

基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络

张燕君 谢晓鹏 毕卫红*

(燕山大学信息科学与工程学院,河北省特种光纤与光纤传感重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出一种基于弱光栅的新型高速高复用分布式温度传感网络。通过自制可调谐多波长光源代替可调谐激光器以解决其存在的监测时间长、系统实时性差的问题。在一根光纤上刻制 3 个中心波长分别为 1529.488、1545.202、1557.100 nm 的高反射低带宽的光纤布拉格光栅(FBG),再刻制 3 组反射率为 3%,中心波长分别为 1529.488、1545.202、1557.100 nm 的 9 个 FBG,并将其等距连接。以高反射 FBG 的反射光作为系统光源,以弱光栅作为监测光栅,结合光波分复用技术与光时域反射技术,进行温度实验。实验结果表明,在 5 °C~80 °C 的温度范围内,各个弱反射 FBG 的中心波长随温度呈良好的线性变化,温度测量的误差为±0.5 °C,空间分辨率为 10 m。

关键词 传感器;弱光栅;高速复用;分布式;温度

中图分类号 TN253; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0405006

High-Speed High-Multiplexing Distributed Temperature Sensor Network Based on Weak-Reflection Fiber Gratings

Zhang Yanjun Xie Xiaopeng Bi Weihong

(Hebei Provincial Key Laboratory of Special Fiber and Fiber Sensor, Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings is proposed. In order to solve problems such as long monitoring time and poor real-time performance of the system, a multiple-wavelength light source is used instead of tunable laser. Three fiber Bragg gratings (FBG) with high reflectivity and low bandwidth are carved on a single fiber and their central wavelengths are 1529.488, 1545.202 and 1557.100 nm, respectively. Another three groups of nine FBG whose central wavelengths are 1529.488, 1545.202 and 1557.100 nm with 3% reflectivity are carved equidistantly on the same fiber. Light from the high-reflection FBG is used as the light source of the system and the weak gratings are used as the monitoring gratings. The experimental results show that, in the temperature range of 5 °C~80 °C, the central wavelength of each weak-reflection FBG changes linearly as the temperature changes, and the error of temperature measurement is ±0.5 °C and spatial resolving power is 10 m.

Key words sensors; weak grating; high-speed high-multiplexing; distributed; temperature

OCIS codes 060.3735; 060.4230; 120.4825; 280.4788

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)因其高灵敏度、抗电磁干扰以及易于网络化的优点成为光纤传感器领域的研究热点之一^[1],尤其弱光栅以其高复用、高精度的

优势在分布式光纤传感系统中得到快速的发展。文献[2]给出了弱反射光栅的理论复用个数以及复用的优势;文献[3~5]给出弱光栅实际的应用;文献[6]指出超弱光栅理论上可复用 1200 个,在其实验

收稿日期: 2012-11-29; 收到修改稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)资助课题。

作者简介: 张燕君(1973—),女,博士,副教授,主要从事光传感、光电检测与信号处理等方面的研究。

E-mail: ysuyjzhang@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: bwhong@ysu.edu.cn

中通过复用 12 个获得较高的测量精度,上述文献都说明了弱反射光栅的应用性和高复用性。文献[7]提出的波分复用和光时域技术结合的新传感网络增加了弱光栅的复用数量,但是由于采用可调谐激光器作为光源输入,其系统的监测时间较长,系统的实时性较差。

本文提出一种基于弱反射布拉格光栅的新型分布式温度传感网络。通过自制可调谐多波长光源同时输出中心波长分别为 1529.488、1545.202、1557.100 nm 的 3 种可调谐光作为驱动光源。监测光栅采用反射率约为 3% 的弱光栅,中心波长依次为 1529.488、1545.202、1557.100 nm 的 FBG 为 1 组,共重复刻制 3 组 9 个光栅在一根光纤上,实现了准分布式的测量。在弱光栅复用的基础上,设计了可调谐多中心波长光源,与采用窄带激光器作为驱动的方案相比较,有效地缩短了测量时间。

