

基于随机非均匀采样的重叠双光栅动态应变 传感实验研究

马游春^{1,2,3} 刘红雨^{1,2} 杨远洪³ 李锦明^{1,2}

¹ 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051
² 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051
³ 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 利用重叠多光栅的随机非均匀采样来实现动态或静态应变信号传感与解调。给出了基于可调谐滤波器的重叠双光栅解调系统组成及其随机非均匀采样的实现方法,重叠多光栅可在动态应变信号测量时产生时域上的非等间隔传感脉冲,解调系统采用质心法硬件解算,结合平滑滤波方法,可同时满足测量速度与解调精度的需要。实验中通过产生周期随机变化的三角波可调谐滤波器扫描电压来实现重叠多光栅的随机非均匀采样,在重叠双光栅与平均 500 Hz 可调谐滤波器扫描速率条件下可产生 2 kHz 随机分布的传感脉冲,最大可实现 1.9 kHz 的动态应变信号测量,动态应变信号的测量带宽相当于单光栅解调系统的 8 倍。

关键词 光栅; 解调; 非均匀采样; 动态应变

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0705002

Experimental Research on Dynamic Strain Sensing of Superimposed Fiber Bragg Gratings Based on Random Non-Uniform Sampling

Ma Youchun^{1,2,3} Liu Hongyu^{1,2} Yang Yuanhong³ Li Jinming^{1,2}

¹ National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China
² Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China
³ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University,
Beijing 100191, China

Abstract Dynamic or static strain sensing and signal demodulation are realized by using random non-uniform sampling of superimposed fiber Bragg gratings (FBGs). Superimposed FBGs demodulating system based on tunable filter and its realization of non-uniform sampling method are presented. The superimposed FBGs are designed to generate non-equidistant space of sensing pulse train in time domain during dynamic strain signals measurement. By combining centroid hardware finding algorithm with smooth filtering method, the demodulation speed and accuracy can be simultaneously kept. Random non-uniform sampling of superimposed FBGs can be realized by generating periodic random variable triangle wave driving voltage of tunable filter. By using superimposed FBGs, a 1.9 kHz dynamic strain is measured by generating an additive non-uniform random distributed 2 kHz optical sensing pulse train at a triangular wave periodically randomly changing scanning voltage with the mean scanning frequency of 500 Hz. The dynamic strain measurement bandwidth is eight times of single FBG interrogation system.

Key words gratings; interrogation; non-uniform sampling; dynamic strain

OCIS codes 060.2310; 060.2360; 060.2370; 060.2380; 350.3735

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有体积小、波

长选择性好、便于波分复用、不受电磁干扰等特点,被广泛用于结构健康监测、光纤通信和恶劣环境物

收稿日期: 2013-01-15; 收到修改稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61275166, 61178058, 91123036)

作者简介: 马游春(1977—),男,博士,讲师,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: mycdhmmxy@sina.com

理量监测等方面。FBG 可以被封装成各种传感器,用于温度^[1]、应力应变等物理量的检测^[2-3]。光栅解调方法包括匹配光栅法、线性滤波器法、干涉法和可调谐滤波器法等^[4]。基于可调谐滤波器的光栅解调法由于具有复用能力强、操作简单与分辨率高等特点而获得广泛的工程应用,但存在扫描速率低,无法满足高速动态应变信号测量的问题。

重叠多光栅是通过选用具有不同中心波长的相位掩模板在传感光纤的同一位置重复刻写所制成的,因而具有如下两个重要的特性:1) 时间同步性,即所有重叠在一起的光栅可同步传感被测物理量;2) 结构紧凑性,即在同一传感光纤的区域可以实现多个具有不同中心波长光栅的刻写,有利于节省空间。这些特性使得重叠多光栅获得了广泛的应用^[5]。在传感领域,重叠多光栅可有效提高基于可调谐滤波器的光栅解调系统的动态应变信号测量带宽^[6],通过重叠多光栅的应用还可以增强传感脉冲的非均匀采样特性。在信号采集与数字处理领域,从采样时间间隔角度可以分成均匀和非均匀采样两种,均匀采样的采样时间间隔完全相等,非均匀采样则完全随机。非均匀采样具有一个非常重要的特点就是可以消除频率混叠现象,突破奈奎斯特采样定理的限制,实现高于采样频率的信号的测量^[7]。

