

# 基于 $3 \times 3$ 迈克耳孙干涉仪的四路检测 相位解调 $\phi$ -OTDR

宋牟平\*\*, 尹聪\*, 陆燕, 朱伟基, 吴熈, 庄守望

浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 相位敏感光时域反射计( $\phi$ -OTDR)中使用相干性较好的窄线宽光源,因传感光纤中光脉冲产生的散射光发生干涉,故可利用干涉光的变化检测外界扰动,检测灵敏度较高。但传统的幅度检测  $\phi$ -OTDR 的结果难以实现定量检测,需要进行相位解调。基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的相位解调系统是一种较好的解调方案,但直接解调的结果存在空间分辨能力小于传统幅度检测  $\phi$ -OTDR 的问题。采用四路检测方法保持  $\phi$ -OTDR 的空间分辨能力,只需在系统结构中增加一路检测。同时考虑到窄线宽光源产生的脉冲内干涉对解调造成的不利影响,在提出四路检测相位解调  $\phi$ -OTDR 的基础上,从瑞利后向散射光的角度对基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的相位解调  $\phi$ -OTDR 进行分析,并通过实验进行验证。完成了对 5 km 传感光纤上扰动信号的定量检测,检测线性度为 0.9956,解调相位的幅度达到 31.85 rad,解调系统的空间分辨率与传统的幅度检测  $\phi$ -OTDR 相同。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤传感; 相位敏感光时域反射计; 相位解调; 定量检测; 四路检测

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0806001

## Four-Channel Detecting Phase Demodulation $\phi$ -OTDR Based on $3 \times 3$ Michelson Interferometer

Song Muping\*\*, Yin Cong\*, Lu Yan, Zhu Weiji, Wu Ying, Zhuang Shouwang

College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Phase-sensitive optical time domain reflectometry ( $\phi$ -OTDR) uses narrow line-width laser with high coherence. In the sensing fiber, scattered lights from optical pulse interfere, and the interference light is highly sensitive to external disturbance. But the traditional amplitude-detection  $\phi$ -OTDR is not quantitative detection, so that phase demodulation is necessary. Phase demodulation system based on  $3 \times 3$  Michelson interferometer is cost-effective, but is of lower spatial resolution than the traditional amplitude-detection  $\phi$ -OTDR. We propose a four-channel detection method to preserve the same spatial resolution as amplitude-detection  $\phi$ -OTDR by adding only one detection channel. But the interference of scattered lights may have critical influence to phase demodulation. A four-channel detection system of phase demodulation  $\phi$ -OTDR is analyzed based on  $3 \times 3$  Michelson interferometer, from the aspect of Rayleigh backscattering light. The experiment shows that the disturbance around the fiber is detected quantitatively, with a linearity of 0.9956, phase sensing range of 31.85 rad, and the spatial resolution is same as that of amplitude-demodulation  $\phi$ -OTDR.

**Key words** fiber optics; distributed optical fiber sensing; phase-sensitive optical time domain reflectometry; phase demodulation; quantitative detection; four-channel detecting

**OCIS codes** 060.2300; 060.2370; 060.4080

## 1 引 言

近年来,分布式光纤传感技术被认为具有广泛的应用前景,尤其是在国防、管道监测、大型结构监测等方面<sup>[1]</sup>。相位敏感光时域反射计( $\phi$ -OTDR)因其灵敏度较高、动态范围大、能够进行多点同时检测

等优点而受到广大研究人员的关注<sup>[2]</sup>。目前,人们在提高  $\phi$ -OTDR 传感距离、空间分辨率以及信噪比等方面进行了深入研究,同时结合光纤光栅等辅助手段改良其性能,为  $\phi$ -OTDR 的实际应用做出了诸多努力<sup>[3-5]</sup>。 $\phi$ -OTDR 利用高相干窄线宽激光器为光源,传感光纤中光脉冲产生的后向散射光相互干

