

文章编号: 1001-3806(2021)04-0436-05

## 复合光纤对 $\varphi$ -OTDR 振动传感远程敏感

王振伟, 孔勇\*, 丁伟, 吴虎, 李欢

(上海工程技术大学 电子电气工程学院 电子信息工程系, 上海 201620)

**摘要:** 为了避免在高功率脉冲下产生光纤非线性效应和前端振动不敏感, 采用了一种复合光纤的新型光纤传感结构方法, 进行了理论分析和实验验证。使用多模光纤与单模光纤的混合作为传感光纤的方法, 通过处理不同功率脉冲下的传感信号, 取得了光纤传感的距离数据, 并针对多模光纤在喇曼系统的传感作用, 对其传感特性进行了讨论。结果表明, 该新型复合光纤传感结构可探测 30km 处的振动信号。此研究为多模光纤在相位敏感光时域传感领域的科学研究和工程应用提供了参考。

**关键词:** 光纤光学; 振动检测; 远程敏感; 多模光纤

**中图分类号:** TP212.4<sup>+</sup>4; TN247

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.04.005

## Composite optical fiber bring about remote sensitive to vibration of $\varphi$ -OTDR

WANG Zhenwei, KONG Yong, DING Wei, WU Hu, LI Hua

(Department of Electronic and Information Engineering, College of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to avoid the nonlinear effect of the optical fiber and the insensitivity of the front-end vibration under the high power pulse, a new fiber sensing structure method of composite fiber was adopted, which was analyzed theoretically and verified experimentally. By using the hybrid of multi-mode fiber and single-mode fiber as the sensing fiber method, the distance data of the optical fiber sensing was obtained by processing the sensing signals under different power pulses. The results show that the new composite optical fiber sensor structure can detect the vibration signal of 30km. At the same time, the sensing function of multi-mode fiber in Raman system was further studied, and the sensing characteristics of multi-mode fiber were discussed. The new sensor structure provides an important reference for the scientific research and engineering application of the multimode fiber in the field of phase-sensitive optical time-domain sensing.

**Key words:** fiber optics; vibration measurement; remote sensitive; multi-mode fiber

### 引言

相位敏感光时域反射仪 (phase-sensitive optical time-domain reflectometer,  $\varphi$ -OTDR) 技术与其它传感技术相比, 具有探测距离远、灵敏度高、响应速度快等优点, 因此被广泛应用在周界安防、油气管道监测、轨道交通检测等众多领域<sup>[1-2]</sup>。随着  $\varphi$ -OTDR 传感技术的进一步发展, 研究者对其感测距离、空间分辨率、信噪比、频率响应范围、识别入侵类型等方面进行深入研究<sup>[3]</sup>。同时, 研究者还将瑞利背向散射、喇曼放大、双

波长、马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 等技术相结合实现一些特定的功能。2014年, PENG 教授等人提出喇曼放大与  $\varphi$ -OTDR 系统结合, 实现了 128km 传感距离, 其空间分辨率为 15m<sup>[4]</sup>。2019年, WU 等人通过相位噪声补偿技术, 实现远程分布式振动传感<sup>[5]</sup>。研究人员在  $\varphi$ -OTDR 系统配置保偏光纤, 其空间分辨率可达 1m<sup>[6]</sup>。MZI 与  $\varphi$ -OTDR 结合极大提高了对低频信号的测量范围<sup>[7]</sup>。LU 等人于 2010 年提出使用移动平均和小波去噪探测  $\varphi$ -OTDR 系统中大于 1kHz 的信号, 定位精度小于 5m<sup>[8]</sup>。使用窄带宽激光器传感系统的激光噪声比较低, 传感性能更好, 可以获取更高的信噪比<sup>[9]</sup>。2019年, ZABIHI 等人提出使用 3 种不同探测频率的  $\varphi$ -OTDR 传感器抑制连续衰落引发的失真, 抑制效果为 11.5%<sup>[10]</sup>。2019年, 南京大学的 YUAN 等人使用 MZI 补偿  $\varphi$ -OTDR 中

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目 (19ZR1421700)

作者简介: 王振伟 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: kky7757@aliyun.com