本文利用非均匀采样的相关理论和方法来实现基于重叠双光栅解调系统的非均匀采样与传感,以达到提高动态应变信号测量带宽的目的。

2 重叠多光栅解调系统及原理

2.1 非均匀采样的傅里叶变化原理

假设 $x(t)$ 为有限带通信号, $X_c(f)$ 为 $x(t)$ 的连续信号傅里叶变换结果, T 为采样时间间隔, N 为总的采样点数, NT 为总的采样时间, $x(n)$ 和 $x(t_n)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, \infty$) 分别为均匀采样和非均匀采样信号, $X_D(f)$ 为非均匀采样信号的傅里叶变换结果。则连续时间的傅里叶变换为

$$X_c(f) = \int_0^{NT} x(t) \exp(-i2\pi ft) dt. \quad (1)$$

均匀采样信号的离散傅里叶变换就是将(1)式的积分换成求和累加的形式,均匀采样情况下采样时间间隔相等,即每个采样时间段的宽度相等,因而其离散傅里叶变换可表示为

$$X_c(f) = \sum_{n=1}^N x(n) \exp(-i2\pi fn). \quad (2)$$

类似地,非均匀采样的离散傅里叶变换可表示为

$$X_D(f) = \sum_{n=1}^{N-1} x(n) \exp(-i2\pi ft_n) (t_{n+1} - t_n). \quad (3)$$

在非均匀采样中,求和区间为不等间隔 ($t_{n+1} - t_n$), 所以必须引入采样间隔这个变量,如(3)式中的 ($t_{n+1} - t_n$)。

2.2 重叠多光栅中的非均匀采样现象

基于光纤法布里-珀罗可调谐滤波器(FFP-TF)的重叠多光栅解调系统在扫描过程中存在非均匀采样的问题,造成这一现象的原因主要包括:1) 传感光栅动态应变;2) 非线性扫描;3) 扫描偏置或峰值电压

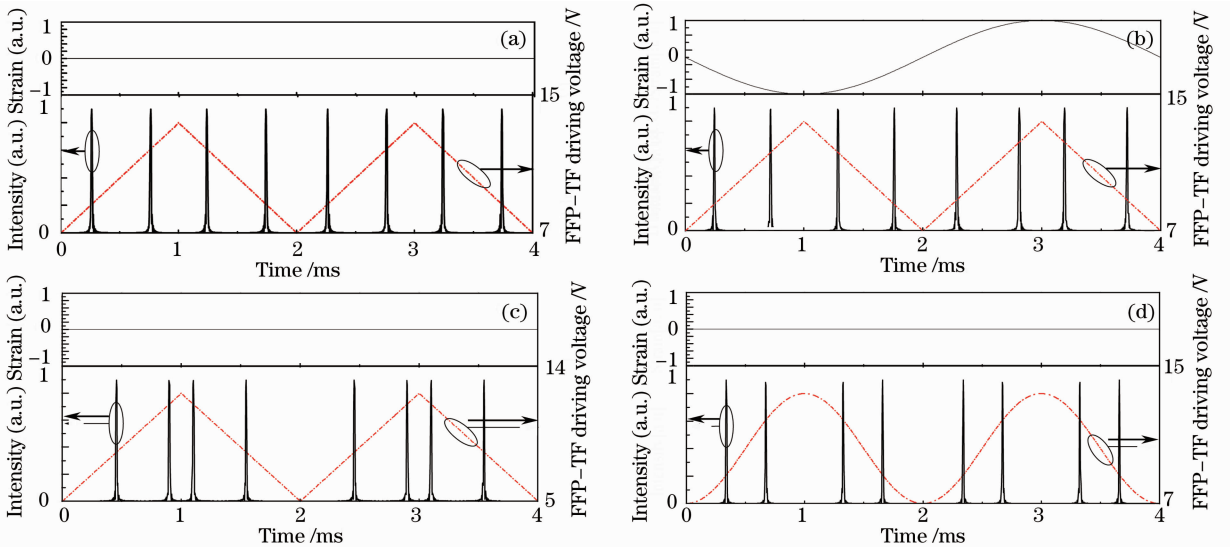


图 1 (a) 均匀采样; (b) 动态应变引起非均匀采样; (c) 扫描电压引起非均匀采样; (d) 非线性扫描引起非均匀采样
Fig. 1 (a) Uniform sampling; (b) non-uniform sampling caused by dynamic strain; (c) non-uniform sampling caused by driving voltage of FFP-TF; (d) non-uniform sampling caused by nonlinear driving voltage