2 传感原理与理论分析

2.1 系统原理

图 1 为系统结构图。系统光源采用自制可调谐多中心波长光源,其输入多波长光由电光调制器(EMO)调制成脉冲信号,经过环形器后送至与高反射光栅中心波长相对应的弱光栅阵列传感器里,弱光栅的反射光谱由光电探测器(PD)检测,通过高速数据采集卡进行数据采集,最后对采集的数据进行高斯拟合处理。此传感系统通过不同中心波长的弱光栅的波分复用(WDM)技术提高光栅的复用容量,利用相同中心波长弱光栅的光时域反射技术(OTDR)对各个节点进行实时监测。在满足解调精度的条件下,与文献[8]中使用窄带可调谐激光器作为系统光源相比缩短了测调时间。

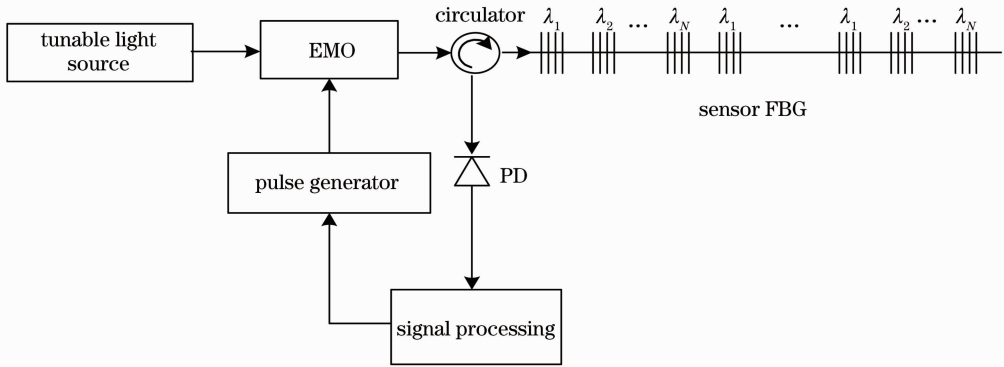


图 1 高速高复用分布式弱光栅传感结构图

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed high-multiplex distributed weak grating sensing system

图 2 为可调谐多中心波长光源原理图,其中图 2(a)为系统光源结构图,采用平坦的宽带光源(ASE),输出光信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)信号放大,通过环形器进入平行嵌夹在位移装置的高反射光栅(反射率大于 90%,3 dB 带宽小于 0.2 nm)阵列,对位移装置进行微调,各个光栅受到均匀轴向应

力,使反射光的中心波长均匀同向漂移,由于 FBG 只反射其特定波长的光^[8],在保持环境温度不变的情况下,光纤光栅中心反射波长的变化量与拉力变化量的关系为^[9]

$$\Delta\lambda = \lambda \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \right\} \Delta\epsilon, \quad (1)$$

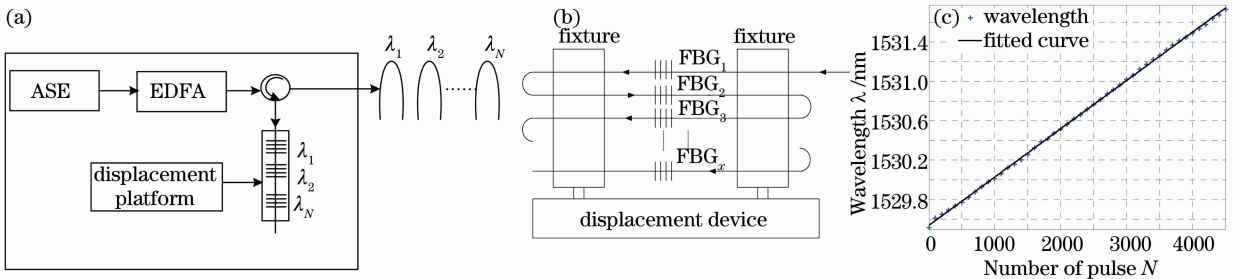


图 2 系统光源原理图。(a)系统光源结构;(b)高反光栅阵列;(c)光栅反射光与位移脉冲控制量输出关系

Fig. 2 Diagram of system's light source. (a) Structure of system's light source; (b) high-reflection FBG array; (c) output relation between wavelength of the grating's reflection light and displacement pulse