收稿日期: 2020-08-24; 收到修改稿日期: 2020-10-21

的激光频率,用于校正主信号的相位,6km的传感光纤上可以测得频率为0.1Hz的振动,空间分辨率为10m<sup>[11]</sup>。在识别干扰入侵方面,基于模式识别的 $\varphi$ -OTDR是该领域的新热点,北京交通大学WANG等人使用随机森林分类器识别出 $\varphi$ -OTDR系统中的外界干扰信号<sup>[12]</sup>,例如浇水、敲击、攀爬、按压等多种信号,平均识别率为95%。

目前,基于多模光纤为传感介质的光纤传感器也有着广泛的应用空间,主要通过模间串扰产生相干,依据输出散射的图案,对扰动前后斑点图案的变化进行应变测量和定位<sup>[13-14]</sup>。使用多模光纤为敏感元件的分布式声学 and 温度测量系统,以瑞利信号测量振动信息、喇曼测量温度信号,实现了同时进行分布式声学和温度测量<sup>[15]</sup>。2020年,MARKIEWICZ等人提出了在多模光纤中使用单模操作的相干时域询问新技术<sup>[16]</sup>。与单模光纤相比多模光纤有更高的非线性阈值水平以及更强的散射捕获率,射入高功率探测脉冲不会引起调制不稳定,但是多模光纤模式之间存在串扰,导致传输距离不远。

本文中提出 $\varphi$ -OTDR传感系统配置多模光纤与单模光纤相结合为传感介质,前一段传感介质为多模光纤,然后通过模式转换器连接单模光纤。这种传感结构既避免高功率探测脉冲直接流入单模光纤造成调制不稳定,避免了探测前端有一段不敏感区域,同时也避免了只使用多模光纤造成传输距离不远。这种创新的传感结构可以实现远距离监测,且保证检测距离远程敏感。

## 1 $\varphi$ -OTDR 传感原理与理论分析

基于 $\varphi$ -OTDR系统相干检测的原理为瑞利相干散射的光时域反射技术。 $\varphi$ -OTDR的光源为窄线宽激光器, $\varphi$ -OTDR的传感系统与常规OTDR传感系统相比有多种优势,例如具有高灵敏度、长距离测量等等。在传感系统中,窄线宽激光器发出连续的光波经过声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)调制成脉冲波,在通过掺铒光纤放大器(Er-doped fiber amplifier, EDFA)放大,经衰减器适当调节后,具有高相干的光脉冲序列进入环行器流入传感光纤作为光信号。探测器收到光信号将其转换为电信号后,通过采集卡进行数据采集,最后在工控机上进行数据处理。

当一个脉冲周期内,光纤上无扰动时,后向相干瑞利散射光的响应模型为1-D脉冲,但是在多个脉冲周期内,用 $\varphi$ -OTDR系统探测到的后向瑞利散射光的振

幅 $e(t)$ 来表达<sup>[17]</sup>:

$$e(t) = \sum_{i=1}^N A_i \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_i}{n_f}\right) \times \exp[i2\pi f(t - \tau_i)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{W}\right) \quad (1)$$

式中, $e(t)$ 为散射光的振幅; $t$ 表示脉冲光在光纤中的传感时间; $f$ 为脉冲光频率; $W$ 为宽度; $\alpha$ 为光纤损耗, $A_i (i=1,2,3\cdots)$ 为入射光在第 $i$ 个散射中心产生的脉冲光的振幅大小; $\tau_i$ 为散射的时间延长; $N$ 表示传感光纤中散射点的总数; $c$ 是光在真空中的速度; $n_f$ 表示折射率。当 $[(t - \tau_i)/W] \leq 1$ 时,矩形函数 $\text{rect}[(t - \tau_i)/W] = 1$ ;在其它条件下,矩形函数为0。当光纤受到外界振动干扰时,瑞利散射的背向光可分为两部分:其中一部分为光纤首端和扰动点之前的散射点,没有被扰动点干扰,光相位不变化;另一部分来自光纤末端与扰动点之间的散射点,受扰动点的影响,光相位发生变化。两部分散射光的表达式分别为<sup>[18]</sup>:

$$E_a = A_a \exp(i\varphi_a) = E_0 \cdot \sum_{k=m}^p [\exp(-2\alpha z_k)] r_k \exp(i\varphi_k) \quad (2)$$

$$E_b = A_b \exp[i\varphi_b + \varphi(t)] = E_0 \cdot \sum_{k=p}^n \exp[-2\alpha z_k] r_k \exp\{i[\varphi_k + \varphi(t)]\} \quad (3)$$

