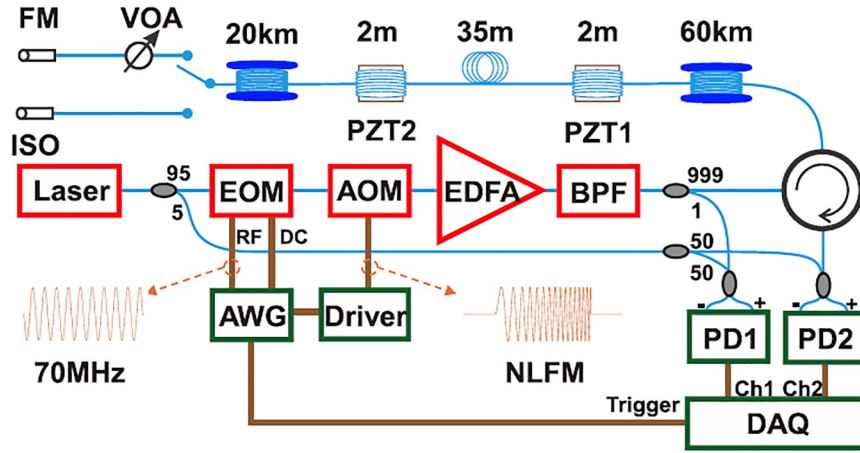


图 10 多载波非线性调频消除干涉衰落<sup>[84]</sup>

Fig. 10 Multi-carrier non-linear frequency modulation for eliminating interference fading<sup>[84]</sup>

表 1 基于啁啾脉冲的相位解调  $\Phi$ -OTDR 性能指标发展历程

Table 1 Development of phase demodulation  $\Phi$ -OTDR based on chirped pulse

Year	Reference	Key technology	Sensing distance /km	Spatial resolution /m	Disturbance frequency /Hz	Strain sensitivity	Fading
2015	[74]	TGD-OFDR	40	3.5	600	0.08 g	Yes
2017	[51]	TGD-OFDR+RVSM	35	5	$1.25 \times 10^3$	—	No
2017	[78]	Positive and negative frequencies	2.12	$0.34 \times 10^{-3}$	—	—	—
2018	[76]	Sidelobe suppression	50	$3.4 \times 10^{-2}$	700	140 $\mu\epsilon$	Yes
2018	[79]	TGD-OFDR+RVSM+double side belt	9.8	0.8	$5 \times 10^3$	$245.6 \mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$	No
2019	[84]	Nonlinear chirp+RVSM	80	2.7	610	—	No
2020	[82]	Positive and negative frequencies+RVSM+Raman amplification	103	9.3	$1.08 \times 10^4$	$97 \mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$	No
2021	[83]	Continuous chirped-wave	1	4.4	$1 \times 10^6$	$5 \mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$	No

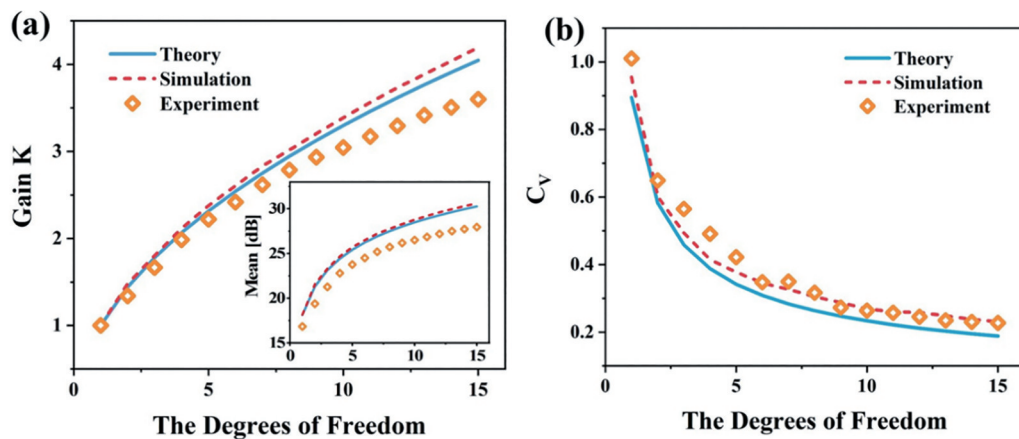


图 11 多自由度叠加方式下, 叠加数  $M$  与重构解调信号增益和波动程度的关系<sup>[52]</sup>。(a) 重构解调信号增益; (b) 波动程度

Fig. 11 In the case of multi-degree-of-freedom superimposition, relationship between superimposition number  $M$  and reconstructed demodulation signal gain and fluctuation<sup>[52]</sup>. (a) Reconstructed demodulation signal gain; (b) fluctuation

约关系, 在布里渊光时域分析(BOTDA)领域已经较为常用<sup>[85-88]</sup>, 但由于将编码技术直接用于  $\Phi$ -OTDR 并不会直接得到一个线性的系统响应, 因

