

基于光频域反射计的光纤分布式传感中 光谱分辨率提升技术

张 超, 杨 楠, 包 艳, 郑普超, 张 兵

中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 为实现对飞行器结构高精度、高分辨率的健康监测,开展了对光频域反射光纤分布式传感技术的研究。介绍了瑞利散射光谱互相关分布式传感的原理,分析了传统互相关法中传感单元长度对光谱分辨率的限制因素,提出利用傅里叶插值法提高光谱分辨率的方法,并进行了实验验证。实验结果表明,采用所提方法可在长度为 14.2 m 的单模光纤上实现传感单元长度为 1 cm、光谱分辨率为 1.6 pm 的连续分布式传感。所提方法在高精度、高分辨率的短、中程健康监测领域具有广阔的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤分布式传感; 光频域反射计; 应变; 温度

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0806001

Spectral Resolution Improvement Technique for Optical Frequency-Domain Reflectometry-Based Optical Fiber Distributed Sensing

Zhang Chao, Yang Nan, Bao Yan, Zheng Puchao, Zhang Bing

Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract A research for optical fiber distributed sensing technique based on optical frequency-domain reflectometry is conduct to realize the health monitoring for aircraft structure with high accuracy and high resolution. The principle of cross-correlation distributed sensing based on Rayleigh scattering spectrum is introduced, and the limitation factor of sensing gauge length in traditional cross-correlation method on spectral resolution is analyzed. A Fourier interpolation method is proposed to enhance the spectral resolution, and experiments are carried out to verify the spectral resolution. The experimental results show that continuous distributed sensing can be obtained with the proposed method when we use a 14.2 m single mode fiber with spectral resolution of 1.6 pm and sensing gauge length of 1 cm. The proposed method with high accuracy and high resolution is promising in short and medium health monitoring applications.

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

OCIS codes 060.2370; 060.2430; 120.3180

1 引 言

在结构健康监测技术中,光纤分布式传感借助于光纤优异的物理特性,具有体积小、重量轻、易于排布及抗电磁干扰等优势,已经逐渐取代了传统的基于应变片和热敏电阻的分布式传感,因此被广泛应用于建筑、桥梁、油井、船舶、飞行器等多个领域^[1-3]。

光频域反射计(OFDR)采用频域干涉测量方法,具有高分辨率、高灵敏度的特性,在光纤器件测量及传感应用领域具有独特的优势^[4-5]。在光纤传感应用中,将 OFDR 与光纤光栅^[6-7]相结合,可构成准分布式 OFDR 光纤光栅传感系统,从而提升光纤光栅的复用数量。此外,直接利用光纤中固有的瑞利散射可实现连续的 OFDR 光纤分布式传感。2008 年,美国国家航空航天局研制了 OFDR 光纤光栅传感系统,实现了

收稿日期: 2017-02-20; **收到修改稿日期:** 2017-04-05

基金项目: 国防预研究基金(6141B05060106)

作者简介: 张 超(1983—),男,硕士,工程师,主要从事航空光位移传感方面的研究。E-mail: 181710160@qq.com

2000 个相同低反射率光纤光栅的复用,并且对捕食者无人机机翼进行了健康监测^[8];Froggatt 等^[9]通过测量光纤瑞利散射,实现了以单根光纤为传感器的 OFDR 光纤分布式传感。国内研究人员对基于 OFDR 的光纤传感技术也开展了相关的研究^[10-11],李政颖等^[12]对单根光纤上 200 个低反射率光纤光栅进行了复用;刘琨等^[13]实现了 100 m 的 OFDR 光纤分布式传感,传感单元长度为 20 cm。

在 OFDR 光纤分布式传感技术中,传感单元长度和传感分辨率是两个相互制约的指标。为了保证 $3 \mu\epsilon$ 的传感分辨率,参考文献^[13]中将传感单元长度设定为 20 cm,但这种较大的传感单元模糊了应变的真实分布,降低了定位精度。针对上述问题,本文首先对 OFDR 光纤分布式传感原理进行了介绍,然后对提高一定传感单元长度下传感分辨率的方法进行了阐述,并通过实验进行了验证,最后对实验结果进行了分析与讨论。