式中, $E_a$ 和 $A_a$ 分别为扰动前的散射光强和幅度值, $E_b$ 和 $A_b$ 分别为扰动后的散射光强和幅度值, $E_0$ 为首端探测脉冲光幅值, $\varphi_a$ 和 $\varphi_b$ 分别是在扰动前某一点的散射光相位和扰动后某一散射点相位, $z_k$ 为光纤中第 $k$ 个散射点距离光纤首端的距离,第 $p$ 个散射点为扰动发生位置, $r_k$ 和 $\varphi_k$ 分别为第 $k$ 个散射点的散射系数和散射光相位, $\varphi(t)$ 为扰动引起的光相位变化。

总背向瑞利散射光强 $E(t)$ 为:

$$E(t) = E_a + E_b = A_a \exp(i\varphi_a) + A_b \exp[i\varphi_b + i\varphi(t)] \quad (4)$$

总功率 $P(t)$ 为:

$$P(t) = A_a^2 + A_b^2 + 2A_a A_b \cos[\varphi(t) + \varphi_a - \varphi_b] \quad (5)$$

扰动发生时会引起瑞利散射迹线的变化,通过扰动前后瑞利散射迹线的差分计算,可获得扰动点的位置。

本实验中提出了一种新颖的 $\varphi$ -OTDR结构,如图1所示。分布反馈式激光器(distributed feedback laser, DFB)是窄线宽激光器,其线宽为3kHz,波长1550nm;AOM是声光调制器,调制带宽100MHz,上升沿为30ns;

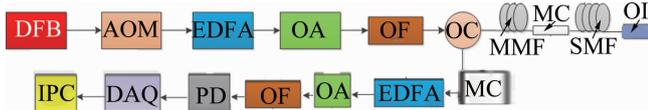


Fig. 1 Composite optical fiber structure diagram of  $\varphi$ -OTDR

EDFA 是  $\text{Er}^{3+}$  的光纤放大器,放大增益为 25dB,光衰减器(optical attenuator, OA)调节输出脉冲功率;光滤波器(optical filter, OF)是采用 0.8mm 信道间隔的波分复用滤波器;光环行器(optical circulator, OC)为多模光环行器;传感的光纤为多模光纤与单模光纤的复合,中间通过模式转换器(mode converter, MC)连接;光纤的尾端加上光隔离器(optical isolator, OI),从环行器 3 号端口输出的多模信号再经过模式转换器转为单模信号。返回的单模瑞利散射信号由光电探测器(photoelectric detection, PD)进行光电转换;数据采集卡(data acquisition card, DAQ)采集频率为 20MHz;在工控机(industrial personal computer, IPC)上处理数据。图中,MMF(multi-mode fiber)为多模光纤,SMF(single-mode fiber)为单模光纤。

如系统结构图所示,探测距离为 5km 的多模光纤与 25km 的单模光纤,中间使用模式转换器连接,与传统仅使用单模光纤为传感介质的  $\varphi$ -OTDR 系统相比,本实验中结构可以使用更高的探测脉冲功率,而不会产生不敏感区域,可以完成 30km 左右范围内的监测。

## 2 实验

### 2.1 实验程序

本实验中在工控机中的 LabVIEW 中处理从采集卡中获取的数据,为了匹配传感系统的参量,在 LabVIEW 中设置了采集长度、平均累加次数、内触发宽度、内触发周期、触发方式等控件。在软件的输出控件设计了两个显示控件:一个用来分析时域内实时的功率随时间的变化情况;另一个显示控件基于两次差值来显示扰动位置信息,将扰动前后背向瑞利散射的迹线进行差值计算以确定扰动的位置信息。实时采集图与两次差值图的采样率为 20MHz,相当于每 5m 采一个点,采样总点数设为 6000,相当于 30km 的传感光纤长度,选择外触发方式,以平均累加 32 次用于数据处理,可以有效减少外界噪声,提高信噪比。在实验过程中,用手指轻轻拨动光纤来获取扰动的振动信号。