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-02-07; 录用日期: 2018-03-28

\* E-mail: yincong19920311@qq.com; \*\* E-mail: songmp@zju.edu.cn

涉,利用干涉光的变化对外界扰动进行检测,具有很高的灵敏度。

传统的  $\phi$ -OTDR 是基于后向瑞利散射光幅度检测的分布式光纤传感器,但扰动引起散射光的幅度变化与扰动的强弱不是线性关系,因此难以对扰动进行定量检测<sup>[6-7]</sup>。同时幅度检测在扰动较强时还会产生谐波,影响对外界扰动情况的正常判断。而散射光的相位与扰动的强弱变化呈线性关系,因此相位解调可以对扰动进行定量测量。已有的外差检测方法通过使用频率漂移很小的激光器进行散射光与本征光的相干检测,从而实现相位解调<sup>[8]</sup>;零差检测方法通过散射光的自相干进行解调,包括相位生成载波方法及  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的方法<sup>[9-10]</sup>;也有很多研究针对各种检测方法的解调算法进行改进,以减小解调过程带来的误差以及失真<sup>[11]</sup>。国内的王毅等<sup>[12]</sup>引进并研究了基于  $3 \times 3$  耦合器的解调方法,指出了该方法的优势与应用价值。基于  $3 \times 3$  耦合器的迈克耳孙干涉仪,能够对光纤上两处散射光的相位差进行解调,从而实现传感光纤上扰动情况的检测。该方法所用设备结构简单,成本较低,但由于解调相位是光纤上两处散射光的相位差,需要进一步处理解调结果才能保持原有的空间分辨率。

本文提出基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调  $\phi$ -OTDR,在保持  $\phi$ -OTDR 系统空间分辨率和灵敏度的同时,能够对扰动进行定量检测。然后从散射光的角度推导分析脉冲内干涉现象对解调结果的影响,通过实验对分析结果进行验证。分析了干涉仪非平衡长度对系统性能的影响,并选取适当的非平衡长度实现了对 5 km 光纤上扰动的定量检测。

## 2 原 理

基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调  $\phi$ -OTDR 传感原理如图 1 所示,通过对光纤上两个相隔一定距离的后向散射光的相位差进行解调来定量扰动,并通过直接检测散射光来对扰动进行空间定位。当有扰动存在时,在扰动位置的散射光幅度会发生变化,扰动位置及其后向散射光相位也会发生变化,从而引起扰动前后散射光的相位差变化,同时检测出幅度变化和相位差即可得到扰动的相关信息。

### 2.1 光脉冲内散射光

$\phi$ -OTDR 中光脉冲在传感光纤中传播发生散射,其中后向散射光携带着光纤上的扰动带来的幅

度和相位变化等信息,被探测器接收。散射模型可以用图 2 表示。

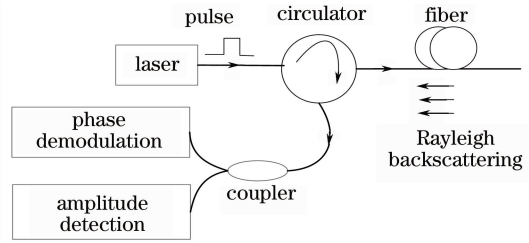


图 1 基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调  $\phi$ -OTDR 传感原理

Fig. 1 Sensing principle of four-channel detecting phase demodulation  $\phi$ -OTDR based on  $3 \times 3$  Michelson interferometer

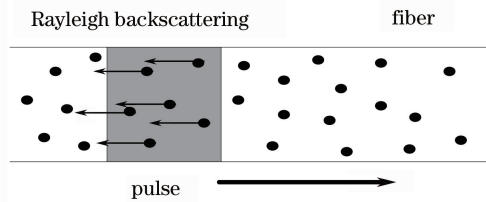


图 2 光脉冲散射模型

Fig. 2 Scattering model of optical pulse

光脉冲产生的后向散射光相遇时发生干涉,干涉后的光场可以表示为

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n E_i \exp(j\phi_i) = E \exp(j\phi), \quad (1)$$

式中:  $n$  为脉冲内散射单元个数;  $E_i$  和  $\phi_i$  为第  $i$  个散射点的幅度和相位;  $E$  和  $\phi$  为干涉后的幅度和相位。当有扰动作用于光纤时,  $E$  和  $\phi$  都会随扰动的变化而变化,  $\phi$ -OTDR 幅度检测就是检测扰动引起的  $E$  的变化。

### 2.2 散射光相位差解调

基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的相位解调  $\phi$ -OTDR 是对光纤上相隔一定距离的两个后向散射光之间的相位差进行解调,简化模型如图 3 所示。