2 基本原理

2.1 传感原理

OFDR 以扫频激光器为光源,在数十纳米波长范围内进行连续扫描。通过采集参考光和传感光纤反射光的干涉信号并进行快速傅里叶变换(FFT),可以得到传感光纤的时域分布,其中包含各反射点的幅值和相位信息。图 1 为 OFDR 原理图。

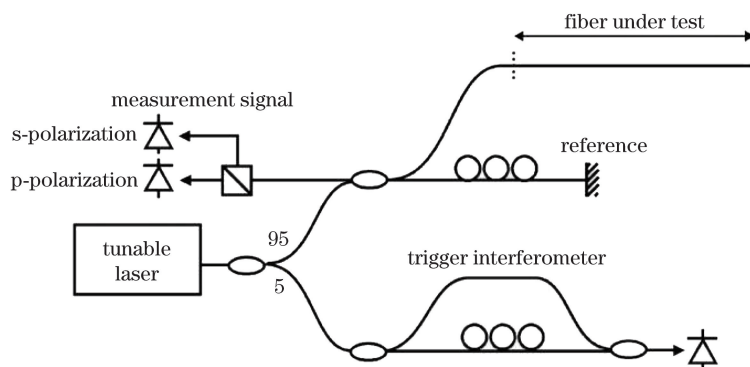


图 1 OFDR 原理图

Fig. 1 Principle diagram of OFDR

如图 1 所示,系统中采用辅助干涉仪产生采样时钟,以消除扫频的非线性影响,该方法是 OFDR 中的一种通用技术^[14]。为获得稳定的干涉信号,一般还需要采用偏振分集消除偏振衰落的影响^[15]。

OFDR 光纤分布式传感通过光纤中的背向瑞利散射实现,该散射分布可视为一个反射率较低、周期随机的连续光纤光栅^[9]。不同于光纤光栅反射谱的窄带特性,光纤瑞利散射谱为宽带随机光谱,在应变、温度变化时也会产生相应的平移。通过互相关法计算传感光纤瑞利散射分布各处(传感单元)的光谱平移量,可实现应变或温度的连续分布式传感。

在计算光谱平移量时,光谱分辨率 $\delta\lambda$ 决定了传感分辨率,对于中心波长为 1550 nm 的光源,光谱分辨率 $\delta\lambda$ 与光频分辨率 δf_s 的关系可近似表示为

$$\delta\lambda = -\frac{1}{125}\delta f_s. \quad (1)$$

由于光频分辨率 δf_s 与传感单元长度 δL_s 满足傅里叶变换关系,因此可以得到

$$\delta f_s = \frac{c}{2n_0\delta L_s}, \quad (2)$$

式中 n_0 为光纤折射率, c 为真空中光速。由(1)、(2)式可以看出, $\delta\lambda$ 与 δL_s 成反比,传感单元长度越长,光谱分辨率越高。

2.2 光谱分辨率提升方法

(1)式与(2)式反映了光谱分辨率 $\delta\lambda$ 与传感单元长度 δL_s 的关系,且光谱分辨率 $\delta\lambda$ 与光源扫频范围无关。当光源中心波长为 1550 nm、传感单元长度为 1 cm 时,光谱分辨率为 80 pm。通过增加传感单元

长度可提升光谱分辨率,此时为了保证 8 pm 的光谱分辨率,传感单元长度需增加至 10 cm。但是较大的传感单元长度降低了分布式传感的性能和空间精度。对于应变和温度变化较快的区域,互相关法的可信度会大幅降低。

根据传感原理,传感单元光谱产生平移的根本原因是:外界温度、应变的影响使光纤时域分布发生收缩或拉伸,导致时域相位产生了线性变化。该相位变化的斜率反映了光谱的平移量,该变化关系可由离散傅里叶变换(DFT)得出。

对于离散的时域信号 $f(t_n)$,对其进行 DFT 后的频域信号 $\mathcal{F}(f_k)$ 为

$$\mathcal{F}(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \exp(-j2\pi k \Delta f n \Delta t) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \exp\left(-j \frac{2\pi k n}{N}\right), \quad (3)$$

