

# 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感

刘 琨 冯博文 刘铁根 江俊峰 杜 阳

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津大学光纤传感研究所, 天津 300072

**摘要** 在各类大型基础设施的安全检测过程中,应变作为一项重要的参数需要重点检测。为了准确测量一定范围内应变分布,提出了基于光频域反射技术(OFDR)的光纤连续分布式定位应变测量传感方法。这种方案根据瑞利散射光谱移动的原理,采用距离域移动窗互相关的光谱漂移解调算法来获取连续分布式的应变参量。实验结果表明,这种方法可以对100 m范围内光纤所受应变的大小及其分布位置进行稳定而有效的传感,系统空间定位分辨率为20 cm,相较于其他传感方式,这种方法既实现了对应变的定量检测,同时也获取了应变的空间分布信息,实现了应变的定位功能。

**关键词** 光纤光学; 光纤分布式传感; 光频域反射; 应变

图书分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0505006

## Continuous Distributed Fiber Strain Location Sensing Based on Optical Frequency Domain Reflectometry

Liu Kun Feng Bowen Liu Tiegen Jiang Junfeng Du Yang

*Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** In the process of the safety text of the large infrastructure, strain is an important parameter which needs to be mainly detected. In order to measure the distribution of strain accurately, a method which is a continuous distributed fiber strain measurement sensing based on optical frequency domain reflectometry (OFDR) is presented. The method is on the basis of the principle of wavelength shifts of Rayleigh scattering and a demodulation algorithm of wavelength shift based on the movement window cross-correlation in spatial domain is used to gain the information of continuous distributed strain. The experimental results show that it can realize stable and effective strain sensing including the size and position in a range of 100 m whose sensing resolution can reach 20 cm. Compared with other sensing methods, it not only can text the strain quantificationally, gain the spatial information of the strain distribution, but also achieve a function of strain location.

**Key words** fiber optics; distributed optical fiber sensing; optical frequency domain reflectometry; strain

**OCIS codes** 060.2370; 060.2430; 120.3180; 140.3600

## 1 引 言

应力是材料在受到外力作用或温度变化时内部所产生的一种作用力<sup>[1]</sup>。应力虽然不能直接测量,但可以通过对应变的测量间接测得<sup>[2]</sup>。传统的应变测量多为机械化的测量,但这种测量方式容易受到测量长度、电磁干扰、接触测量等客观因素的影响,使之在桥梁、管道、油井等大型基础设施的应用上受到了很大的限制。20世纪70年代以来,随着光纤传感技术的发展,应变测量的应用领域逐步从机械化测量转变到光学测量。分布式光纤传感技术凭借其重量轻、长距离、分布式监测、便于构成智能型网络等独特的优越性,在应

收稿日期: 2014-12-03; 收到修改稿日期: 2015-01-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(61475114, 61108070, 61227011, 61378043)、国家973计划(2010CB327806)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200, 13JCYBJC16100)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、深圳市科技创新委员会“光纤传感关键技术”(JCYJ20120831153904083)

**作者简介:** 刘 琨(1981—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感和光电检测方面的研究。E-mail: beiyangkl@tju.edu.cn

变测量领域中得到了越来越多的应用<sup>[3-5]</sup>。

常用的分布式光纤应变传感检测技术中,主要包括采用光纤布拉格光栅(FBG)复用测量技术、布里渊时域反射技术(BOTDR)及光频域反射技术(OFDR)。其中,分布式FBG复用测量技术应用凭借高测量精度得到了较为广泛的应用,当前这种复用型FBG对微应变的检测可以达到 $0.6 \mu\epsilon$ <sup>[6]</sup>,但由于每个传感单元上的FBG都要占用一定的光谱范围,导致单根光纤可以复用的FBG数量受到限制,无法实现较长距离的连续分布式测量及定位<sup>[7]</sup>;利用BOTDR技术虽然克服了测试距离较短的问题,使其测试距离达到了25 km,但无法同时保证系统灵敏度和系统的空间分辨率,其系统的空间分辨率仅为200 m,同时其应变传感精度也只有 $65 \mu\epsilon$ <sup>[8]</sup>,难以满足人们对高灵敏度及高精度的传感要求;而在1981年由Eickhoff等<sup>[9]</sup>提出的OFDR技术理论上不但兼有上述诸多传感方式的优势,而且能够弥补各自在传感方面的缺陷。OFDR技术的空间分辨率与频谱分析精度有关,与探测器带宽无关,故其有较高的空间分辨率;此外,由于OFDR采用了相干探测技术,使其灵敏度也比OTDR有很大提升<sup>[10]</sup>。

