

分布式光纤振动和温度双物理量传感系统

潘亮, 刘琨, 江俊峰, 马春宇, 马鹏飞, 刘铁根

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 提出了一种分布式光纤振动和温度传感系统。该系统在双马赫-曾德尔干涉仪分布式振动传感系统的框架上,采用波分复用的方法在一条传感臂上耦合两种波长的光,并行实现了基于激光干涉的分布式光纤振动传感和基于拉曼背向散射的分布式温度传感,从而达到了振动和温度双物理量的同时探测。该方法有效利用了双马赫-曾德尔干涉仪的传感光纤,在实验中实现了 10 km 长度上振动和温度双物理量的同时探测,振动传感的定位误差为 ± 30 m,温度传感的空间分辨率和温度精度分别为 1 m 和 ± 1.8 °C。该系统的优点是将激光干涉和拉曼背向散射有效结合,实现了复杂环境中对振动和温度同时探测的需求,并有效利用了传感光纤,具有重要的实际意义和经济价值。

关键词 传感器; 传感光纤; 多参量; 振动探测; 温度测量

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0110002

Distributed Fiber-Optic Vibration and Temperature Sensing System

Pan Liang, Liu Kun, Jiang Junfeng, Ma Chunyu, Ma Pengfei, Liu Tiegeng

College of Precision Instrument & Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract We propose a distributed fiber-optic vibration and temperature sensing system. The proposed system can obtain coupled light of two wavelengths on one sensing arm based on the structure of the dual Mach-Zehnder interferometer by employing the wavelength division multiplexing technique. The implement scheme can achieve the parallel detection of distributed fiber-optic vibration sensing based on laser interference and distributed temperature sensing based on Raman backscattering, thus the simultaneous detection of vibration and temperature is realized. The method effectively uses the sensing fiber-optic based on the dual Mach-Zehnder interferometer and realizes simultaneous detection of vibration and temperature at a distance of 10 km in the experiment. The positioning error of vibration sensing is ± 30 m. The spatial resolution and temperature error of temperature sensing are 1 m and ± 1.8 °C, respectively. The advantage of the system is to combine laser interference with Raman backscattering effectively and realize simultaneous detection of vibration and temperature under the complicated condition. In addition, the proposed system effectively uses sensing fiber-optic and has great practical and economic value.

Key words sensors; sensing fiber-optic; multi-parameter; vibration detection; temperature measurement

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 060.4230; 120.7280; 120.6780

1 引 言

分布式传感光纤具有抗电磁干扰、不带电、耐腐蚀、耐高温和成本低等独特的优势,越来越广泛地应用于生产和生活的各个领域^[1-4]。研究人员对温度信息和振动信号的探测极为关注,特别是在一些重

要的基础设施中,分布式传感光纤的振动探测可以对裂缝进行有效检测^[5-6],而温度变化与裂缝的产生联系紧密。此外,温度信息还可以对大型建筑的火灾进行预警和检测^[7-8]。

在现有的分布式振动传感技术方面,主要有基于相位敏感的光时域反射仪的分布式振动传感技

收稿日期: 2017-05-18; 收到修改稿日期: 2017-07-17

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)

作者简介: 潘亮(1988—),男,博士研究生,主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: anderson.p.l@msn.com

导师简介: 刘铁根(1955—),男,博士生导师,教授,主要从事光纤传感和光电检测方面的研究。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn(通信联系人)

术^[9]和基于双马赫-曾德尔干涉仪的分布式振动传感技术^[10-12]。前者具有单光纤和多点探测的优点,但定位精度和灵敏度低;后者具有定位精度高和灵敏度高的优点,但只能单点探测^[13-14]。在分布式温度传感技术方面,主要有基于布里渊散射的分布式温度传感技术^[15-16]和基于拉曼散射的分布式温度传感技术^[17]。前者的温度分辨率高,定位精度高,但受到应变的交叉敏感影响较大^[18-19];后者的稳定性高,结构简单,成本低^[17]。目前,基于光频域反射技术可以实现单系统下对振动、温度、电流和磁场的分别探测,但受到交叉敏感问题的限制,还无法实现多物理量的同时探测^[20-23]。