此在先前较长一段时间内没有文献报道编码  $\Phi$ -OTDR 对扰动的定量解调结果<sup>[89]</sup>。

2016 年, Martins 等<sup>[90]</sup> 在相干探测  $\Phi$ -OTDR 中

使用相移键控调制的非周期随机码在 500 m 的传感距离内,理论上可实现 2.5 cm 的空间分辨率,但并未实现动态扰动的定量解调。2018 年,Shiloh 等<sup>[91]</sup>使用相移键控调制的伪随机码,在 1 km 的传感距离中实现了 14.7 cm 的空间分辨率。为了抑制互相关旁瓣对信号解调的影响,该方案使用了高达 61627 位的编码序列,造成编码脉冲的长度远大于光纤距离,测量时间增加了近 39 倍,且解调信号的质量仍不理想。

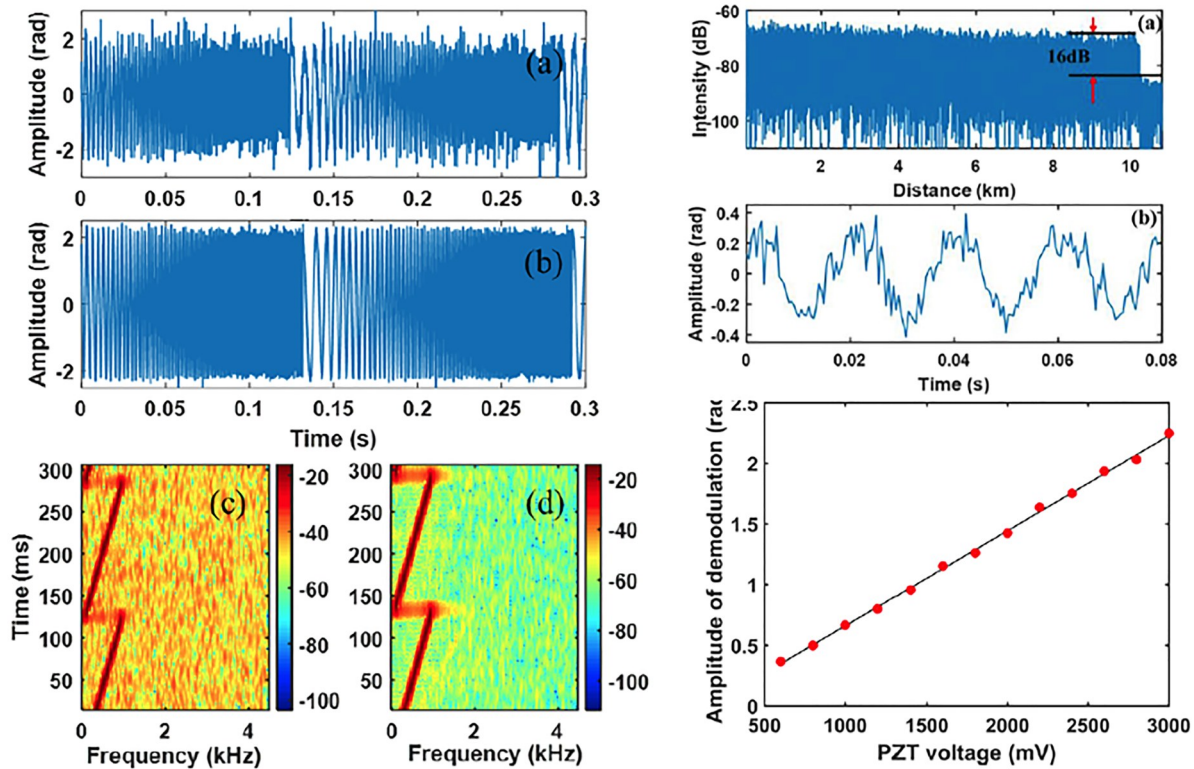


图 12 线性化的编码  $\Phi$ -OTDR<sup>[44]</sup>

Fig. 12 Linearized pulse-coding phase-sensitive OTDR<sup>[44]</sup>

但是单极性 Golay 编码  $\Phi$ -OTDR 需要依次打入四组编码序列才能完成一次扰动测量,一定程度上降低了系统的传感带宽。为此,本课题组提出了双极性 Golay 编码机制<sup>[93]</sup>,实现了系统传感带宽的倍增;此外,该工作中还应用了基于单频矩形脉冲频谱提取与组合(SERM)方法<sup>[94]</sup>,在不增加系统复杂度的情况下,实现了干涉衰落的抑制。SERM 方法还可应用于大部分以普通单频矩形脉冲作为探测信号的  $\Phi$ -OTDR 中,仅需从接收到的散射信号 sinc 形频谱的主瓣旁瓣中提取出三个部分重叠的子频带,通过频谱重组算法即可大幅降低干涉衰落点的比例<sup>[94]</sup>;进一步结合分布式频漂补偿法,双极性 Golay 编码  $\Phi$ -OTDR<sup>[93]</sup>在 10 km 传感光纤中,实现

为了解决编码  $\Phi$ -OTDR 中的非线性问题,本课题组提出采用外差探测以分离码间串扰,并使用强度调制型单极性 Golay 码,实现了编码  $\Phi$ -OTDR 响应的线性化<sup>[44,92]</sup>,如图 12 所示。该工作依次使用了 16 位、32 位、64 位和 128 位单极性 Golay 码,其解调扰动的信噪比与理论增益吻合。在 2048 位编码实验中,将编码  $\Phi$ -OTDR 的传感距离提升到了 10 km,空间分辨率提升至 0.92 m,与单脉冲平均后的结果相比其信噪比提升了 18.3 dB。