正是由于利用OFDR技术检测应变时具有空间分辨率高和测量距离长的优势,因此在1998年,Froggatt等<sup>[11]</sup>提出了利用瑞利散射光谱移动的方法实现温度和应变的测量,使OFDR在分布式传感领域有了更为广泛的应用。但这种方法在测量的过程中必须首先知道应变发生的大概位置,然后才能有效地测量应变的大小,因此其使用范围受到了限制。为了使系统能够同时具有应变的定位及检测功能,实现分布式连续测量,本文提出基于OFDR的瑞利散射光谱移动及距离域移动窗互相关的算法,可以实现在100 m长度范围内光纤分布式应变传感及连续分布定位,从而为应变的分布式连续检测及定位提供了一种新的方法。

## 2 系统传感原理

OFDR的基本原理如图1所示,它利用连续波频率扫描技术(FMCW)<sup>[12]</sup>,运用外差干涉方法,采用周期性线性波长扫描的光源,利用耦合器分别接入参考臂和信号臂。参考臂的本振光与信号臂的背向瑞利散射信号因为光程不同,所以其自身携带的频率也不同,故二者发生拍频干涉,其干涉信号的拍频与信号臂发生背向散射位置的距离成正比,再经过快速傅里叶变换(FFT),就可以得到距离域上的光纤背向瑞利散射信号的信息。

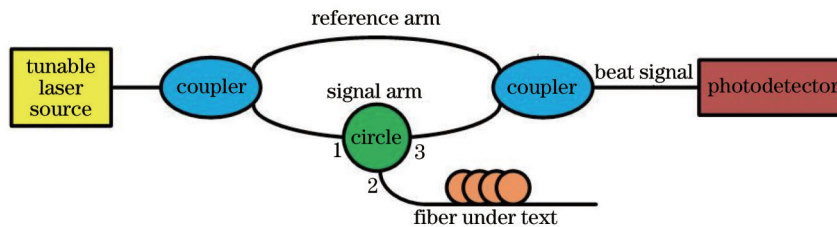


图1 OFDR系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of OFDR

光纤中的瑞利散射是由光纤本身折射率随机变化导致的,而散射的振幅又是测试距离的函数。由于光纤中存在这种比较稳定的随机分布的性质,所以光纤可以看做是一种较长的具有随机周期的弱光纤布拉格光栅。

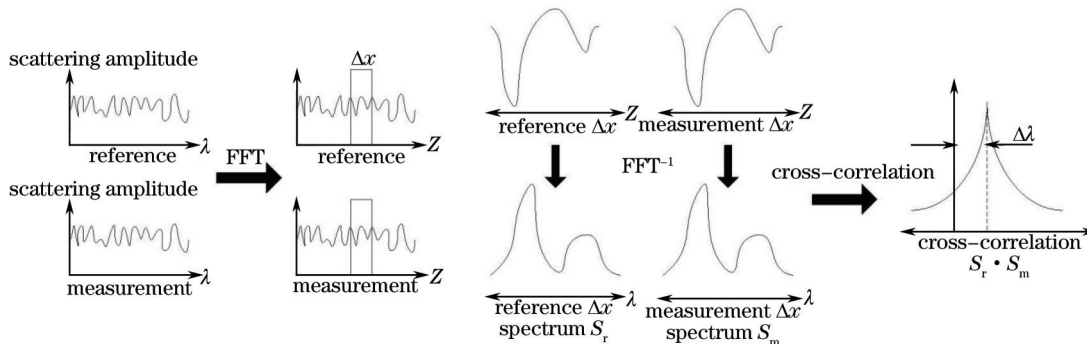


图2 基于OFDR的光纤分布式应变测量传感的光谱漂移解调原理

Fig.2 Demodulation principle of the wavelength shift in distributed optical fiber strain measurement sensing based on OFDR