式中 λ 为中心波长, $\Delta\epsilon$ 为轴向应变, ρ_{11} 和 ρ_{12} 分别为光纤的应变张量, ν 为泊松比。

由(1)式可以得出光栅的中心波长和光栅对应的均匀拉力呈线性关系,因而可重复调控出中心波长均匀漂移的反射光,并以此作为监测弱反射光栅的驱动光源。图 2(c)为位移装置位移脉冲控制量 N 为 100 时,对应光栅中心波长 λ 漂移约为 50 pm。其对应线性关系为

$$\lambda = 0.00049N + 1529.427. \quad (2)$$

2.2 传感原理

传感光栅阵列选择中心波长为 $\lambda_1, \lambda_2 \dots$ 和 λ_N 的

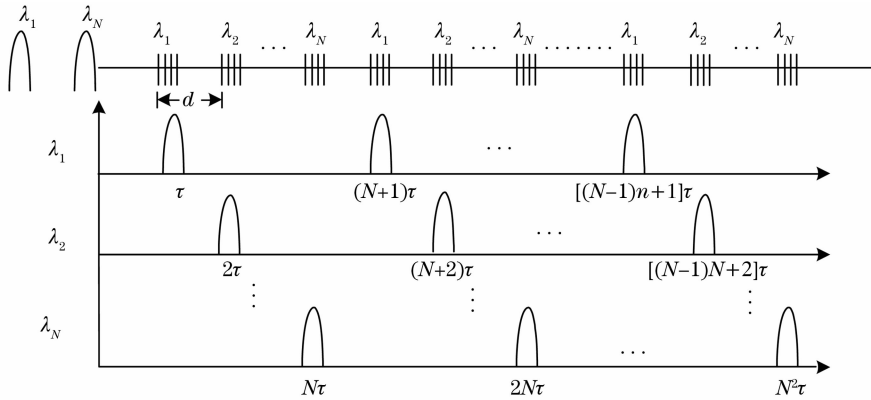


图 3 传感原理时序图

Fig. 3 Timing diagram of sensing principle

2.3 弱反射光栅的时分复用容量分析

系统监测光栅阵列在外界条件一致时,相同中心波长光栅的多次反射会产生串扰。对同一中心波长的光栅,第 N 个光栅直接反射回来的光强为

$$I_N = I_0 R (1 - R)^{2(N-1)}, \quad (4)$$

式中 I_N 为反射光强, I_0 为入射光强, R 为光栅反射率。

解调时探测器将会同时检测到多个在相同距离的路径下的反射信号,但是对于低反射率的光栅而言,经过光栅的多次反射使得光强变得很小,因此仅需考虑光栅的一阶反射串扰,其一阶反射串扰总光强为^[7]

$$I_K = \frac{(N-1)(N-2)}{2} \times I_0 R^3 (1-R)^{2(N-2)}, \quad (5)$$

$N(N \geq 3)$ 为复用光栅个数。

为了系统的监测不受到一阶反射串扰的干扰必须满足 $I_N > 10I_K$ 。表 1 为各个不同反射率光栅下时分复用的容量。表格说明光栅反射率越低,其复用容量越大。

弱光栅,光栅工作范围互不重叠,并如图 3 依次等间距刻制在一根光纤上,相邻光栅间距为 d ,单位为 m,则相邻弱光栅的反射光由 OTDR 检测的时间差 τ 为

$$\tau = \frac{2dn}{c}, \quad (3)$$

式中 d 是在相邻弱光栅之间的距离, n 为光纤的有效折射率, c 为真空中的光速。

在 $N^2\tau$ 的时间内,由 OTDR 可对所有光栅反射回来的光信号进行光电转换,通过高速数据采集卡采样处理,解调出全部光栅的中心波长,从而对环境温度进行实时监测。