本文提出了一种分布式光纤振动和温度双物理量传感系统。该系统基于双马赫-曾德尔干涉仪分布式振动传感系统的框架,在一条传感臂上通过波分复用的方法,耦合两种波长的光,并行实现了基于激光干涉的分布式光纤振动传感和基于拉曼背向散射的分布式温度传感,从而达到了振动和温度双物理量同时探测的目的。

2 基本原理

提出的分布式光纤振动和温度传感系统结构示意图如图 1 所示。该系统在双马赫-曾德尔干涉仪的基础上,利用其干涉臂中的一路,采用波分复用技术使其复合进行分布式温度传感。其中,由激光器

1 发出的窄线宽连续光束在 C1 处被 3 dB 光耦合器分束;分束后的两束连续光分别经过光环形器 C2 和 C3 后进入到光耦合器 C4 和 C5,并再次被分束,然后从顺时针和逆时针两个方向进入到干涉仪传感臂中。如图 1 所示,在双马赫-曾德尔干涉仪红色传感臂的一端加入了 1:99 的光耦合器 C6(双波长窗口耦合器),该耦合器 99% 的两端分别与光耦合器 C4 和 C5 相接组成传感臂,与耦合器 C4 相邻的 1% 的一端则与光隔离器 I 相接,光隔离器 I 的另一端与脉冲激光器 2 相接。该光路设计使得激光器 1 顺时针方向的连续光和激光器 2 的脉冲光都能以 99% 的功率入射到红色传感光纤中,激光器 1 在逆时针方向上的连续光也能以 99% 的功率与另一路连续光在光耦合器 C4 处进行干涉,使得顺时针和逆时针两个方向上的干涉对比度都尽可能不受影响。在光耦合器 C6 右侧接入波分复用器(WDM),该 WDM 在逆时针方向上将激光器 2 在光路上产生的两路拉曼散射光分别反射并传送给光电耦合器 PD3 和 PD4,而激光器 1 发出的另一波长的光则不受波分复用器的影响。在光耦合器 C4 和 C5 干涉后的连续光分别经过光环形器 C2 和 C3,然后传送到光电探测器 PD1 和 PD2 中。所有的光电探测器将转换后的电信号传送给数据采集卡(DAQ),再送至 IPC 工控机进行解调和显示处理。

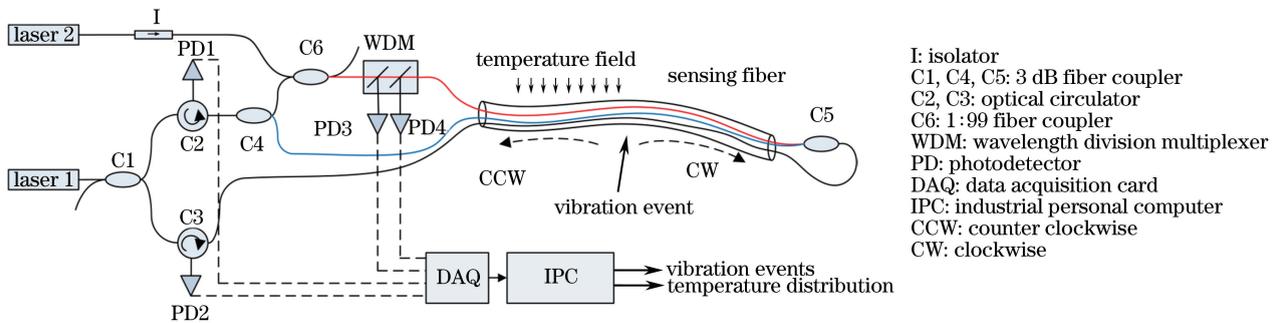


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of proposed system

对于分布式振动传感,假设在传感臂的某一点 P 处发生了振动事件,在顺时针和逆时针方向上干涉的两路光就会产生时延:

$$\tau = n(L - 2x)/c, \quad (1)$$

式中 n 为光纤基模的有效折射率, L 为干涉臂的长度, x 为振动事件发生的位置, c 为真空中的光速。在理想情况下,经过光电探测器 PD3 和 PD4 转换后的电信号可以表示为

$$\begin{cases} I_1(t) = \frac{1}{4} I_0 \{ (1 + 0.99) + 2 \cdot \sqrt{0.99} \cdot \cos[\phi(t)] \} \approx \frac{1}{2} I_0 \{ 1 + \cos[\phi(t)] \} \\ I_2(t) = \frac{1}{4} I_0 \{ (1 + 0.99) + 2 \cdot \sqrt{0.99} \cdot \cos[\phi(t - \tau)] \} \approx \frac{1}{2} I_0 \{ 1 + \cos[\phi(t - \tau)] \} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\phi(t)$ 为干涉仪两臂上产生的相位调制差, I_0 为激光器 1 的出射光功率, t 为采集时间。这样时延 τ 就可以通过对(2)式进行时延估计计算得到。通过(2)式可以看出, 该光路设计对干涉信号的影响可以忽略不计。

对于分布式温度传感, 由激光器 2 产生的反斯托克斯和斯托克斯散射光强 I_{as} 和 I_s 在温度 T 下的表达式为

$$\begin{cases} I_{as}(T) = K_{as} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot \Delta\nu}{k \cdot T}\right) - 1} \\ I_s(T) = K_s \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot \Delta\nu}{k \cdot T}\right) - 1} + 1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 T 为温度, K_{as} 和 K_s 分别为与界面有关的散射光系数, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, $\Delta\nu$ 为光纤中的拉曼频移。常用的解调方法是采用反斯托克斯散射光和斯托克斯散射光的比值法, 其比值 $R[T(z)]$ 可以表示为

$$R[T(z)] = \frac{K_{as}}{K_s} \cdot \exp\left[\frac{h \cdot \Delta\nu}{k \cdot T(z)}\right] \cdot \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_{as}(u) - \alpha_s(u)] \cdot du\right\} \quad (4)$$

式中 α_{as} 和 α_s 分别为散射光在传感光纤中的损耗系数, z 为传感光纤上各点与光电探测器的距离。通过在不同温度下对系统进行标定可以求出温度 T 的曲线, 进而实现对温度的分布式传感。

在该系统的光路设计中, 激光器 1 发出的连续光功率较低, 产生的拉曼散射光功率相比激光器 2 产生的拉曼散射光功率小得多, 并且激光器 1 和激光器 2 的波长不同, 这使得由激光器 1 产生的拉曼散射光在经过波分复用器时被过滤掉, 无法进入到光电探测器, 因此, 激光器 1 对拉曼温度信号采集的影响可以忽略。同时, 激光器 2 的脉冲光与激光器 1 的连续光在耦合器 C5 处不会产生干涉现象, 并且由于耦合器 C5 采用与激光器 1 同波长的窗口参数, 可以有效衰减激光器 2 的光强, 不会对系统造成后续影响。

3 实验结果

根据上述理论基础搭建了系统, 并用实验验证该系统的有效性。实验设置与图 1 所示的系统框架一致。其中, 激光器 1 采用线宽为 50 kHz、功率为 10 mW 的分布式反馈激光器, 中心波长在

1310 nm 附近。激光器 2 采用高功率脉冲激光器, 其脉冲宽度为 10 ns, 重复频率为 10 kHz, 中心波长在 1550 nm 附近, 出射光峰值功率被限制在 5 W, 以避免光纤中的非线性效应, 即受激拉曼散射。WDM 的两路反射波长分别在 1451 nm 和 1665 nm 附近。耦合器 C6 采用 1310 nm/1550 nm 双窗口 1:99 耦合器, 其余耦合器和环形器均采用 1310 nm 窗口器件。光隔离器 I 用于防止反向光进入到激光器 2 中。PD1 和 PD2 均采用低噪声、高频率带宽积的光电探测器, 而 PD3 和 PD4 则采用高灵敏度的雪崩光电探测器 (APD)。数据采集卡采用两路 10 MSa/s 采样率和两路 100 MSa/s 采用率的四通道同步采集卡, 采样精度为 12 bit。其中, 两路 100 MSa/s 的采集通道附带硬件累加功能。测试光纤采用单模光纤, 传感臂长度为 10.024 km。