而当外界刺激(如应变)发生变化时,光纤的背向瑞利散射信号的光谱就会发生漂移,其漂移量的大小与光纤所受的应变成正比。通过采用互相关运算对光谱漂移量进行解调,就可以直接获得应变值<sup>[11-13]</sup>,再利用移动窗对光纤的各个部位进行扫描,就可以同时获得被测光纤各个位置的应变信息。本文在此基础上提出了在距离域的瑞利散射移动窗互相关算法,如图2所示,FFT<sup>-1</sup>为快速逆傅里叶变换。

值得注意的是,由于光源本身存在一定的扫频非线性<sup>[14]</sup>,即等时间间隔输出的光不能保证其频率间隔是一致的。因此如果用采集卡的内部时钟采集,便会造成非等频率间隔采样,从而使信号的空间分辨率和幅值严重下降<sup>[15-16]</sup>。为了克服这一问题,实验中采用外部时钟进行采样,从而保证采样过程为等频率间隔采样<sup>[17]</sup>,这样也就避免了光源存在非线性的问题。在这种情况下,干涉信号对应的最大拍频  $f_b$  即为系统的采样率。已知在 OFDR 系统中,有

$$f_b = \gamma\tau, \quad (1)$$

且

$$\tau = \frac{2nL}{c}, \quad (2)$$

式中  $L$  为附加干涉仪信号臂延迟光纤的长度,  $\gamma$  为光源的调谐速率,  $\tau$  为延迟光纤对应的延迟时间,  $n$  为光纤在纤芯处的折射率,  $c$  为真空中的光速。设采样点数为  $M$ , 采样时间为  $t$ , 则

$$t = \frac{M}{f_b}, \quad (3)$$

光源的调谐范围  $\Delta F$  为

$$\Delta F = \gamma t. \quad (4)$$

在 OFDR 系统中,设系统的两采样点间的空间分辨率为  $\Delta z$ , 则其表达式为<sup>[18]</sup>

$$\Delta z = \frac{c}{2n\Delta F}, \quad (5)$$

结合(1)~(5)式可以得到表达式:

$$\Delta z = \frac{L}{M}. \quad (6)$$

由(6)式可知,在外时钟采样的情况下,影响系统两采样点间的空间分辨率的参数只有附加干涉仪延迟光纤的长度以及系统的采样点数。设在测量中选用的滑动窗的长度为  $N$ , 则整个应变测量系统应变定位检测的空间分辨率  $\Delta x$  为

$$\Delta x = N\Delta z, \quad (7)$$

由(7)式可知,当选取的滑动窗的长度  $N$  较小时,系统的应变定位检测的空间分辨率较高。但如果  $N$  的选择过小,会带来互相关运算时信噪比的下降<sup>[11]</sup>。此时系统不但误判率较高,还会影响系统的波长分辨率  $\delta\lambda$ , 而波长的分辨率直接影响系统的最小微应变的检测<sup>[19]</sup>, 导致有些微应变无法有效检测。  $\delta\lambda$  的表达式为

$$\delta\lambda = \frac{\Delta F}{N}. \quad (8)$$

因此,应当合理选择  $N$  的大小,同时保证系统的应变检测精度和应变定位检测的空间分辨率。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 实验系统的基本结构