式中 Δt 为时域间隔; n 为 Δt 的索引; Δf 为频谱分辨率, $\Delta f = 1/(N\Delta t)$; k 为 Δf 的索引; N 为变换长度。

$\mathcal{F}(f_k)$ 频谱右移 m 点后变为 $\mathcal{F}(f_{k-m})$,由(3)式可得

$$\mathcal{F}(f_{k-m}) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \exp\left[-j \frac{2\pi(k-m)n}{N}\right] = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \exp\left(j \frac{2\pi m n}{N}\right) \left(-j \frac{2\pi k n}{N}\right). \quad (4)$$

$\mathcal{F}(f_k)$ 频谱右移 m 点相当于时域信号 $f(t_n)$ 在 N 点内的相位线性变化了 $2m\pi$ 。利用互相关法并以点为基本单元进行计算,对于线性变化相位小于 2π 的部分,互相关法只能以 0 或 2π 进行近似,这种量化的计算方法限制了光谱平移量的计算精度。

根据傅里叶变换性质,通过傅里叶插值法增加运算点数可提升互相关法的光谱分辨率。互相关法在时域信号加窗后先进行补零操作,再进行快速傅里叶逆变换(IFFT)后得到光谱,且可以根据分辨率的要求调整插值的倍数。以时域信号 $f(t_n)$ 为例,其傅里叶插值后的 $\mathcal{F}(f_k)$ 可表示为

$$\mathcal{F}(f_k) = \sum_{n=0}^{TN-1} f(t_n) \exp\left(-j \frac{2\pi k n}{TN}\right), \quad (5)$$

式中 T 为插值倍数, $\Delta f = 1/(TN\Delta t)$ 。当 $\mathcal{F}(f_k)$ 频谱右移 m 点后,得到

$$\mathcal{F}(f_{k-m}) = \sum_{n=0}^{TN-1} f(t_n) \exp\left[-j \frac{2\pi(k-m)n}{TN}\right] = \sum_{n=0}^{TN-1} f(t_n) \exp\left(j \frac{2\pi m n}{TN}\right) \left(-j \frac{2\pi k n}{TN}\right), \quad (6)$$

此时,频谱右移 m 点相当于时域信号 $f(t_n)$ 在 N 点内相位线性变化了 $2m\pi/T$,傅里叶插值后的光谱互相关法可以反映更小的线性相位变化。

当 T 为 50 时,长度为 1 cm 的传感单元可以正确反映 $2\pi/50$ 的线性相位变化,即光谱分辨率为 1.6 pm,而传统互相关法在相同分辨率下的传感单元长度需达到 50 cm。该方法虽然增加了运算量,但在一定传感单元长度下可以显著提升光谱分辨率。

图 2 为采用傅里叶插值后的互相关法流程图,它与传统互相关法的区别在于:在时域加窗与 IFFT 间加入了补零操作。

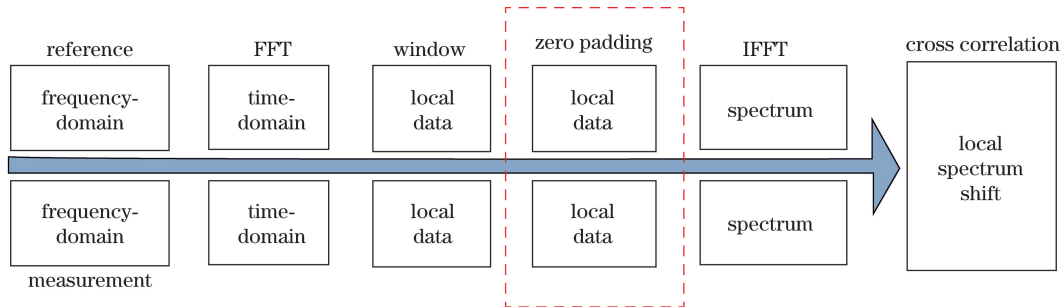


图 2 采用傅里叶插值的 OFDR 互相关法流程图

Fig. 2 Flow chart of OFDR cross-correlation method with Fourier interpolation

3 实验结果与分析

扫频激光器的扫频速度为 $100 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$,波长范围为 1546~1554 nm,辅助干涉仪两臂光纤相差 56.8 m。传感光纤的探测量程为 14.2 m,距离分辨率为 0.1 mm,一次扫频得到光纤量程范围内的点数为