了 0.92 m 的空间分辨率,75  $\text{pe}/\sqrt{\text{Hz}}$  的最小可测应变,解调扰动的信噪较单极性编码方案提高了 7.1 dB,且测量时间缩短一半,系统原理和实验结果如图 13 所示。

#### 4.3 对干涉衰落不敏感的光纤瑞利散射传感系统

由于探测脉冲光具有很高的相干性,得到的传感信号是不同位置的瑞利散射信号干涉的结果。因此,传感信号与探测光的频率直接相关。根据扰动对光纤的影响与探测光频率的定量关系,可以实现对干涉衰落不敏感的光纤传感系统。此类技术至少可追溯到 2009 年 Koyamada 等<sup>[95]</sup>的工作,通过分析外界扰动对瑞利散射频率图样的影响来进行

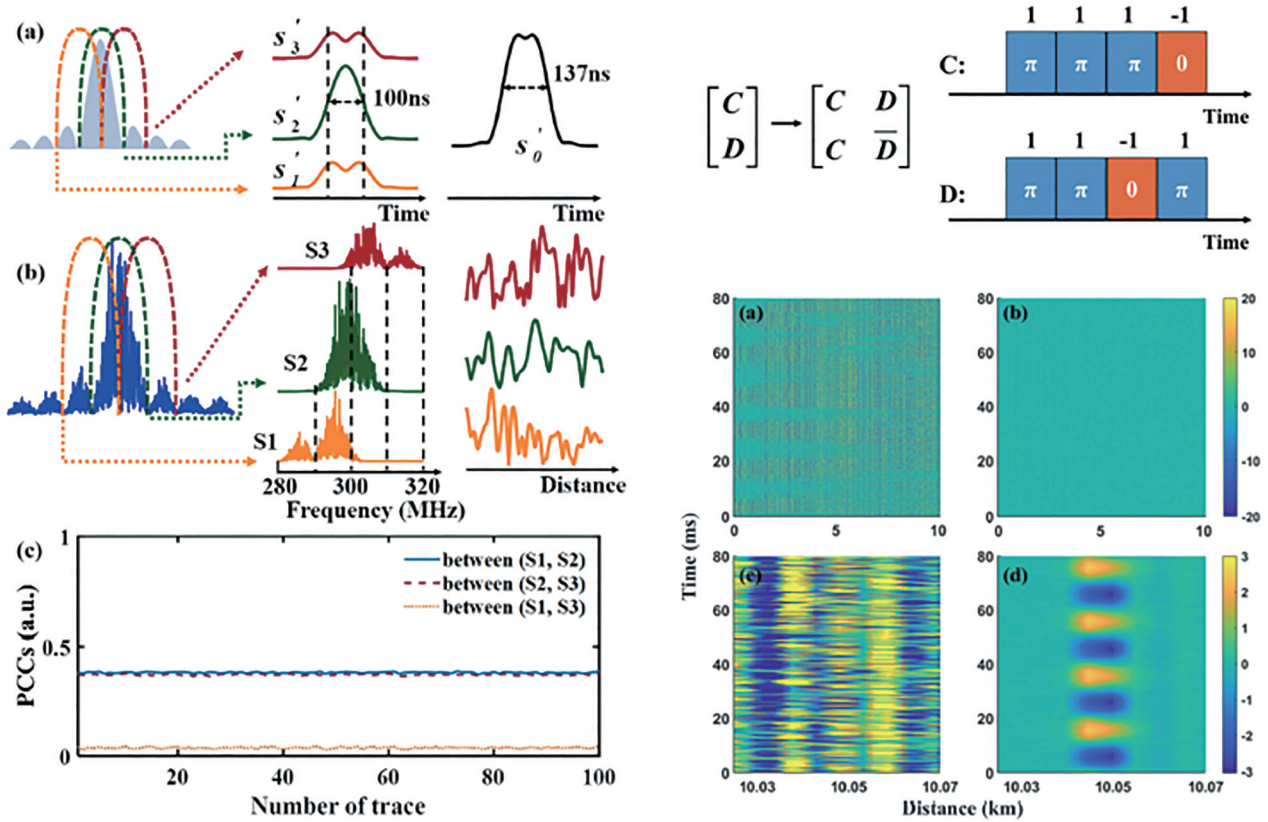


图 13 频谱提取与组合的干涉衰落抑制方法<sup>[93]</sup>

Fig. 13 Spectrum extraction and remix method for eliminating interference fading<sup>[93]</sup>

温度和应变的静态测量;该工作在 8 km 传感光纤中实现了米量级空间分辨率,0.01 °C 温度分辨率的测量。随后,Liehr 等<sup>[96]</sup>提出了一种新颖的电流调控光源扫频的方式,在 970 m 传感光纤中实现了 47.5 pe 扰动的测量。但该类方案都需要通过耗时的频率扫描过程来获得不同频率光的瑞利散射曲线,使得信号响应带宽非常有限,主要用于静态测量或慢速动态测量。近年来,基于瑞利散射图样的光纤分布式传感系统在响应带宽方面得到了质的提升,下文将举例介绍。值得一提的是,目前国际上对此类系统的命名并不统一;在本文的论述中,鉴于此类系统均使用高相干探测光,而传感信号对探测光波的相位变化是敏感的,因此都纳入 Φ-OTDR 的范畴。