本文选用的实验系统结构如图3所示,其中 TLS 表示可调谐光源, C1 为 1×2 单模耦合器, C2、C3、C4 均为 2×2 单模耦合器,其中 C1 的分束比为 5:95, C2、C3、C4 的分束比为 50:50, PC 为偏振控制器, FRM 为法拉第反射镜, BPD 为平衡探测器, DAQ 为数据采集卡, FUT 为被测光纤, f-clock 为外部时钟信号。该系统主要由可调谐激光器、主干涉仪、附加干涉仪、光电探测器、数据采集与分析系统组成。可调谐光源发出的光经过耦合器 C1 后分为两路,其中 5% 光功率的一路作为附加干涉仪的光源,附加干涉仪采用的是迈克耳孙干涉仪光路,产生的拍频信号作为系统的时钟。对于主干涉仪,获得的是 95% 的光源光功率,并采用马赫-曾德尔干涉仪光路,当光束经过耦合器 C3 后,被分为等光功率的两路,其中通过光纤较短的一路作为参考臂,另一路首先通过环形器的 1 端口,由 2 端口进入被测光纤。被测光纤的背向瑞利散射信号及菲涅耳反射信号返回环形器的 2 端口后从 3

端口出射。参考臂中的光束与反射臂中的光束在耦合器C4中发生干涉,产生拍频信号。该信号被光电探测器探测,被数据采集卡采集后,利用计算机进行快速傅里叶变换后便可以得到整条被测光纤不同位置的光纤信息。

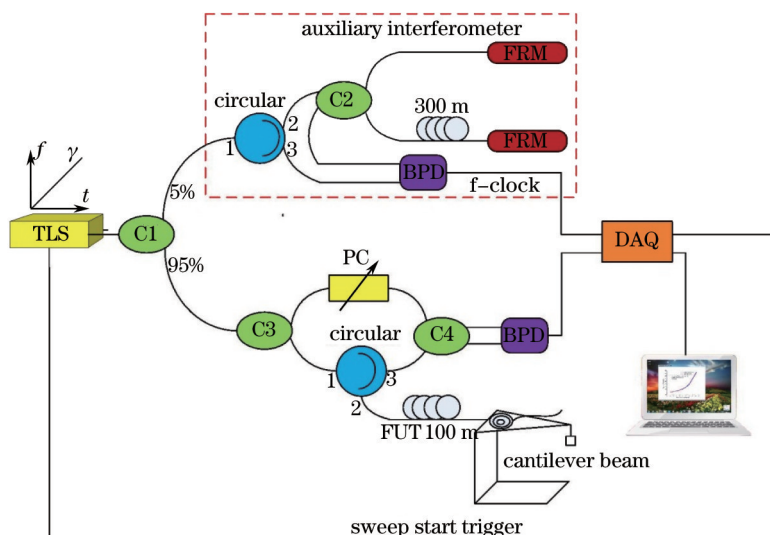


图3 基于OFDR的光纤分布式应变测量传感系统

Fig.3 System of distributed optical fiber strain sensing based on OFDR

### 3.2 实验结果与分析

实验中选用的光源为安捷伦81600B型可调谐激光器,选取的波长扫描范围为1535~1555 nm,触发方式为光源起始扫描触发的外触发模式。根据Nyquist采样定理,附加干涉仪中的外部时钟的延迟光纤长度至少应为被测光纤的2倍,因此实验中选用的测试光纤的长度约为100 m,附加干涉仪的延迟光纤为300 m。同时,实验中采集卡选用采样长度为7.5 m,则根据(6)式,可以得到系统两采样点间的空间分辨率为0.04 mm。

实验中所选用的光纤型号为G.652型单模光纤。实验中首先随机选取一段位置靠近其末端的部分,利用环状粘贴的方式紧贴在等强度悬臂梁的上表面,如图4所示。

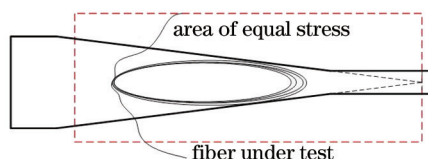


图4 等强度悬臂梁上表面光纤环状粘贴示意图

Fig.4 Diagram of optical fiber cyclic paste on the upper surface of equal stress cantilever beam