### 2.2 实验结果

首先对传统的单模光纤进行检测,使用一盘 10km,一盘 20km 的单模光纤连接成 30km 的传感距

离。由于探测距离越长,检测到的功率呈指数形式衰减。且在高功率脉冲下,前端出现一段不敏感的区域。实验结果如图 2 所示。

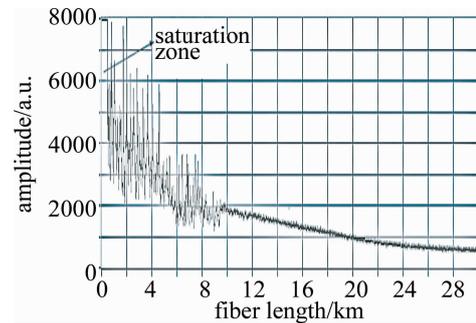


Fig. 2 Relationship between typical time-domain values and output power

背向瑞利散射随着传输距离的不断增加,功率就越来越小,探测的灵敏度逐渐地减弱。正常情况下,有效探测距离不超过 20km。因此传统的  $\varphi$ -OTDR 的最大探测距离只有 20km 左右。如果增大探测脉冲的峰值功率,可以增加探测距离,但是会产生调制不稳定现象,造成传感系统的非线性效应,影响测量精度。如果探测功率进一步提高,可能会产生受激布里渊效应。这些因素将严重影响传感系统的灵敏度与信噪比。

在同样的功率脉冲下,使用多模光纤混合单模光纤的新型结构进行探测,将 5km 的多模光纤与 25km 的单模光纤作为传感介质,探测距离的前端没有不敏感的区域。新型结构的复合光纤输出波形如图 3 所示。

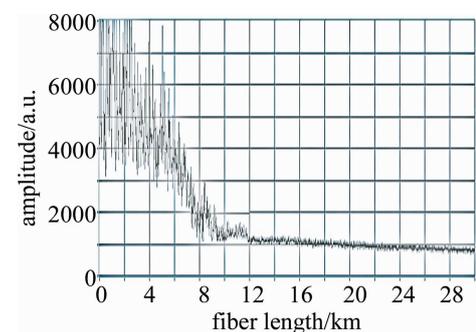


Fig. 3 Relationship between time-domain value and output power under composite fiber

使用 5km 的多模光纤与 25km 的单模光纤相结合作为传感介质。探测脉冲经过多模光纤再流向单模光纤。由于多模有更高的非线性阈值水平,可以使用更高能量的探测脉冲,从而产生更强的反向散射信号,有效增加了探测距离,并且不会降低信噪比。在 LabVIEW 上对扰动前后信号进行差值运算,得出振动信号曲线,如图 4 与图 5 所示,分别为低功率探测脉冲与高功率探测脉冲下振动信号。

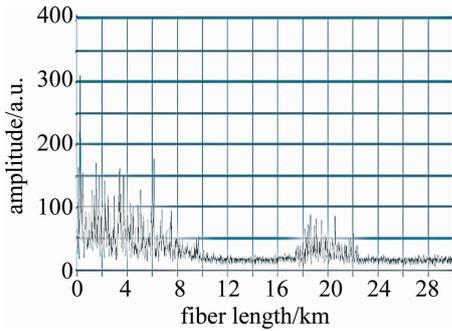


Fig. 4 Effective range of detection in multi mode-single mode under low power pulse

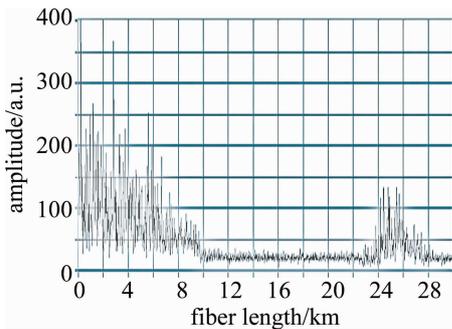


Fig. 5 Effective range of detection in multi mod-single mode fiber under high power pulse