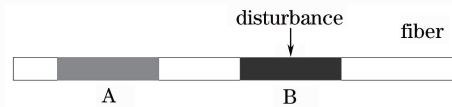


图 3 相位差模型

Fig. 3 Model of phase difference

根据(1)式,没有扰动时脉冲在 A、B 两处的后向散射光进入  $3 \times 3$  耦合器时的光场可以表示为

$$\mathbf{E}_A = E_{A0} \exp(j\phi_A), \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_B = E_{B0} \exp(j\phi_B), \quad (3)$$

干涉后从  $3 \times 3$  耦合器输出,最终探测器检测到的三路信号可以表示为

$$E_1 = M + N \cos \phi_0, \quad (4)$$

$$E_2 = M + N \cos \left( \phi_0 + \frac{2}{3} \pi \right), \quad (5)$$

$$E_3 = M + N \cos \left( \phi_0 - \frac{2}{3} \pi \right), \quad (6)$$

其中:

$$M = \frac{1}{3} \lambda (E_{A0}^2 + E_{B0}^2), \quad (7)$$

$$N = \lambda E_{A0} E_{B0}, \quad (8)$$

$$\phi_0 = (\phi_B - \phi_A), \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为探测器响应系数;  $E_{A0}$  和  $E_{B0}$  为 A、B 两处散射光的初始光场幅度;  $\phi_A$  和  $\phi_B$  为 A、B 两处散射光的相位; 通过差分-交叉相乘的解调方法得到相位  $\phi_0$ , 即为 A、B 两处散射光的相位差。解调框图如图 4 所示<sup>[12]</sup>, 相对于反三角函数解调方法来说, 这种解调方法的优点是即使相位跳变也可以准确解调。

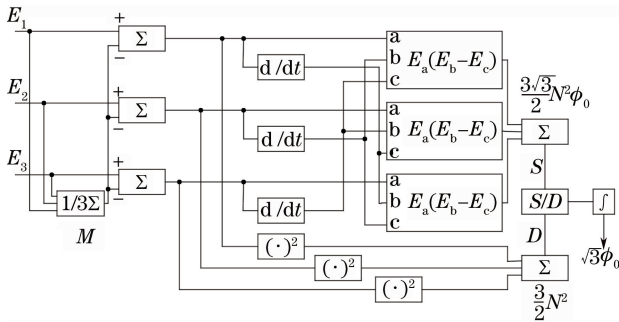


图 4 解调原理图

Fig. 4 Diagram of demodulation principle

当光纤上有扰动作用时, 假设 A 处未受到扰动作用, B 处在扰动影响下散射光场变为

$$E'_B = E'_{B0} \exp(j\phi'_B). \quad (10)$$

此时,  $M$ 、 $N$  和  $\phi_0$  均发生变化, 其中参数  $M$  的变化与散射光幅度检测的变化是一致的,  $\phi_0$  则与扰动强弱呈线性关系。在相位解调过程中,  $N$  作为与相位无关的量需要被消去。由于脉冲内的干涉效应,  $N$  在某些位置很小, 作为分母会放大噪声对解调结果的影响, 导致解调相位失真。

当非平衡长度较长时, 在 A 处的散射光未受到扰动影响前, B 处的散射光受到扰动影响且待相位完全发生变化后, 这一段范围内两处散射光的相位差同时变化, 即可以解调得到连续稳定的相位差。增大非平衡长度的方法使采集到的信号受到扰动影响的区域增加, 降低了系统的空间分辨率, 可以通过增加一路直接检测对扰动进行定位, 免去采用数据处理手段来保持系统的空间分辨率。但过长的非平衡长度也没有必要, 可以选取适当的非平衡长度, 使

一定范围内解调结果不完全失真, 就可以确定扰动引起的相位变化量。由于脉冲产生的散射光幅度沿距离的分布是具有接近但不完全一致的周期性的瑞利分布, 对于实际  $\phi$ -OTDR 系统来说, 可以选取信号平均衰落周期加脉冲长度作为干涉仪非平衡长度, 即

$$l = l_p + l_0, \quad (11)$$

式中:  $l$  为干涉臂非平衡长度;  $l_p$  为脉冲长度;  $l_0$  为  $\phi$ -OTDR 一个平均衰落周期, 可通过统计  $\phi$ -OTDR 曲线衰落周期的平均值来获得<sup>[13]</sup>。