图4中的环状粘贴方式可以使光纤各个位置的受力基本相同,并保证光纤有足够大的曲率半径,降低光纤弯曲损耗带来的影响,以提高测试结果的稳定性。在悬臂梁的另一端悬挂标准砝码,使被测光纤受到拉应力。为了同时保证系统的定位检测空间分辨率及微应变的检测精度,实验中设定滑动窗的长度 $N=5000$ ,根据(7)、(8)式,可知系统的应变定位检测的分辨率为20 cm,波长分辨率为4 pm。

通过实验表明,该方法能够检测到的最小应变值为 $3 \mu\epsilon$ ,对应的互相关运算结果如图5所示,其中内图

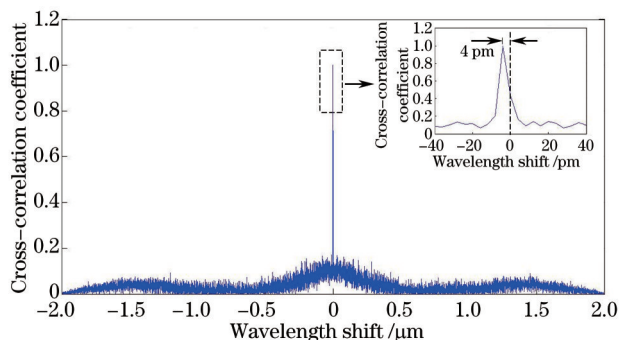


图5 应变为 $3 \mu\epsilon$ 时,波长漂移量为4 pm

Fig.5 Wavelength shift of 4 pm when the strain is  $3 \mu\epsilon$

为虚线框相应位置的放大图。

改变悬臂梁上悬挂的砝码的重量,使光纤所受的应变值依次为 3、7.5、15、30、45、60、75、90、105、120、135、150  $\mu\epsilon$ 。此时被测光纤的应变分布如图 6 所示。

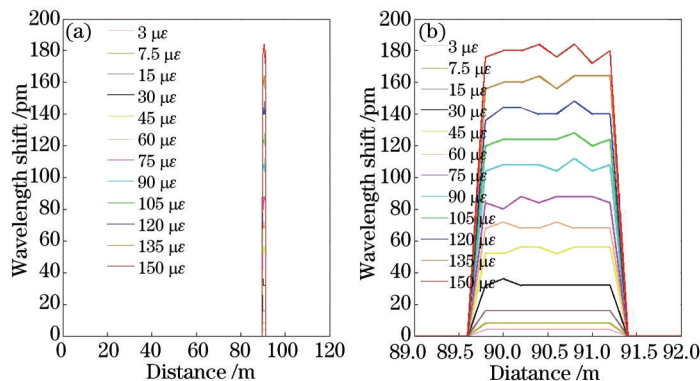


图 6 被测光纤在不同应变作用下光谱漂移分布图。(a) 整段光纤范围; (b) 89~92 m 放大图

Fig.6 Wavelength shifts along the fiber under different strains. (a) Along the all fiber; (b) large figure of the wavelength shift of the fiber from 89 m to 92 m

由图 6(a)可知,光纤发生应变的位置位于 89.6~91.4 m 范围内。而从图 6(b)中可以观察到,被测光纤的光谱漂移与所受应变之间存在近似的线性关系,因此,实验中选取位于 90.4 m 处附近的光纤,对 3~150  $\mu\epsilon$  对应的光谱移动量进行线性拟合,其拟合曲线如图 7 所示。

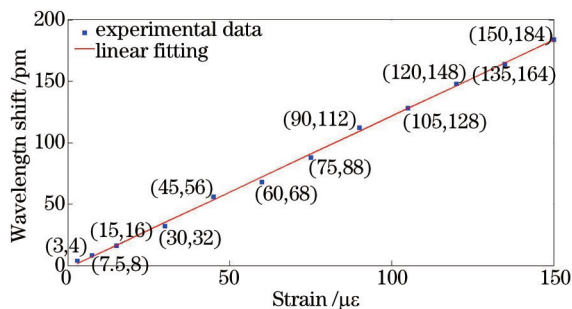


图 7 光谱的漂移量与光纤所受的应变拟合曲线

Fig.7 Linear fitting curve of wavelength shift versus strain of the fiber

改变被测光纤所受应变的位置,分别随机选取这段光纤的前端和中部的一段。利用图 4 所示的环状粘贴的方法进行应变的定位传感检测,并随机分别选取每段中的一个位置进行线性拟合,其检测及拟合结果如图 8 和图 9 所示。