在传统的基于双马赫-曾德尔干涉仪的分布式振动传感系统中, 影响干涉信号信噪比的主要噪声来源于反方向的连续光所产生的背向瑞利散射。经过测量, 由窄带宽连续光激光器 1 发出的光功率实测为 11.57 mW, 在耦合器 C5 处测得顺时针方向的两干涉传感臂光功率为 0.82 mW 和 1.05 mW, 比背向瑞利散射光强大很多, 再经归一化处理后依然能有效实现高信噪比的干涉信号。逆时针方向的干涉信号同理。

在实验过程中, 选取距离初始位置 349 m 附近的位置进行同一个点的重复性敲击测试。在进行振动传感的同时, 在超净间内使用温箱对传感光缆顺时针方向末端的三段光纤进行加热处理, 具体位置为 9301~9401 m 处、9570~9572 m 处和 9574~9576 m 处, 温箱加热温度为 49 °C, 超净间温度恒定在 24 °C。

分布式振动传感实验共记录了 500 组数据。图 2(a) 展示了一组由光电探测器 PD1 和 PD2 检测到的一组典型的振动信号, 图 2(b) 展示了对 500 组干涉信号进行时间延迟估计 (TDE) 计算后得到的定位分布图。图 3 展示了一组典型振动的干涉信号频谱, 可以看出, 敲击光缆所产生的干涉信号频率主要分布在 0~20 kHz。

对图 2(b) 中的 500 组定位结果进行数据分析, 可以得到表 1 所示的定位误差。

在分布式温度传感探测中, 相比于传统的基于拉曼散射的分布式温度传感, 该系统在激光器和波分复用器之间多了一个 1:99 的耦合器。在进行实

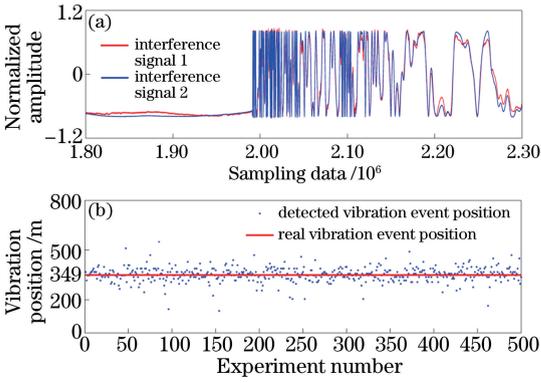


图 2 分布式振动传感实验结果。(a)发生振动事件时 PD1 和 PD2 探测到的两路干涉信号波形;

(b) 500 组振动事件的定位分布

Fig. 2 Experimental results of distributed vibration sensing.

(a) Interference signals detected by PD1 and PD2 with vibration event;

(b) vibration positions of 500 sets of vibration events

验前,将脉冲激光器的峰值功率调节在临近发生受激拉曼散射的阈值下,实现了自发拉曼散射光的光强最大化。温度的测量与分布式振动传感同时进行,实验条件如前所述,在对 349 m 处光缆进行敲击的同时进行探测。该系统通过波分复用器对波长在 1451 nm 和 1665 nm 附近的背向拉曼散射光进

表 1 定位精度统计

Table 1 Positioning accuracy statistics

Position error /m	$[-10, 10]$	$[-30, -10] \cup [10, 30]$	$[-50, -30] \cup [30, 50]$	$(-\infty, -50) \cup [50, +\infty)$
Percentage /%	66.2	15.4	9.6	8.8