### 3 四路检测系统

基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调系统如图 5 所示。激光从中心波长为 1550 nm、线宽为 2 kHz 的激光器发出, 经过声光调制器 (AOM) 调制成光脉冲, 再经掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大, 通过环形器进入光纤。后向散射光经环形器进入分光比为 1:1 的耦合器, 分出的一路进入由  $3 \times 3$  耦合器与法拉第旋转镜 (FRM) 构成的迈克耳孙干涉仪, 另一路直接被光电探测器 (PD) 接收。四路检测系统中 PD1、PD2、PD3 接收的信号用于相位解调, PD4 接收的信号用于对扰动进行定位。实验中使用直径为 6 cm 的压电陶瓷 (PZT) 作用于待测光纤 (FUT) 产生扰动信号。

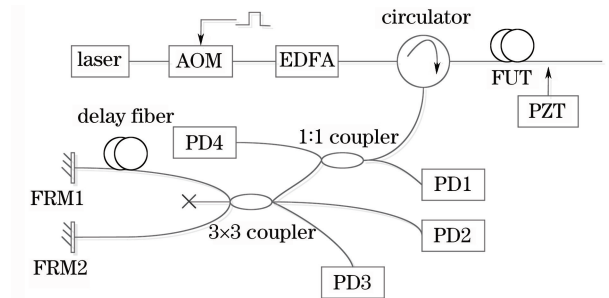


图 5 四路检测相位解调系统

Fig. 5 Four-channel detecting phase demodulation system

### 4 实验结果与分析

首先对系统进行验证, 然后在不同干涉仪非平衡长度下进行解调, 比较解调结果, 最后选取合适的非平衡长度在 5 km 光纤末端对 PZT 扰动信号的强弱进行定量检测。实验中采用 100 Hz 的正弦信号对 PZT 进行驱动, 脉冲的宽度为 100 ns, 重复频率为 12 kHz。

#### 4.1 结果验证

将 PZT 放在距光纤起始端 42 m 的位置, PZT 的驱动电压为  $2V_{pp}$  ( $V_{pp}$  为驱动电压的峰值电压), 光

纤绕制长度为 12 m。取 5 km 长度光纤的散射光幅度进行统计,得到  $\phi$ -OTDR 衰落的平均周期。计算得平均衰落周期约为 6 m。根据(11)式选取干涉仪非平衡长度为 16 m,对应散射光的光程差为 32 m,使得进行干涉的两个位置的散射光分开一定距离。

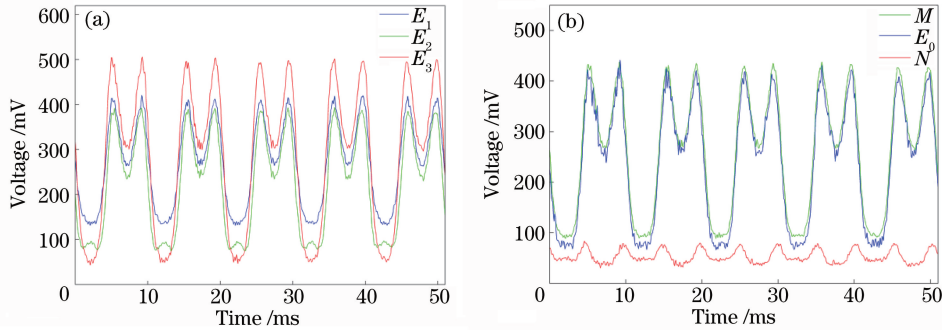


图 6 (a) 56 m 处单点采集的三路信号  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ ; (b) 计算得到的  $M$ 、 $N$  与  $E_0$  的对比

Fig. 6 (a) Acquired three-channel signals  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  at 56 m; (b) comparison of  $E_0$  and calculated  $M$ ,  $N$

#### 4.2 不同非平衡长度的解调结果及 $\phi$ -OTDR 定位

将 PZT 置于光纤起始处,此处干涉衰落位置的信号仍然较大,解调失真较少以便于分析规律。在  $2 V_{pp}$  的 PZT 驱动电压下,干涉仪非平衡长度分别设置为 20, 30, 40, 50 m,对 PZT 扰动进行解调,并用  $\phi$ -OTDR 幅度检测进行扰动定位。光纤始端相位解调的结果如图 7 所示,可以清晰地看到 PZT 引起的相位变化。其中 20 m 非平衡长度下解调得到连续且稳定相位差的范围约为 22 m。30, 40, 50 m