图 4 和图 5 中分别显示了在低功率和高功率下,轻轻拨动单模光纤的中间一段,扰动信号在光纤中响应。图 4 中振动信号的响应十分微弱,信噪比较低,已不能准确辨识振动信号,说明光纤传感在功率为 120mW 的低功率探测脉冲下探测距离为 20km 左右已经不太敏感了。图 5 中振动信号的响应十分明显,信噪比较高,可以明显辨识振动信号,说明光纤传感在功率为 240mW 的高功率探测脉冲下探测距离已经达到了 30km。同时从图 4 和图 5 中的实验结果可以看出,光纤传感的前端有较高噪声,这是由于多模光纤模式之间存在串扰,模式之间的转换也会有一定信号转换噪声。

轻轻拨动多模光纤,振动响应非常明显,灵敏度较高。无论是在低功率脉冲还是在高功率脉冲下,多模

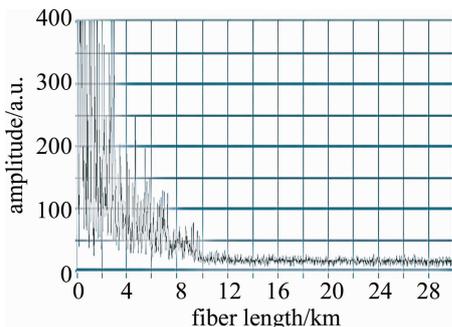


Fig. 6 Vibration response of multi-mode fiber in the sensing system

光纤的振动曲线都表现出明显的变化,实验现象如图 6 所示。

### 3 分析与讨论

在实验中发现多模光纤明显比单模光纤的振动响应明显,尽管多模光纤与单模光纤具有相同的材料特性,但是多模光纤却比单模光纤高出近一个数量级的捕获效率。通过研究多模光纤的捕获率和模式耦合,进一步探索多模光纤的特性。在多模光纤中,以基本模式传播的入射光和由固定模式  $(\nu, \mu)$  捕获的散射光的功率分数由下式<sup>[19]</sup>给出:

$$B_{\nu, \mu} = \frac{6q_{\nu} \pi^2 \Delta}{V} \int_0^{\infty} F_{0,0}(\rho)^2 F_{\nu, \mu}(\rho)^2 d\rho \quad (6)$$

式中,  $\rho$  为径向变量,  $\mu$  和  $\nu$  分别表示径向与方位角,  $V$  是归一化的频率,  $\Delta = (n_0^2 - n_1^2)/(2n_0^2)$ , 其中  $n_0$  和  $n_1$  分别是纤芯与包层的折射率,  $F_{0,0}(\rho)$  表示基本模式,  $F_{\nu, \mu}(\rho)$  表示径向和方位角分布  $(\nu, \mu)$  的固定模式。在这个表达式中引入  $q_{\nu}$  以区分径向模式和方位模式:

$$q_{\nu} = \begin{cases} 2, (\nu = 0) \\ 1, (\nu \neq 0) \end{cases} \quad (7)$$

当  $\nu \neq 0$  时,  $q_{\nu}$  获值为 1, 它对应于方位角模式; 当  $\nu = 0$  时,  $q_{\nu}$  获值为 2, 它对应于径向模式。将信号发射到多模光纤的基本模式, 则散射光纤会耦合到光纤中的所有允许的模式。目前已经确定高阶模式有良好的瑞利背向散射光, 并且每个模式中的散射光独立传播且没有明显的交叉耦合。所以与单模光纤传感的背向散射光相比, 多模光纤传感的背向散射光更强, 振动响应也就更明显。另外, 多模光纤有解决信号衰落的可能。在多模光纤传感过程中有多种模式, 有一种模式的瑞利背向散射光衰落, 但仍然有许多其它模式可以完成执行测量任务。

基于单模光纤的喇曼分布式温度测量的喇曼效应不明显, 而使用多模光纤与喇曼结合用于分布式温度测量可以表现出良好的灵敏度。光纤喇曼分布式温度传感系统依靠接收光纤的斯托克斯与反斯托克斯喇曼背向散射光, 但是喇曼信号一般比较弱(比输入抽运功率弱 60dB ~ 70dB)。为了喇曼温度测量系统有良好的信噪比, 就需要传感光纤获取更高的发射功率, 而多模光纤恰好有较高的非线性阈值与较大的有效面积接收入射功率。多模光纤支持较高的入射抽运功率, 而不会改变感测系统的性能, 所以, 喇曼分布式温度测量使用多模光纤作为传感介质是合适的。