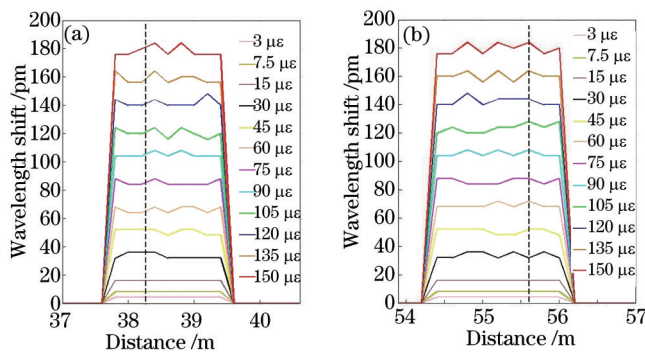


图 8 被测光纤在不同应变作用下波长漂移量分布。(a) 光纤前端; (b) 光纤中部

Fig.8 Wavelength shift along the fiber under different strains. (a) Front part of the fiber; (b) middle of the fiber

综合图 6~9 的测量结果,并对光纤的瑞利散射光谱移动量与光纤所受的应变进行线性拟合,其拟合结果如表 1 所示。

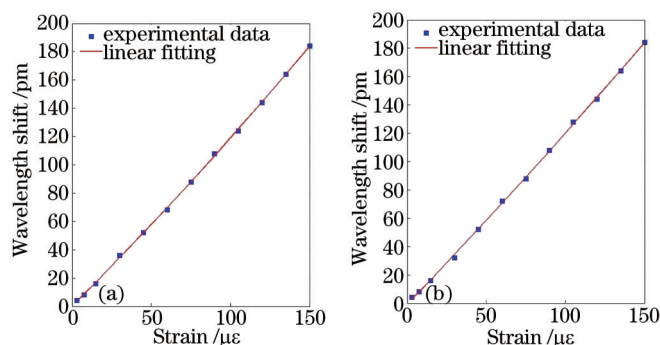


图9 波长漂移量与光纤所受应变拟合曲线。(a) 光纤前端; (b) 光纤中部

Fig.9 Linear fitting of wavelength shift versus strain of the fiber. (a) Front part of the fiber; (b) middle of the fiber

表1 光纤瑞利散射光谱移动量与光纤所受应变的线性拟合结果

Table 1 Results of linear fitting of wavelength shift versus strain of the fiber

	Front of the fiber	Middle of the fiber	End of the fiber
Position of the strain /m	37.6~39.6	54.4~56.4	89.6~91.4
Formula of the linear fitting	$y=1.227x-2.743$	$y=1.230x-2.328$	$y=1.238x-2.206$
Sensing sensitivity /(pm/ $\mu\epsilon$ )	1.227	1.230	1.238
Goodness of fitting $R^2$	0.9991	0.9994	0.9992

通过上述测试结果可以发现瑞利散射信号光谱移动量与所受应变之间存在明显的线性关系,且光纤各个位置的传感灵敏度基本接近,在工程应用中,可以采用多次测量取平均值的方法消除随机误差,使系统具有统一的传感灵敏度,以便于系统的标定。可以证明基于 OFDR 技术的瑞利散射信号光谱移动及移动窗互相关算法可在 100 m 光纤长度范围内的任意位置实现非常有效的连续分布式应变检测及定位。