取扰动区域上单点的信号进行分析,采集得到该点的干涉仪输出信号随时间的变化如图 6(a)所示。计算得到的  $M$ 、 $N$  以及该点的  $\phi$ -OTDR 幅度检测的信号  $E_0$  如图 6(b)所示,从图中可以看出  $M$ 、 $N$  的值随时间改变,其中  $M$  与  $E_0$  变化一致。

非平衡长度对应的范围分别约为 32, 42, 52 m。对应关系为

$$l_\phi = l - l_p + l_{PZT}, \quad (12)$$

式中: $l_\phi$  为解调连续稳定相位的范围; $l_{PZT}$  为 PZT 作用光纤长度。从图 7(b)、(c)中可以看出仍有一小段解调结果受到脉冲内干涉的影响,产生失真。因此要选取合适的干涉仪非平衡长度,使得进行干涉的两处散射光的距离略大于信号的平均衰落周期,以便对解调结果进行定量分析。

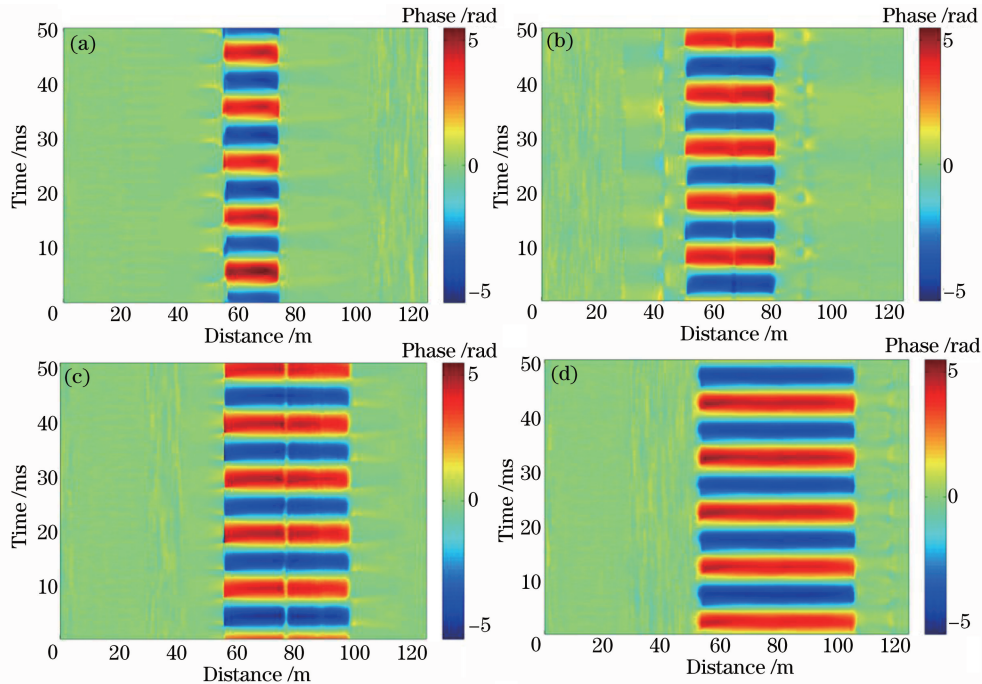


图 7 非平衡长度分别为(a) 20 m, (b) 30 m, (c) 40 m, (d) 50 m 下的解调结果

Fig. 7 Demodulation results under the unbalanced length of (a) 20 m, (b) 30 m, (c) 40 m, (d) 50 m

图 8 为光纤始端处 PD4 的散射光幅度检测结果去均值后得到的信号,可以看到振动的起点和终点,且不受干涉仪非平衡长度影响。故可以通过四路检测的相位解调系统,在保留  $\phi$ -OTDR 的定位精度的同时对扰动的强弱进行定量检测。