由于多模光纤比单模光纤的成本低, 在短距离的

光纤传感系统中,多模光纤更常用。全世界已经有数千个油井中安装的多模光纤,并用于各种情况的监测,例如振动检测、温度测量、应力监测等等。多模光纤有多种模式,为实现多种信号同时感测提供了可能,如果实现安装一套传感系统可以监测多种参量信息,则将具有更好的成本效益。后面将进一步研究基于复合光纤实现分布式温度与振动同时测量。

#### 4 结 论

提出了利用复合光纤  $\varphi$ -OTDR 系统,实现探测距离的远程敏感,理论分析与实验结果研究表明,该系统解决了由高功率脉冲造成的传感系统的前端区域振动不敏感和传感系统的调制不稳定,实现了传感光纤对全程范围内的振动信号有良好的响应灵敏度。与在不同功率下需要使用开关切换两段光纤实现分段测量相比,本文中的传感系统不仅结构简单,而且非常方便地实现了远程测量。接下来将对已获得的振动信号采用滤波去噪等算法,进一步提高系统信噪比与系统的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] TIAN Q, YANG D, ZHANG Y, *et al.* Detection and recognition of mechanical, digging and vehicle signals in the optical fiber pre-warning system[J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 191-200.
- [2] JIAN C Z, YANG Zh, HONG X X, *et al.* Pipeline leak detection technology based on distributed optical fiber acoustic sensing system [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 30789-30796.
- [3] ROMAIN Z S, XIN L, YU W, *et al.* Recent progress in the performance enhancement of phase-sensitive OTDR vibration sensing systems[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1709-1718.
- [4] PENG F, WU H, JIA X H, *et al.* Ultra-long high-sensitivity U-OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [5] WU M S, FAN X Y, LIU Q W, *et al.* Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system based on pulse compression technique and phase-noise compensation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5969-5972.
- [6] CHEN Q, LIU T, LIU K, *et al.* An elimination method of polarization-induced phase shift and fading in dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(19): 3135-3141.
- [7] QIAN H, TAO Zh. All fiber distributed vibration sensing using modulated time-difference pulses[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, 25(20): 1955-1957.
- [8] LU Y, ZHU T, CHENG L, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [9] XU G, HE Ch Ch, ZHANG L, *et al.* Research of positioning technology of Mach-Zehnder interferometer[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(2): 195-200 (in Chinese).
- [10] 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.
- [11] YUAN X, WANG F, LIU T, *et al.* Using an auxiliary Mach-Zehnder interferometer to compensate for the influence of laser-frequency-drift in  $\Phi$ -OTDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-9.
- [12] WANG X, LIU Y, LIANG Sh, *et al.* Event identification based on random forest classifier for  $\Phi$ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 31(97): 319-325.
- [13] KOTOV O, CHAPALO I, PETOR A, *et al.* Distributed interference multimode fiber sensor with disturbances localization ability [J]. *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, 2018, 67(45): 257-260.
- [14] KE T, MENG Zh, GERALD F, *et al.* Highly sensitive strain sensor based on composite interference established within S-tapered multimode fiber structure [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33982-33992.
- [15] MAO Y, ASHRY I, HVEDING F, *et al.* Simultaneous distributed acoustic and temperature sensing using a multimode fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(4): 1-7.
- [16] MARKIEWIEZ K, KACZOROWSKI J, YANG Z, *et al.* Frequency scanned phase sensitive optical time-domain reflectometry interrogation in multimode optical fibers[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(3): 031302.
- [17] SHENG Y, YANG Y H, WANG C, *et al.* Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. *Measurement*, 2016, 79: 222-227.
- [18] LI Q, ZHANG C, LI L, *et al.* Localization mechanisms and location methods of the disturbance sensor based on phase-sensitive OTDR [J]. *Optik*, 2014, 125(9): 2099-2103.
- [19] MA B, OI K, AH H, *et al.* Rayleigh backscattering from the fundamental mode in step-index multimode optical fibers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 354-364.