的变化。图 1 给出了重叠双光栅在不同条件下的非均匀采样现象。图中重叠双光栅在可调谐滤波器的三角波或正弦波正向与反向扫描过程都会输出两个传感脉冲,但传感脉冲之间的间距会在动态应变、非线性扫描、偏置或峰值电压改变的条件下出现非均匀采样的现象,从而会对重叠多光栅的动态应变信号解调结果带来影响。如果通过一定的可调谐滤波器扫描方法使重叠多光栅的输出传感脉冲分布具有随机分布的特性,就可根据非均匀采样的原理来提高动态应变信号的测量带宽。

2.3 重叠多光栅非均匀采样实现方法

为了使基于可调谐滤波器的重叠多光栅解调系统具有随机非均匀采样能力,可通过改变可调谐滤波器扫描电压峰值的方法来改变三角波的扫描周期,每个扫描周期三角波的峰值电压随机变化,但三角波的上升沿与下降沿的斜率保持不变,峰值变化的幅度呈高斯或正态分布,平均电压保持不变,从而使得重叠多光栅的传感脉冲出现时间具有随机变化的特性,其实现原理如图 2 所示,图中上半部分为动态应变信号,下半部分为扫描周期随机变化的三角波,箭头代表重叠双光栅的 4 个传感脉冲在三角波扫描峰值电压变化时每个扫描周期传感位置所出现的变化。 V_1 和 V_2 对应重叠双光栅中的两个光栅中心波长所对应的可调谐滤波器扫描电压位置, V_{max} 和 V_{min} 对应三角波峰值电压的变化范围,与之相对应的是三角波扫描周期的变化范围 T_{max} 和 T_{min} , $V_{average}$ 为三角波峰电压的平均值, $T_{average}$ 为三角波扫描周期平均值。

2.4 重叠多光栅解调系统

基于随机非均匀采样的光栅解调系统如图 3 所示,主要包括传感用的重叠双光栅(SI-FBG)、宽带

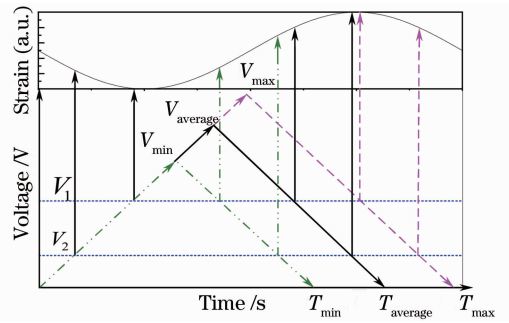


图 2 三角波扫描周期随机变化的实现方法

光源(ASE, L80M, 10 mW, 由北京航空航天大学光电信息技术研究室提供)、可调谐滤波器(0.014 nm, 由北京理工大学提供)、定向耦合器、标准具(FPIF, 谱间距 800 pm, 由 E-TEK 公司提供)、光电探测器(PD)、基于低电压差分信号(LVDS)接口的 8 通道串行模/数(A/D)转换器(AD9222, 20 MS/s, 12 bit)、16 位数/模(D/A)转换器、高压驱动放大电路,以及基于现场可编程门阵列(FPGA)的实时解算与控制电路(包括峰值提取算法、扫描周期随机变化的三角波生成电路、A/D 与 D/A 控制电路等)。实时解算与控制电路是本系统的核心部分,控制电路根据预设的随机变化的三角波峰值数据连续地输出扫描周期随机变化的三角波信号,三角波信号在高压放大电路的作用下直接驱动可调谐滤波器,宽带光源经过可调谐滤波器后输出扫描波长范围随机变化的窄线宽激光,可调谐滤波器输出的光经过耦合器后分为两部分,进入重叠多光栅反射回来的光又通过耦合器进入光电探测器,另一部分光经过隔离器(ISO)后进入标准具而产生梳状特性的透射峰,通过标准具进行动态标定可有效提高光栅反射谱峰值波长的解调精度。重叠多光栅在动