## 4 结 论

针对应变测量中的传感及定位问题采用了基于 OFDR 技术的瑞利光谱移动的方法,引入了移动窗互相关算法,并对这种方法进行了理论分析和可行性的实验测试。实验结果表明,相对于其他应变测量方法,这种传感方法可以实现对应变值的准确测量,特别是对微应变的测量,其测量的最小值为  $3 \mu\epsilon$ 。而且,该方法可实现长达 100 m 的精确测量。由于系统中瑞利散射信号的光谱漂移量与光纤所受应变具有很好的线性关系,且在整个测量范围内系统的传感灵敏度基本一致,因此这种方法也有利于对光纤所受应变的标定。此外,这种方法不但能够完成对应变大小的测量,还能够实现对应变分布位置的定位,其对应的定位精度为 20 cm。因此,相对于传统的分布式应变测量方法,这种方法无论是在测量范围、传感灵敏度以及对应变分布的位置进行有效定位等方面都具有明显的优势。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Zongqun, Li Yong, Sheng Hongbin, *et al.*. The research status and expectation of the system of optical strain measurement[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(6): 134-137.  
闫宗群,李 勇,沈洪斌,等. 光学应变测量系统研究与展望[J]. 四川工兵学报, 2009, 30(6): 134-137.
- 2 Xu Rencai. Mechanical Quantity Measuring Instrument[M]. Beijing: China Machine Press, 1980.  
许人才. 机械量测量仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- 3 Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29-33.  
刘德明,孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
- 4 Xiaoyi Bao, Liang Chen. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- 5 Li Qin, Zhang Chunxi, Li Lijing, *et al.*. Influences of the frequency drift of the laser on location precision of the phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305003.  
李 勤,张春熹,李立京,等. 激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计扰动定位精度的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3):

- 0305003.
- 6 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.  
王拥军, 刘永超, 张靖涛. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 7 Wang Feifei, Zhang Li, Yang Lingzhen, *et al.*. Quasi-distributed fiber Bragg sensing network based on fiber chaotic laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806006.  
王斐斐, 张 丽, 杨玲珍, 等. 基于混沌激光的准分布式布拉格传感网络[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806006.
- 8 Chen Fuchang, Yu Chaoqun, Zhang Hualin. A signal-sensitizing detection method applied in distributed Brillouin optical fiber strain system[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(5): 968-973.  
陈福昌, 余超群, 张华林. 分布式布里渊光纤应变传感信号的增敏检测方法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(5): 968-973.
- 9 W Eickhoff, R Ulrich. Optical frequency domain reflectometry in single mode fiber[J]. Appl Phys Lett, 1981, 39(9): 693-695.
- 10 S Venkatesh, W V Sorin. Phase noise consideration in coherent optical FMCW reflectometry[J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(10): 1694-1700.
- 11 M Froggatt, J Moore. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Appl Opt, 1998, 37(10): 1735-1740.
- 12 Du Yang, Liu Tiegeng, Liu Kun, *et al.*. Research of hybrid fiber sensing network based on FBG and optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(10): 1900-1905.  
杜 阳, 刘铁根, 刘 琨, 等. 基于FBG和光频域反射技术的混合式光纤传感网的研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(10): 1900-1905.
- 13 Stephen T K, Dawn K G, Mark E F, *et al.*. High resolution distributed strain or temperature measurement in single-mode fiber using swept-wavelength interferometry[C]. 18th Int Conf Opt Fiber Sens, 2006.
- 14 Fumihiko Ito, Xinyu Fan, Yusuke Koshikiya. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation[J]. J Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1015-1024.
- 15 K Yuksel, M Wuilpart, P Mégret. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. Opt Express, 2009, 17(7): 5845-5851.
- 16 M Froggatt, S Kreger, D Gifford. High Resolution Interferometric Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) Beyond the Laser Coherent Length[P]. U.S. Patent 7515276, 2009.
- 17 Ryan Bolen. A Study of Optical Frequency Domain Reflectometry and Its Associated Distributed Sensor Applications[D]. Canada: Ottawa University, 2009: 34-43.
- 18 S Venkatesh, W V Sorin. Phase noise consideration in coherent optical FMCW reflectometry[J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(10): 1694-170.
- 19 Zhengyang Ding, X Steve Yao, Tiegeng Liu, *et al.*. Reducing polarization induced sidebands in Rayleigh backscattering spectra for accurate distributed strain measurement using optical frequency-domain reflectometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(2): 026101.

栏目编辑: 王晓琰