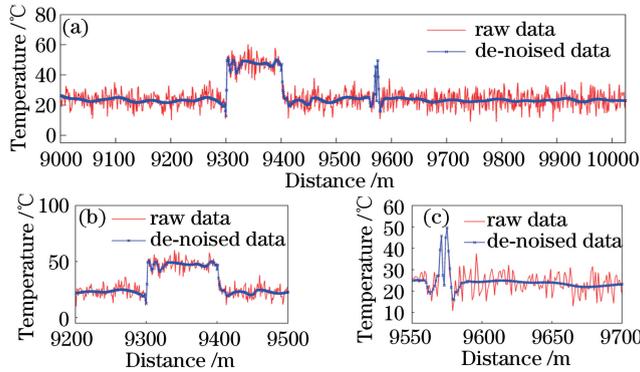


图 4 温度曲线。(a) 10.024 km 传感光纤末端加热实验温度曲线;(b) 9200~9500 m 区间的温度曲线;

(c) 9550~9700 m 区间的温度曲线

Fig. 4 Temperature curves. (a) Temperature curves at the end of the 10.024 km fiber; (b) temperature curves between 9200 m and 9500 m; (c) temperature curves between 9550 m and 9700 m

表 2 分布式温度传感的传感噪声分析

Table 2 Sensing noise analysis of distributed temperature sensing

Position /km	Signal-to-noise ratio /dB	Root-mean-square error / $^{\circ}\text{C}$
0-1	27.12	1.3
9-10	22.98	1.8

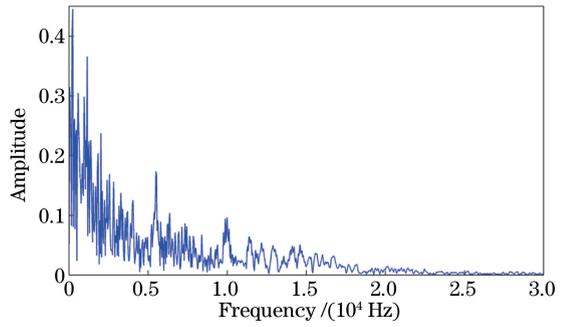


图 3 干涉信号的频谱图

Fig. 3 Spectrogram of interference signal

行滤波,然后采用雪崩光电探测器 PD3 和 PD4 进行探测并转换为电信号,最终经 100 MSa/s 的采样卡采集并进行 8000 次的累加平均后,送上位机进行去噪处理。去噪算法采用基于经验模态分解的方法,该方法能有效抑制拉曼散射信号中的白噪声^[24]。图 4 展示了实验中采集得到的一组原始温度曲线和去噪后的温度曲线。由于传感光缆都位于超净间内,并严格控制在 24 $^{\circ}\text{C}$ 的室温环境中,所以假设传感光缆的实际温度和加热温度分别为 24 $^{\circ}\text{C}$ 和 49 $^{\circ}\text{C}$,据此可计算出分布式温度传感的信噪比和传感精度,如表 2 所示。

4 分析与讨论

在分布式振动和温度传感实验中同时对振动事件和温度进行了探测。由于该系统采用的是波分复用的方法,并利用了双马赫-曾德尔干涉仪的结构,

在其中一条传感臂上融合了基于拉曼散射的分布式温度传感,所以振动信号和温度信号是不同波长的光,通过波分复用器将不同波长的光区分出来,再分别送入不同的光电探测器进行振动和温度的分别解调。其中,振动的干涉信号由光电探测器 PD1 和 PD2 进行探测,而用于温度探测的拉曼散射光则由光电探测器 PD3 和 PD4 进行探测。

图 2(a)给出的干涉信号表示该系统对振动信号的采集,与(2)式展示的理论一致。对于振动源的定位,采用了 TDE 时延估计算法,根据(1)、(2)式对两路干涉信号进行互相关运算^[25],就可以计算出振动的具体位置。进行了 500 组振动实验,采用敲击光缆的方式来模仿振动,敲击位置在传感光缆的 349 m 处。典型的干涉波形如图 2(a)所示,两路干涉信号的波形与(2)式表达的理论一致,并且两路干涉信号的相位一致,能有效地进行精确定位。通过对 500 组实验数据进行时延估计,得到了定位距离分布,如图 2(b)所示,定位距离基本分布在实际敲击点附近,定位误差的数据统计结果如表 1 所示。其中,66.2%的定位距离在 10 m 以内,81.6%的定位距离在 30 m 以内,所以该系统的定位误差在 ±30 m 内。通过以上实验结果可以看出,该系统在进行分布式振动传感时,并未受到另一波长脉冲激光器和传感光缆温度变化的影响。