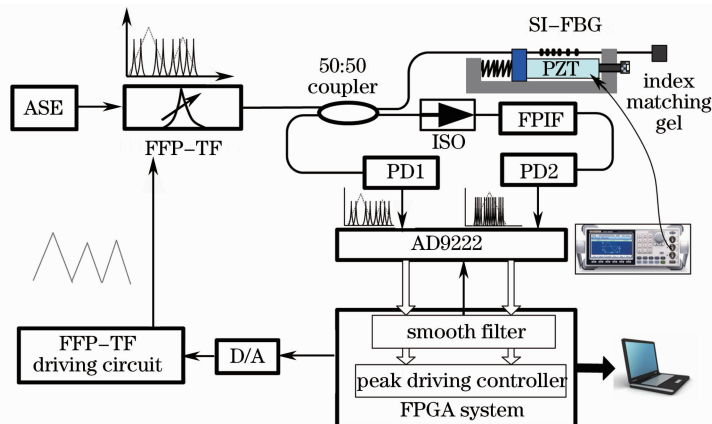


图 3 重叠多光栅硬件解调系统

Fig. 3 Interrogation system of superimposed FBGs

态应变与三角波随机扫描的共同作用下输出非均匀分布的传感脉冲,通过实时解算传感脉冲出现的时间及峰值波长的变化即可再现被测物理量的动态特性。实验中采用质心法硬件实时解算,结合平滑滤波的方法来进行光栅反射谱中心波长的解调,多个通道可同步解调,每个中心波长的解算结果仅包含光栅反射谱的峰值起点、累加和、乘积累加和,以及随机变化的扫描周期长度等变量,因而降低了多通道高速数据采集对数据传输接口的要求。

质心法原理是根据力矩平衡原理推导得出的,即密度均匀物体各点的质量对某一轴产生的力矩和,等于其所有质量集中在某一特定位置时对该轴产生的力矩,此特定的位置就是物体的质心。根据此原理可得光栅反射谱中心波长^[8]:

$$\lambda_c = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i (P_i - P_{th})}{\sum_{i=1}^m (P_i - P_{th})}, \quad (1)$$

式中 λ_c 为光栅反射谱的中心波长, λ_i , P_i 分别为可调谐滤波器扫描波长与光栅反射谱光功率, P_{th} 为便于检测峰值起点的光功率阈值。

为了实现动态应变信号的传感与测量,实验中将重叠多光栅的一端与动态应变传感装置的固定端相接,另一端粘接于活动端,活动端在弹簧与压电陶瓷(PZT)的共同作用下产生左右变化的位移,压电陶瓷通过信号发生器来进行直接驱动,实验结果直接以PZT的驱动电压来表示动态应变信号的变化特性。

3 重叠多光栅随机非均匀采样实验结果

3.1 随机动态扫描结果

图4为重叠双光栅在扫描周期随机变化的三角波可调谐滤波器扫描电压作用下的输出结果,解调系统平均扫描频率为500 Hz,最大与最小扫描频率的变化幅度为±20%,重叠双光栅条件下的传感脉冲出现的平均频率为2 kHz,波长扫描范围为10 nm,重叠双光栅的中心波长分别为1547 nm与1552 nm,标准具的特征波长为1550.501 nm。图4(a)为标准具的梳状扫描透射谱,透射谱峰值间隔为固定的800 pm,标准具各输出峰值的中心波长受温度的影响很小,因而可用于传感光纤光栅的实时动态标定,可有效提高传感光纤光栅中心波长的解调精度,图中Mag Flag标记为标准具的特征波长,实验中由一个窄线宽滤波器串接在标准具得到。图4(b)为重叠双光栅在时域上非均匀分布的反射