1.42×10^5 。运用上述傅里叶插值法,对长度为 1 cm 的传感单元分别进行了温度和应变实验,光谱分辨率为 1.6 pm。

3.1 温度传感实验

将长度为 3 m 的单模光纤跳线绕环放入烧杯中,以室温 25.0 °C 为参考条件,加入热水后用数字温度计记录水温,同时对光纤各处的光谱平移量进行测量。图 3 为光纤温度传感实验装置及温度变化引起的光谱平移量的测量结果。

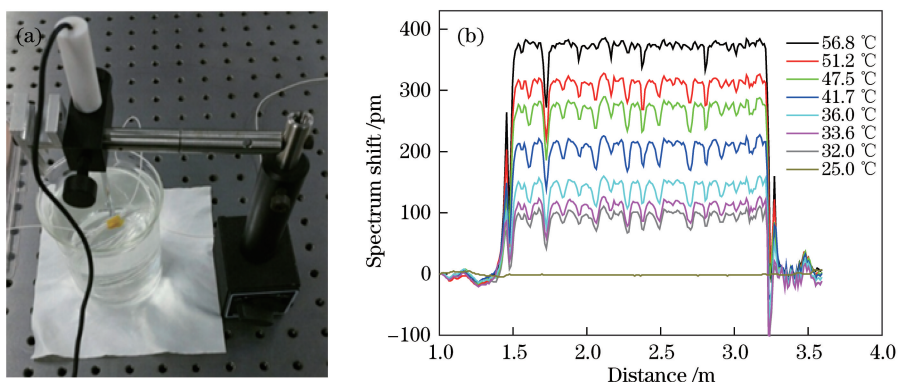


图 3 (a) 光纤温度传感实验装置图; (b) 温度变化引起的光谱平移量

Fig. 3 (a) Experimental setup of fiber temperature sensing; (b) spectrum shift caused by temperature variation

3.2 应变实验

将一段单模光纤(SMF-28e)进行预拉伸,并通过环氧树脂将单模光纤粘贴在碳纤维复合材料的正反两面,对材料尾端进行固定后在前端分别施加向下和向上的力,使材料弯曲并分别记录两种情况下相对于不施加力时光纤各处的光谱平移量。图 4(a)~(c)分别为单模光纤粘贴在复合材料上的实物图、应变实验示意图及应变引起的光谱平移量的测量结果。

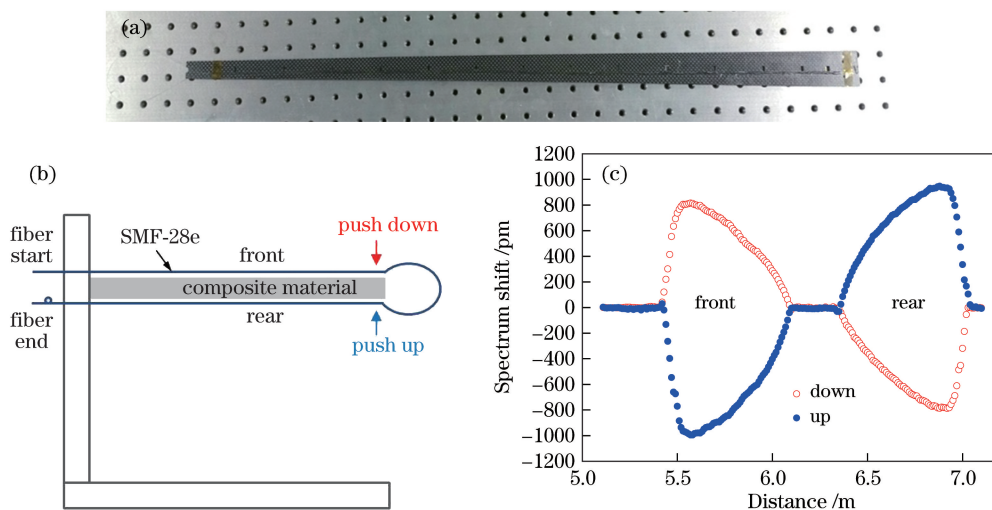


图 4 (a) 单模光纤粘贴在复合材料上的实物图; (b) 应变实验示意图; (c) 应变引起的光谱平移量

Fig. 4 (a) Picture of single mode fiber stucked on composite material; (b) diagram of strain experiment; (c) spectrum shift caused by strain