2016 年, Pastor-Graells 等<sup>[97]</sup>提出了一种 CP-ΦOTDR 的系统,将扰动对瑞利散射频率图样的改变转化到时域上,每次仅需注入单个啁啾脉冲即可完成一次测量,显著提升了系统的响应带宽。由于该系统的空间分辨率由脉冲宽度决定,为了保证空间分辨率并实现长距离的探测,通常 CP-ΦOTDR 需要引入分布式放大技术<sup>[98]</sup>。Ma

等<sup>[99]</sup>在此基础上引入了双边带正负啁啾脉冲,通过差分解调技术,实现了低频噪声高达 27 dB 的抑制。2019 年,Chen 等<sup>[100]</sup>提出了一种非匹配滤波器,其空间分辨率由脉宽和非匹配率共同决定,使得此类系统更为灵活,并在 10 km 传感光纤中实现了 2 m 空间分辨率,5 kHz 扰动的测量,典型实验结果如图 14 所示。

2020 年,本课题组报道了一种基于频域子啁啾脉冲提取算法(SPEA)的 Φ-OTDR<sup>[101]</sup>。在该工作中,我们分析了传统基于瑞利散射图样解调 Φ-OTDR 传感系统需要扫频的本质原因:提取不同频率的瑞利散射信息。从瑞利散射频域信息提取的角度出发,我们提出基于频域子啁啾脉冲提取方法,该方法使用大频率范围的啁啾脉冲可以一次性地将这些瑞利散射信息采集回来,然后在数字域提取不同频率的瑞利散射信息,即可直接恢复出不同频段的瑞利散射曲线,避免了耗时的扫频过程。系统工作原理如图 15 所示。该方案每次测量只需要打入单个啁啾探测脉冲,因此具有较高的扰动响应带宽。此外,基于啁啾脉冲压缩技术,该方案在空间分辨率和传感距离上比 CP-ΦOTDR 有着明显优

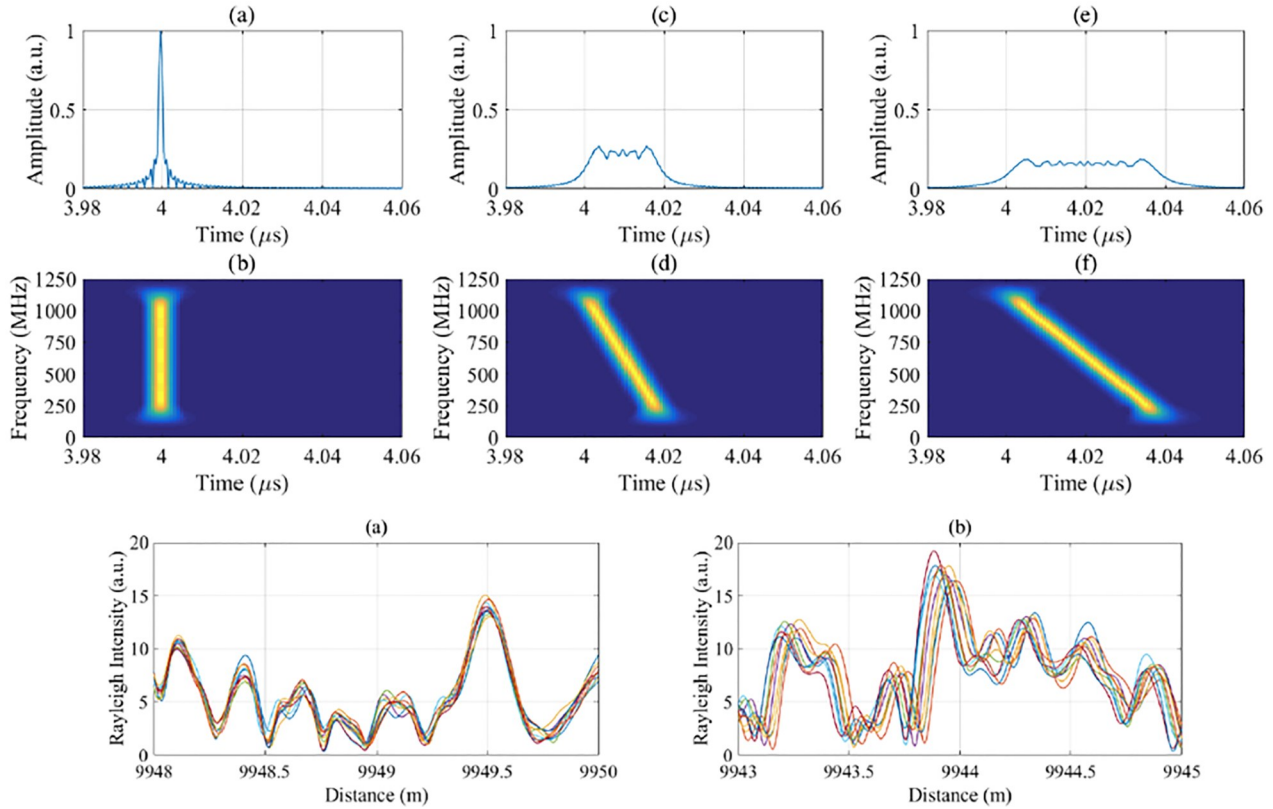


图 14 非匹配滤波法用于干涉衰落不敏感的  $\Phi$ -OTDR<sup>[100]</sup>

Fig. 14 Non-matched filter method for fading immunity  $\Phi$ -OTDR<sup>[100]</sup>