谱,对应图中FBG1与FBG2,重叠在一起的两个光纤光栅具有不同的中心波长,因而在每个三角波扫描周期的上升沿和下降沿都会出现两个传感脉冲,通过双光纤光栅同步传感的设计可进一步增强随机非均匀采样的动态应变信号测量带宽。图4(c)为扫描周期随机变化的三角波电压,图中峰值电压在一定幅度范围内随机变化,且呈高斯分布特性,在一定的时间范围内,其平均峰值电压保持不变,另外由于线性扫描三角波电压的斜率保持不变,所有三角波的扫描周期将会出现随机变化,从而导致重叠多光栅的输出反射谱传感脉冲出现的位置也具有了随机分布的特性。

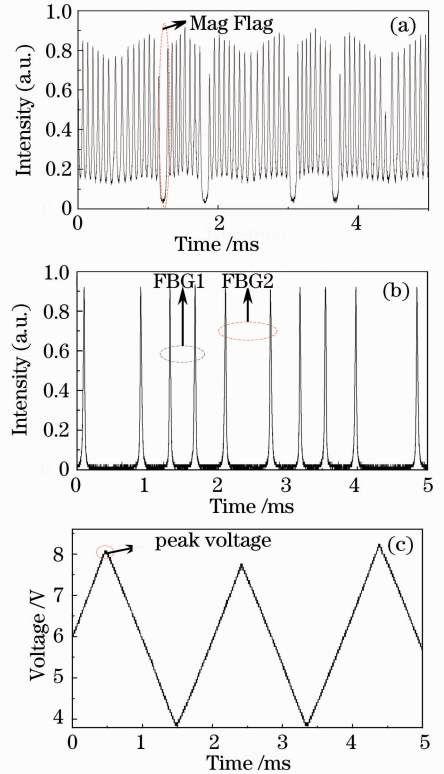


图4 (a)标准具透射谱;(b)重叠双光栅反射谱;(c)可调谐滤波器扫描电压

Fig. 4 (a) Transmission spectrum of FPIF; (b) reflection spectrum of superimposed FBGs; (c) voltage applied to FFP-TF

3.2 动态应变信号解调结果

图5为重叠双光栅在可调谐滤波器平均扫描频率为500 Hz,压电陶瓷的驱动频率为100 Hz,峰值电压为±10 V的正弦波驱动条件下的解调结果,图5(a)为重叠双光栅经时域重构后的解调结果,具体的时域重构方法参见文献^[6],图5(b)为对应离散傅里叶变换(DFT)后的频域信号解调结果,由图可知,由于动态应变信号的频率较低,时域与频域上都

可以直接地还原出原始动态应变的特性,且频域解

调结果中已经没有了混叠信号。

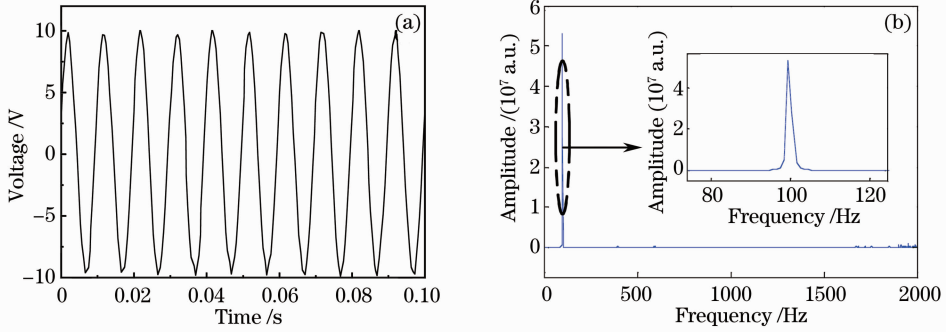


图 5 (a) 100 Hz 动态应变时域解调结果;(b) 100 Hz 动态应变频域解调结果

Fig. 5 (a) Reconstructed results of 100 Hz dynamic strain in the time domain; (b) non-uniform DFT spectral results of 100 Hz dynamic strain