3.3 分析与讨论

对于温度和应变实验中得到的实验数据,选取光谱平移量变化较为缓慢的区域进行分析,如图 5 所示。图 5(a)为温度传感实验中水温为 56.8 °C 时,光纤长度为 2.06~2.12 m 范围内的光谱平移量;图 5(b)为应变实验中施加向下压力时,光纤长度为 5.52~5.61 m 范围内的光谱平移量。图中圈出了相邻位置光谱平移量变化恰好等于光谱分辨率为 1.6 pm 的点,这表明在 1 cm 传感单元长度下,可以有效检测出 1.6 pm 的光谱平移量。

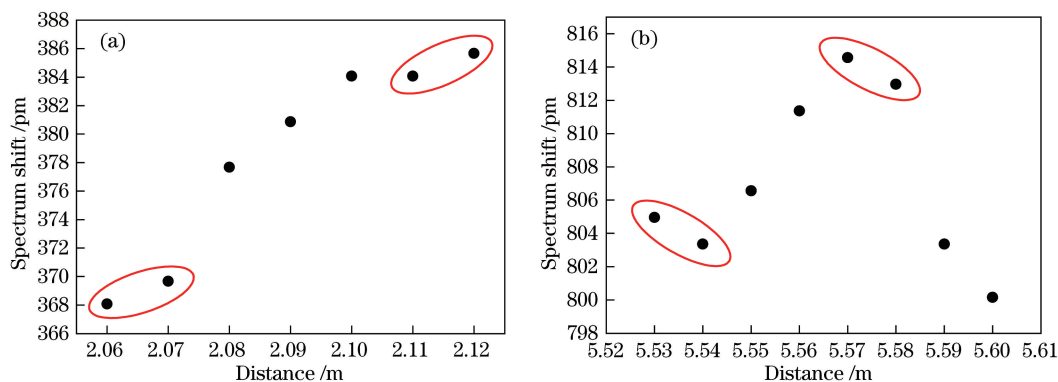


图 5 (a)温度传感实验中水温为 56.8 °C 时的光谱平移量;(b)施加向下压力时的光谱平移量

Fig. 5 (a) Spectrum shift in temperature sensing experiment at 56.8 °C ; (b) spectrum shift under downward force

在温度传感实验中,随着水温的不断降低,光纤各传感单元的光谱平移量不断减小。由于光纤跳线外保护层在受热后会产生不均匀的残余应力,因此在同一温度下,光纤各处受到不同的应变时光谱平移量会产生波动。图 6 为光纤长度分别为 2.22 m 和 3.04 m 时光谱平移量随温度的变化及线性拟合曲线,结果表明拟合度(R^2)高于 0.99,温度-波长灵敏度约为 $11 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$,该结果与单模光纤在 1550 nm 处的理论值一致^[16]。