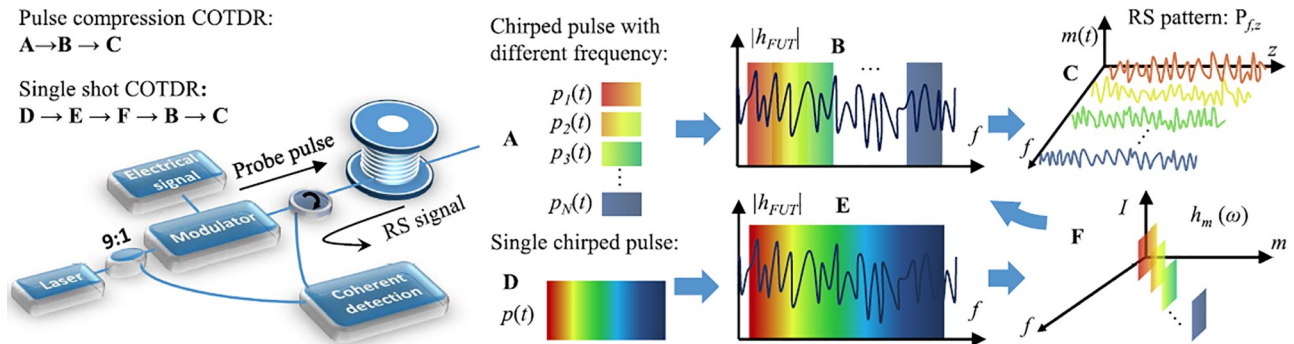


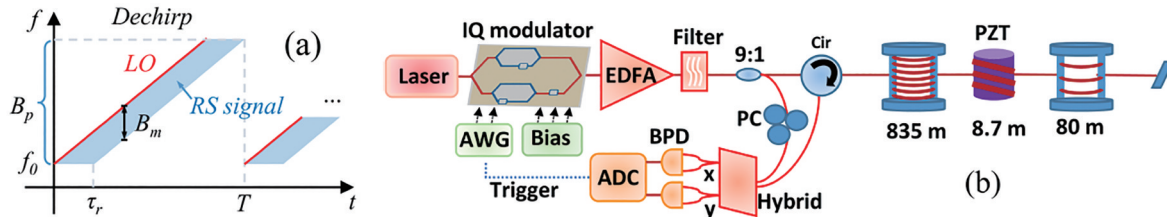
图 15 频域子啁啾脉冲提取法用于干涉衰落不敏感的  $\Phi$ -OTDR<sup>[101]</sup>

Fig. 15 SFEA in frequency domain for fading immunity  $\Phi$ -OTDR<sup>[101]</sup>

势。在 134 m 的验证工作中实现了 2 m 空间分辨率, 400 kHz、 $2.3 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$  的扰动测量; 在 75 km 长距离的传感光纤中, 同样为 2 m 空间分辨率实现了  $94 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$  扰动的测量。

基于频域子啁啾脉冲提取方法通过一次性地提取所需的瑞利散射频域信息, 避免了耗时的扫频过程, 但由于系统的接收机带宽有限, 所提取到的瑞利散射频域信息的频域范围也因此受限, 从而造成系统的空间分辨率和测量范围有限。为此, 本课题组提出了一种基于去啁啾操作和时域

子啁啾脉冲提取的新型 DAS, 其原理示意图如图 16 所示<sup>[102]</sup>。首先通过去啁啾技术, 将大频率范围的瑞利散射信息映射到一个小带宽的接收信号上, 从而降低了系统对接收机带宽的需求; 然后利用时域子啁啾提取算法, 将小带宽接收信号转换为大频率范围的瑞利散射图样; 最后使用和文献 [101] 中相同的频移估计方法, 即可定量地解调出扰动。使用此方案, 最终实现了 28.4 cm 的空间分辨率和  $60 \text{ p}\epsilon$  的测量范围, 同时最小可测应变变为  $80.7 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

图 16 去啁啾技术和时域子啁啾脉冲提取算法用于干涉衰落不敏感的  $\Phi$ -OTDR<sup>[102]</sup>Fig. 16 Dechirp operation and SPEA in time domain for fading immunity  $\Phi$ -OTDR<sup>[102]</sup>

#### 4.4 未来发展趋势展望

在国内外诸多研究团队的共同努力下,  $\Phi$ -OTDR 的抗干涉衰落技术已得到了长足的发展, 诞生了  $\pi$  相移、常规频分复用、基于啁啾脉冲的频分复用、基于编码脉冲的频域调控、瑞利散射图样解调等有效方案。放眼未来, 具备抗干涉衰落能力的  $\Phi$ -OTDR 仍有广阔的发展空间, 作者试从以下紧密相联的三个方面分别进行一些展望, 以期抛砖引玉。