图 4(a)展示了光线末端的温度变化曲线;图 4(b)展示了 9301~9401 m 区间内,光纤从室温加热至 49 °C 的温度曲线;图 4(c)展示了 9570~9572 m 和 9574~9576 m 两段光纤在温箱内同时被加热至 49 °C 时,该系统的温度空间分辨率为 1 m。根据传感光纤所处环境温度的理论值,可以计算出传感光纤在前端和末端测量得到的温度信噪比和均方根误差,具体数值如表 2 所示。综合图 4 和表 2 可以得出该系统的空间分辨率为 1 m,温度精度为 1.8 °C,测量结果并未受到敲击的影响。

5 结 论

根据以上对振动信号和温度信号的同步探测实验结果的分析可以得出,所提分布式振动和温度传感系统是有效的,该系统能够有效利用双马赫-曾德尔干涉仪的结构,实现互不干扰的振动和温度双物理量的同时探测。与传感器的简单叠加不同,该系统能充分利用光纤资源,降低传感系统的成本,将多物理量传感的解调、显示、报警等软件系统高度集成,能更有效地实现检测和预防。目前,该方案只实

现了振动和温度的同时传感,下一步工作的方向是实现更多物理量的同时传感。

参 考 文 献

- [1] Bao X, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [2] Kersey A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, 2(3): 291-317.
- [3] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, *et al.* Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on rayleigh scattering effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0700002.
张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0700002.
- [4] Liu K, Feng B W, Liu T G, *et al.* Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0505006
刘琨, 冯博文, 刘铁根, 等. 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0505006.
- [5] Tsuda H, Koo J H, Kishi T. Detection of simulated acoustic emission with Michelson interferometric fiber-optic sensors [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(1): 55-56.
- [6] Liang S, Zhang C, Lin W, *et al.* Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission sensor for large structure health monitoring [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(12): 1858-1860.
- [7] Toccifondo I, Nannipieri T, Signorini A, *et al.* Raman distributed temperature sensing at CERN [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20): 2182-2185.
- [8] Fernandez A F, Rodeghiero P, Brichard B, *et al.* Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(6): 2689-2694.
- [9] Lu Y, 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.
- [10] Zhou Y, Jin S, Qu Z. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage protection [C]. *SPIE*, 2006, 6344: 634435.
- [11] Brown G A, Hartog A H. Optical fiber sensors in upstream oil & gas [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2002, 54(11): 63-65.

- [12] Tarlor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847 [P]. 1993-03-16.
- [13] 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.
- [14] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, *et al.* Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [15] Bao X, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [16] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. Optics Letters, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [17] Bolognini G, Hartog A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 678-688.
- [18] Chen K, Zhou X, Yang B, *et al.* A hybrid fiber-optic sensing system for down-hole pressure and distributed temperature measurements [J]. Optics and Laser Technology, 2015, 73: 82-87.
- [19] Smith J, Brown A, DeMerchant M, *et al.* Simultaneous distributed strain and temperature measurement[J]. Applied Optics, 1999, 38(25): 5372-5377.
- [20] Du Y, Liu T, Ding Z, *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.
- [21] Du Y, Liu T, Ding Z, *et al.* Cryogenic temperature measurement using rayleigh backscattering spectra shift by OFDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1150-1153.
- [22] Liu T, Du Y, Ding Z, *et al.* 40 km OFDR-based distributed disturbance optical fiber sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 771-774.
- [23] Ding Z, Du Y, Liu T, *et al.* Distributed optical fiber current sensor based on magnetostriction in OFDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(19): 2055-2058.
- [24] Boudraa A O, Cexus J C, Saidi Z. EMD-based signal noise reduction [J]. International Journal of Signal Processing, 2013, 1(1): 33-37.
- [25] Bian P, Jia B, Wu Y, *et al.* Fiber optic line-based sensor employing time delay estimation for disturbance detection and location [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(5): 1032-1037.