图 6 为重叠双光栅在可调谐滤波器平均扫描频率为 500 Hz,压电陶瓷的驱动频率为 1.9 kHz,峰峰值为 ±5 V 的正弦波驱动条件下的解调结果,其中图 6(a)为时域解调结果,图 6(b)为对应频域解调结果。从图中可以看出,由于不满足采样定理,且动态应变的信号频率远远超过了可调谐滤波器的平均扫描频率,接近了重叠双光纤光栅传感脉冲的平均

采样频率 2 kHz,所以在时域上已经无法分辨出原始的动态应变信号特性,而离散傅里叶变换后的频域解调结果却与原始动态应变特性一致。由此可见,基于随机非均匀采样的重叠多光栅动态应变解调方法可有效提高基于可调谐滤波器的光栅解调系统的动态应变测量带宽,满足了动态应变信号对高速和高精度的需求。

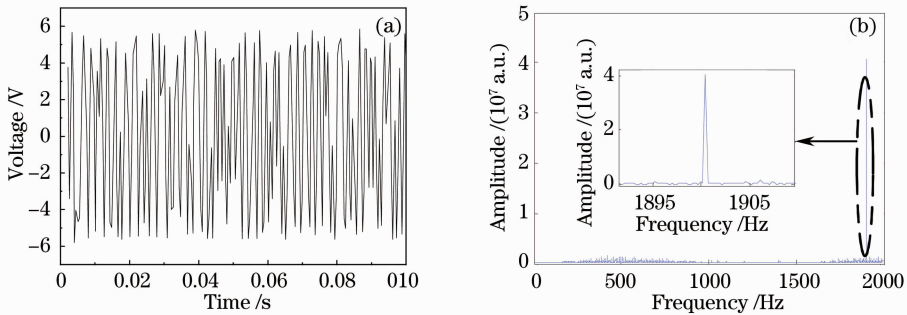


图 6 (a) 1.9 kHz 动态应变信号时域解调结果;(b) 1.9 kHz 动态应变信号频域解调结果

Fig. 6 (a) Reconstructed results of 1.9 kHz dynamic strain in the time domain; (b) non-uniform DFT spectral results of 1.9 kHz dynamic strain

4 结 论

通过分析重叠多光栅解调系统所存在的非均匀采样现象,搭建了基于可调谐滤波器三角波扫描周期随机变化的重叠双光栅解调系统,在 500 Hz 可调谐滤波器平均扫描速率的条件下,实现了高达 1.9 kHz 的动态应变信号传感与测量。研究获得以下主要结论:

- 1) 三角波扫描周期随机变化的幅度在一定的范围内,对动态应变信号测量带宽的影响不大。
- 2) 实验中由于重叠双光栅反射谱形状、采集信噪比及信号重构等因素影响,在采用重叠双光栅及 500 Hz 可调谐滤波器扫描速率的条件下,只能实现

2 kHz 左右动态应变信号的测量,但已经相当于单光栅所能实现的动态应变信号测量带宽的 8 倍。

参 考 文 献

- 1 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0404005. 杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0404005.
- 2 Pi Haoyang, Liu Qiong, Ye Qing, *et al.*. Analysis and experimental study of inner stress for metallized fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305008. 皮浩洋, 刘琼, 叶青, 等. 金属化光纤光栅内应力的分析和实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305008.
- 3 Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong, *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on stokes parameters of fiber gratings

- [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605003.
- 叶振兴, 苏 洋, 朱 勇, 等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605003.
- 4 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.
- 5 Othonos A, Lee X, Measures R M. Superimposed multiple Bragg gratings [J]. Electron Lett, 1994, 30(23): 1972–1973.
- 6 Ma Y C, Yang Y H, Li J M, *et al.*. Dynamic and static strain gauge using superimposed fiber Bragg gratings[J]. Meas Sci Technol, 2012, 23(10): 105202.
- 7 Wang Anmin, Wang Shu, Chen Mingxin. A novel nonuniform sampling method and processing system to overcome the nyquist limit and suppress the noise[C]. Proc. 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004, 5: 3842–3845.
- 8 Yang Yuanhong, Ma Youchun, Yang Minwei. High performance FBG interrogation technology with scan fiber laser[C]. SPIE, 2010, 7853: 785307.

栏目编辑: 王晓球