1) 在工程应用方面, 相干  $\Phi$ -OTDR 具有高性能和高扩展性的特点, 使其在各类工程应用中具有巨大的潜力; 但由于各种新颖的信息调制解调方案往往需要更大的系统带宽和更强的计算力, 导致诸多新颖的抗干涉衰落技术方案目前尚未得到广泛应用。因此, 大带宽实时解调软硬件技术的不断进步, 是推进  $\Phi$ -OTDR 工程应用的关键一环。

2) 在技术创新方面, 随着抗干涉衰落技术中多频信息的进一步使用, 以及  $\Phi$ -OTDR 整体性能突破对更大电子带宽的需求, 其技术发展已经触及频谱资源决定的极限, 因此如何提升  $\Phi$ -OTDR 频谱效率将是实现源头创新的一种潜在思路。

3) 在学术交叉共融方面,  $\Phi$ -OTDR 与无线通信、雷达、光学成像等诸多领域具有本质共通点, 如何借鉴其他领域的创新思路以推动  $\Phi$ -OTDR 的技术进步, 以及如何基于  $\Phi$ -OTDR 平台产出对其他领域有参考价值的研究成果, 值得在未来深入探索。

## 5 结束语

相位敏感光时域反射仪 ( $\Phi$ -OTDR) 在近十余年间经历了快速发展, 国内外学者在其传感技术方案上不断推陈出新, 从而在传感距离、空间分辨率、灵敏度等关键指标上取得了突破性进展, 并随之在周界安防、管道监测、物探、水下线缆检测等领域展示了卓有成效的工程应用, 持续为光纤传感领域的发展注入了强劲动力。

本文针对  $\Phi$ -OTDR 研究中抗干涉衰落这一的关键问题, 回顾了近年来国内外同行探究该问题的历程: 相关研究从早期的理论分析, 逐渐转向到了抗干涉衰落实现技术的研究, 包括  $\pi$  相移型和频域调控型抗干涉衰落技术, 以及不受干涉衰落影响的传感方案等。在这一过程中, 我国学者提出了多项创新方案, 并在国际上得到了广泛关注和认可, 促使我国在  $\Phi$ -OTDR 的研究方面达到了国际一流水准。随着相关应用需求的不断提升,  $\Phi$ -OTDR 仍有许多需要深入探索的学术问题和工程瓶颈, 未来仍然具有广阔的发展空间。

## 参 考 文 献

- [1] Wu H J, Wang Z N, Peng F, et al. Field test of a fully distributed fiber optic intrusion detection system for long-distance security monitoring of national borderline[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 915790.
- [2] Yu X H, Zhou D L, Lu B, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed fence-perimeter intrusion detection[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9679: 96790S.
- [3] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005. 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.
- [4] Martins H F, Fernández-Ruiz M R, Costa L, et al. Monitoring of remote seismic events in metropolitan area fibers using distributed acoustic sensing (DAS) and spatio-temporal signal processing[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [5] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. Science,

- 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [6] Top Ten Scientific and Technological Progress of China in 2019. Science and Technology 05: successful development of the geophysical optical fiber acquisition system in the uDAS well [EB/OL]. [2021-02-25]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2020/01/15/001759891.shtml>.  
2019 年中国石油十大科技进展——科技 05: uDAS 井中地球物理光纤采集系统研发成功 [EB/OL]. [2021-02-25]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2020/01/15/001759891.shtml>.
- [7] Yu G, Cai Z D, Chen Y Z, et al. Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline[J]. *The Leading Edge*, 2016, 35(7): 615-619.
- [8] Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2509.
- [9] Masoudi A, Pilgrim J A, Newson T P, et al. Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1352-1358.
- [10] Dong X H. Research on the submarine optical cable disturbance monitoring system based on  $\phi$ -OTDR technology[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2016(3): 32-33, 38.  
董向华. 基于  $\phi$ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统的研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2016(3): 32-33, 38.
- [11] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.  
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [12] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130005.  
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等.  $\Phi$ -OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130005.
- [13] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.  
蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.
- [14] Healey P, Malyon D J. OTDR in single-mode fibre at 1.5  $\mu\text{m}$  using heterodyne detection[J]. *Electronics Letters*, 1982, 18(20): 862-863.
- [15] Goldsmith A. *Wireless communications*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [16] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M]//Dainty J C. *Laser speckle and related phenomena*. Topics in applied physics. Heidelberg: Springer, 1975, 9: 9-75.
- [17] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, et al. Multimode random fiber laser for speckle-free imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(1): 1-6.
- [18] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 355-359.
- [19] Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(1): 30-32.
- [20] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y. Characteristics and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fibers and components[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(7): 982-987.
- [21] Hartog A H, Liokumovich L B, Ushakov N A, et al. The use of multi-frequency acquisition to significantly improve the quality of fibre-optic-distributed vibration sensing[J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(S1): 192-202.
- [22] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for  $\Phi$ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [23] Pang F F, He M T, Liu H H, et al. A fading-discrimination method for distributed vibration sensor using coherent detection of  $\Phi$ -OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(23): 2752-2755.
- [24] He X G, Zhang M, Xie S R, et al. Identification and observation of the phase fading effect in phase-sensitive OTDR[J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(3): 963-970.
- [25] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [26] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-