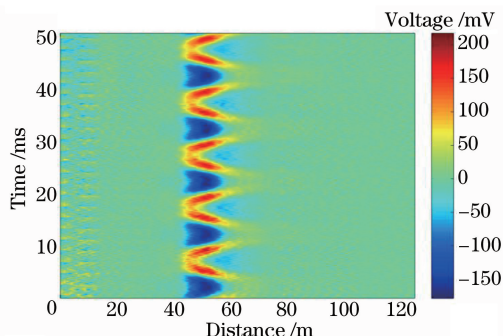


图 8 幅度检测去均值后的信号

Fig. 8 Mean-subtracted signal of amplitude detection

#### 4.3 5 km 传感光纤末端定量测量结果

将 PZT 置于 5 km 传感光纤末端,采用 16 m 非平衡长度,对不同驱动电压下的 PZT 信号进行了解调,结果如图 9 所示。可以看到解调相位的幅度与 PZT 驱动电压呈线性关系,线性度  $R^2 = 0.9956$ ,可测量最大相位幅度达到 31.85 rad。

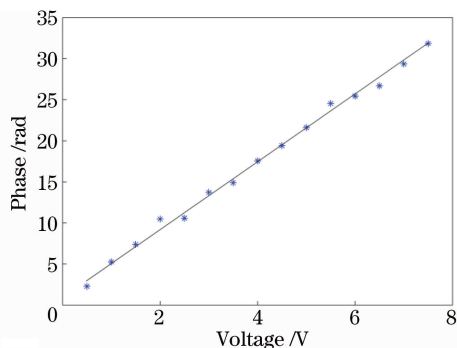


图 9 解调相位与 PZT 驱动电压的关系

Fig. 9 Relationship between demodulated phase and driven voltage of PZT

## 5 结 论

为了保持基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的相位解调  $\phi$ -OTDR 的空间分辨率,提出了四路检测的系统,同时考虑到高相干窄线宽光源给相位解调带来的影响。从散射光的角度对四路检测相位解调  $\phi$ -OTDR 的原理进行分析,并结合实验进行验证。通过分析干涉仪非平衡长度对解调性能的影响,指出了选取适当非平衡长度的重要性,并在合适的非平衡长度下实现了 5 km 末端扰动的定量检测,检测线性度为 0.9956,解调相位幅度达到 31.85 rad,同

时解调系统保持了传统  $\phi$ -OTDR 的空间分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] Yu K, Zhang Y S, Guan L, *et al.* Structural state detection with twisted type fiber optic sensing array and OTDR technology[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(11): 1530-1535.  
郁可, 张永胜, 管立, 等. 基于光时域反射技术与缠绕式光纤传感阵列的结构状态监测方法[J]. 光学学报, 1999, 19(11): 1530-1535.
- [2] Juarez J C, Taylor H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1968-1971.
- [3] Peng F, Wu H, Jia X H, *et al.* Ultra-long high-sensitivity  $\phi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [4] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light  $\phi$ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.  
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的  $\phi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
- [5] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, *et al.* Distributed vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210001.  
刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210001.
- [6] Shatalin S V, Treschikov V N, Rogers A J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing[J]. Applied Optics, 1998, 37(24): 5600-5604.
- [7] Parker T, Shatalin S, Farhadiroushan M, *et al.* Distributed acoustic sensing: a new tool for seismic applications[J]. First Break, 2014, 32(2010): 61-69.
- [8] 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.
- [9] Fang G S, Xu T W, Feng S W, *et al.* Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [10] Cao Y L, Yang F, Xu D, *et al.* Disturbed fiber vibration sensor based on  $3 \times 3$  Michelson

- interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010001.
- 曹玉龙, 杨飞, 徐丹, 等. 基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的分布式光纤振动传感器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1010001.
- [11] Wang X, Liu M H, Yu M, *et al.* Analysis and improvement for digital quadrature demodulation algorithm on phase-sensitive optical time-domain reflectometric system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1210002.
- 王旭, 刘珉含, 于淼, 等. 相位敏感光时域反射系统数字正交解调算法分析及改进研究[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1210002.
- [12] Jiang Y, Lou Y M, Wang H W. Software demodulation for  $3 \times 3$  coupler based fiber optic interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(2): 152-155.
- 江毅, 娄英明, 王惠文. 基于对称  $3 \times 3$  耦合器的光纤干涉信号的软件解调技术[J]. 光子学报, 1998, 27(2): 152-155.
- [13] Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 30-32.