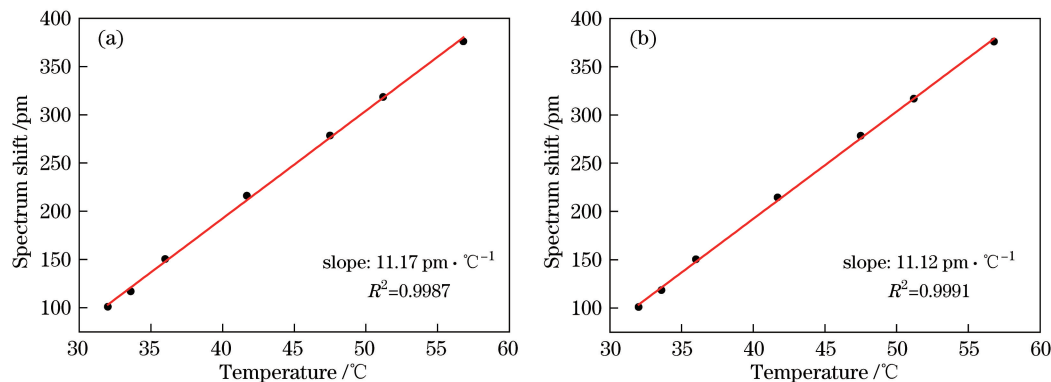


图 6 温度传感实验中不同位置处的线性拟合曲线。(a) 2.22 m ; (b) 3.04 m

Fig. 6 Linear fitting curves at different positions in temperature sensing experiment.

(a) 2.22 m ; (b) 3.04 m

在应变实验中,当在复合材料前端施加向下的力时,材料产生弯曲形变,此时上表面产生正应变,下表面产生负应变;当在复合材料前端施加向上的力时,上表面产生负应变,下表面产生正应变,图 4(b)较为准确地反映了该变化。受限于实验条件,目前无法对应变进行有效的测量,因此没有给出应变-波长灵敏度,单模光纤的应变-波长灵敏度在 1550 nm 处的理论值为 $1.13 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ^[16]。

实验结果表明,采用傅里叶插值法可有效地解除传统互相关法中光谱分辨率的限制,在较短传感单元长度下依然可以实现高分辨率的温度和应变测量,从而保证高精度、高分辨率的分布式传感。

光谱平移是时域相位线性变化的一种体现,因此傅里叶插值法也仅是提高了传感单元时域相位线性变化的计算精度。如果直接采用时域相位变化率来进行温度、应变的计算,则可以在保证高传感分辨率的同时进一步缩短传感单元长度。当噪声一定时,利用 20 个甚至更少的空间点即可以准确计算出相位变化率。对于上述 0.1 mm 的空间分辨率,传感单元长度可以缩短至 2 mm 甚至更短。时域相位解算方法对算法要求较高,后续工作主要围绕该方法开展。

4 结 论

开展了 OFDR 分布式传感技术研究,对互相关法中光谱分辨率的限制因素进行了分析,并提出了傅里叶插值法。实验结果表明,傅里叶插值法可以有效提高光谱分辨率,在 14.2 m 单模光纤上实现了传感单元长度为 1 cm、光谱分辨率为 1.6 pm 的连续温度、应变传感。相对于传统的互相关法,该方法在保证传感分

辨率性能的同时,可显著缩短传感单元的长度和提高定位精度,非常适合用于对飞行器结构的高精度、高分辨率健康监测。

参 考 文 献

- [1] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [2] 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.
- [3] Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao, *et al.* A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 650-654.
宋牟平, 鲍 翀, 裘 超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 650-654.
- [4] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [5] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, *et al.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 666-674.
- [6] Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.* Research of high speed large capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306007.
- [7] Kinet D, Mègret P, Goossen K W, *et al.* Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [8] Richards W, Parker J, Piazza A. Application of fiber optic instrumentation[J]. *NASA Technical Reports Server*, 2012, 22: RTO-AG-160-V22.
- [9] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [10] Xie Weilin, Dong Yi, Zhou Qian, *et al.* Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706003.
谢玮霖, 董 毅, 周 潜, 等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706003.
- [11] Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.* Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra weak fiber Bragg grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. *中国激光*, 2012, 41(4): 0405004.
- [12] Li Zhengying, Sun Wenfeng, Wang Honghai. Research on the ultra-weak reflective fiber Bragg grating sensing technology based on optical frequency domain reflection technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0806003.
李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0806003.
- [13] Liu Kun, Feng Bowen, Liu Tiegeng, *et al.* Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry[J]. *Chinese J 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.
- [14] Moore D. Advances in swept-wavelength interferometry for precision measurements[D]. Colorado: University of Colorado, 2011: 68-93.
- [15] Soller B J, Wolfe M, Froggatt M E. Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components[C]. *National Fiber Optic Engineers Conference*, 2005: NWD3.
- [16] Kreger S T, Sang A K, Gifford D K, *et al.* Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter[C]. *SPIE*, 2009, 7316: 73160A.