- 03-16.
- [27] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [28] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5866-5869.
- [29] Hartog A, Kader K. Distributed fiber optic sensor system with improved linearity: US9170149[P]. 2015-10-27.
- [30] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [31] Liu T G, Yu Z, Jiang J F, et al. Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070705.  
刘铁根, 于哲, 江俊峰, 等. 分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070705.
- [32] Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106004.  
张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106004.
- [33] Wang C, Shang Y, Zhao W A, et al. Distributed acoustic sensor using broadband weak FBG array for large temperature tolerance[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2796-2800.
- [34] Priest R G. Analysis of fiber interferometer utilizing 3×3 fiber coupler[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30(10): 1589-1591.
- [35] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [36] Song M P, Yin C, Lu Y, et al. Four-channel detecting phase demodulation  $\Phi$ -OTDR based on 3×3 Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0806001.  
宋牟平, 尹聪, 陆燕, 等. 基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调  $\Phi$ -OTDR[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0806001.
- [37] Yu Z H, Dai H L, Zhang M Y, et al. High stability and low harmonic distortion PGC demodulation technique for interferometric optical fiber sensors[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 8-13.
- [38] He X G, Xie S R, Liu F, et al. Multi-event waveform-retrieved distributed optical fiber acoustic sensor using dual-pulse heterodyne phase-sensitive OTDR[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 442-445.
- [39] Liang G H, Jiang J F, Liu K, et al. Phase demodulation method based on a dual-identical-chirped-pulse and weak fiber Bragg gratings for quasi-distributed acoustic sensing[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1093-1099.
- [40] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[C]// 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [41] Yang G Y, Fan X Y, Wang S, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-12.
- [42] Jiang F, Li H L, Zhang Z H, et al. Localization and discrimination of the perturbation signals in fiber distributed acoustic sensing systems using spatial average kurtosis[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2839.
- [43] Hartog A H, Liokumovich L B. Phase sensitive coherent OTDR with multi-frequency interrogation: US20130113629[P]. 2013-05-09.
- [44] Wang Z N, Zhang B, Xiong J, et al. Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6117-6124.
- [45] Jiang J L, Wang Z N, Wang Z T, et al. Coherent Kramers-Kronig receiver for  $\Phi$ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4799-4807.
- [46] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent  $\Phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853-858.
- [47] Fu Y, Xue N T, Wang Z N, et al. Impact of I/Q amplitude imbalance on coherent  $\Phi$ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1069-1075.
- [48] Xue N T, Fu Y, Lu C Y, et al. Characterization and compensation of phase offset in  $\Phi$ -OTDR with heterodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(23): 5481-5487.
- [49] Chen W J, Jiang J F, Liu K, et al. Coherent OTDR using flexible all-digital orthogonal phase code pulse for distributed sensing[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:



- 85395-85400.
- [50] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5648-5651.
- [51] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [52] Lin S T, Wang Z N, Xiong J, et al. Rayleigh fading suppression in one-dimensional optical scatters[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17125-17132.
- [53] Hartog A H. An introduction to distributed optical fibre sensors[M]. Boston: CRC Press, 2017.
- [54] Zhao W. The application of Jacobian determinant in the distribution density of continuous random variable function[J]. *New Education Era*, 2014, 12(17): 123-124. 赵薇. 雅克比行列式在连续型随机变量函数分布密度中的应用[J]. *新教育时代电子杂志(教师版)*, 2014, 12(17): 123-124.
- [55] Wu H, Shang C, Zhu K, et al. Vibration detection in distributed acoustic sensor with threshold-based technique: a statistical view and analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 6450: 3036450.
- [56] Eyal A, Gabai H, Shpatz I. Distributed acoustic sensing: how to make the best out of the Rayleigh-backscattered energy?[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103230I.
- [57] Gabai H, Shpatz I, Eyal A. Lumped Rayleigh reflectors[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4529-4532.
- [58] Shao L Y, Liu S Q, Bandyopadhyay S, et al. Data-driven distributed optical vibration sensors: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(12): 6224-6239.
- [59] Ren M Q, Lu P, Chen L, et al. Theoretical and experimental analysis of  $\Phi$ -OTDR based on polarization diversity detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 697-700.
- [60] Chen D, Liu Q W, Fan X Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 2037-2043.
- [61] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, et al. The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070707.
- [62] Gu J F, Lu B, Yang J Q, et al. Distributed acoustic sensing based on multi-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0706003. 顾金凤, 卢斌, 杨竣淇, 等. 多芯光纤分布式声传感 [J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0706003.
- [63] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. Fading reduction in a phase optical time-domain reflectometer with multimode sensitive fiber[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(9): 095101.
- [64] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, et al. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 842129.
- [65] Wang X, Lu B, Wang Z Y, et al. Interference-fading-free  $\Phi$ -OTDR based on differential phase shift pulsing technology[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 39-42.
- [66] He H J, Yan L S, Qian H, et al. Suppression of the interference fading in phase-sensitive OTDR with phase-shift transform[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(1): 295-302.
- [67] Healey P. Fading rates in coherent OTDR[J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(11): 443-444.
- [68] Mermelstein M D, Posey R, Johnson G A, et al. Rayleigh scattering optical frequency correlation in a single-mode optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(2): 58-60.
- [69] Lu L D, Song Y J, Zhu F, et al. Coherent optical time domain reflectometry using three frequency multiplexing probe[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1735-1739.
- [70] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a  $\Phi$ -OTDR with a multi-frequency source[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2947-2954.
- [71] Wang Z Y, Pan Z Q, Fang Z J, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [72] Yang S, Zou W W, Long X, et al. Pulse-compression optical time domain reflectometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 915736.
- [73] Zou W W, Yang S, Long X, et al. Optical pulse compression reflectometry: proposal and proof-of-concept experiment[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 512-522.
- [74] 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.

- [75] 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.
- [76] Mompó J J, Martín-López S, González-Herráez M, et al. Sidelobe apodization in optical pulse compression reflectometry for fiber optic distributed acoustic sensing[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1499-1502.
- [77] Xiong J, Jiang J L, Wu Y, et al. Chirped-pulse coherent-OTDR with predistortion[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(3): 034001.
- [78] Xiong J, Xie L L, Wang Z N. Optical pulse compression radar at double repetition rate with both positive and negative beat frequencies[C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 23-26, 2017, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [79] Chen D, Liu Q W, He Z Y. High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16138-16146.
- [80] Pastor-Graells J, Nuño J, Fernández-Ruiz M R, et al. Chirped-pulse phase-sensitive reflectometer assisted by first-order Raman amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4677-4683.
- [81] Fu Y, Wang Z N, Zhu R C, et al. Ultra-long-distance hybrid BOTDA/ $\Phi$ -OTDR[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 976.
- [82] Xiong J, Wang Z N, Wu Y, et al. Long-distance distributed acoustic sensing utilizing negative frequency band[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35844-35856.
- [83] Jiang J L, Wang Z N, Wang Z T, et al. Continuous chirped-wave phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 685-688.
- [84] Zhang J D, Wu H T, Zheng H, et al. 80 km fading free phase-sensitive reflectometry based on multi-carrier NLFM pulse without distributed amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4748-4754.
- [85] Martins H F, Shi K, Thomsen B C, et al. Code length limit in phase-sensitive OTDR using ultralong ( $>1$  M bits) pulse sequences due to fading induced by fiber optical path drifts[C]//2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), April 24-28, 2017, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [86] Mao Y, Guo N, Yu K L, et al. 1-cm-spatial-resolution Brillouin optical time-domain analysis based on bright pulse Brillouin gain and complementary code[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(6): 2243-2248.
- [87] Sun X Z, Yang Z S, Hong X B, et al. Genetic-optimised aperiodic code for distributed optical fibre sensors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5774.
- [88] Jiang P, Yan L S, Zhou Y, et al. Effect and elimination of polarization random noise in Golay-coded Brillouin optical time domain analysis fiber sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706002. 蒋朋, 闫连山, 周银, 等. 格雷编码布里渊光时域分析传感器中偏振随机噪声影响及其抑制方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0706002.
- [89] Lee D, Yoon H, Kim P, et al. Optimization of SNR improvement in the noncoherent OTDR based on simplex codes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 322-328.
- [90] Martins H F, Shi K, Thomsen B C, et al. Real time dynamic strain monitoring of optical links using the backreflection of live PSK data[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 22303-22318.
- [91] Shiloh L, Levanon N, Eyal A. Highly-sensitive distributed dynamic strain sensing via perfect periodic coherent codes[C]//Optical Fiber Sensors 2018, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: TuE25.
- [92] Zhang B, Wang Z N, Lin S T, et al. Linearization and pulse-coding of phase-sensitive OTDR for distributed acoustic sensing[C]//Optical Fiber Sensors 2018, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: TuE87.
- [93] Wu Y, Wang Z N, Xiong J, et al. Bipolar-coding  $\Phi$ -OTDR with interference fading elimination and frequency drift compensation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6121-6128.
- [94] Wu Y, Wang Z N, Xiong J, et al. Interference fading elimination with single rectangular pulse in  $\Phi$ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3381-3387.
- [95] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, et al. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9): 1142-1146.
- [96] Liehr S, Münzenberger S, Krebber K. Wavelength-scanning coherent OTDR for dynamic high strain resolution sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10573-10588.
- [97] Pastor-Graells J, Martins H F, Garcia-Ruiz A, et al.

- Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13121-13133.
- [98] Nuño J, Martins H F, Martin-Lopez S, et al. Distributed sensors assisted by modulated first-order Raman amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(1): 328-335.
- [99] Ma Z, Jiang J F, Wang S, et al. Phase drift noise suppression for coherent-OTDR sensing based on heterogeneous dual-sideband LFM pulse[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(8): 082002.
- [100] Chen D, Liu Q W, Wang Y F, et al. Fiber-optic distributed acoustic sensor based on a chirped pulse and a non-matched filter[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29415-29424.
- [101] Xiong J, Wang Z N, Wu Y, et al. Single-shot COTDR using sub-chirped-pulse extraction algorithm for distributed strain sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 2028-2036.
- [102] Xiong J, Wang Z N, Jiang J L, et al. High sensitivity and large measurable range distributed acoustic sensing with Rayleigh-enhanced fiber[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2569-2572.