表 1 光栅复用容量表

Table 1 Capacity chart of multiplexing gratings

Reflectivity of grating /%	Theoretical multiplexing capacity
1	47
2	24
3	17
4	14
5	11
6	9

2.4 解调原理

FBG 的反射波形一般近似为高斯型^[10],其反射谱为

$$B_i(\lambda) = b_i \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{bi})^2}{\Delta\lambda_{bi}^2}\right], \quad (6)$$

式中 b_i 为 FBG 反射率, λ_{bi} 为高斯波形的中心波长, $\Delta\lambda_{bi}$ 为高斯波形的半谱宽。

通过位移装置均匀拉动高反光栅的反射光依次进入弱光栅阵列中,反射光逐渐向弱光栅中心波长靠近,当与中心波长完全匹配时检测反射光强达到最大值,经过光电转换器转换,再利用高速数据采集

卡采集各个弱光栅反射的信号,采集信号的波形可拟合为高斯型^[11],如图4所示,其中 $\Delta\lambda$ 为驱动光源中心波长移动步长。用布拉格光栅的监测温度范围为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时漂移约为 1 nm ,因此通过位移装置对高反光栅进行反复拉动 2 nm ,可以实现利用弱光栅进行反复监测。

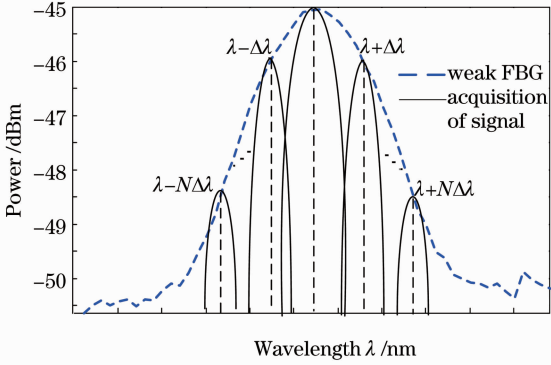


图4 高斯拟合原理图

Fig. 4 Gaussian fitting principle diagram

3 实验分析

由于宽带光源平坦区域的条件限制,只复用3种反射率为3%,中心波长 λ_1 为 1529.488 nm 、 λ_2 为 1545.202 nm 和 λ_3 为 1557.100 nm 的光栅各3个,且对其进行依次标号为 FBG_{11} 、 FBG_{21} 、 FBG_{31} 、 FBG_{12} 、 FBG_{22} 、 FBG_{32} 、 FBG_{13} 、 FBG_{23} 和 FBG_{33} ,相邻光栅用 10 m 单模光纤连接。把光栅反射光由电光调制器调制线宽 40 ns 、周期为 $2\text{ }\mu\text{s}$ 的脉冲信号,通过环形器后送至光栅阵列传感器里,由光电探测器检测,通过 200 MS/s 的高速数据采集卡进行数据采集处理。

由于弱光栅的反射率较低,即反射的信号比较小,在传输的过程中易受到噪声干扰,尤其在光电转换的时候,电信号的噪声对其有很大干扰,采集信号难以分辨,如图5(a)所示。实际上在每一个位移步进的中心波长下,输入100个脉冲,对100个脉冲的反射信号叠加取平均,以提高系统的信号噪声比(SNR)。采集图形如图5(b)所示。

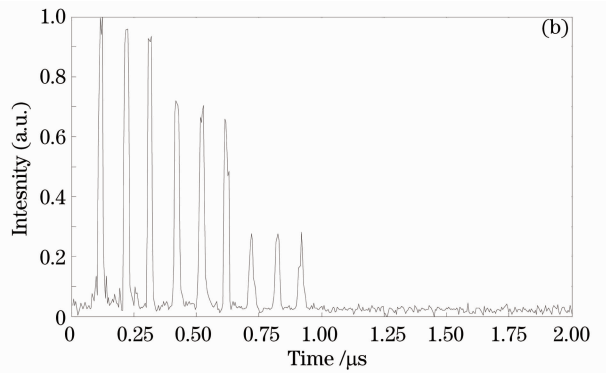
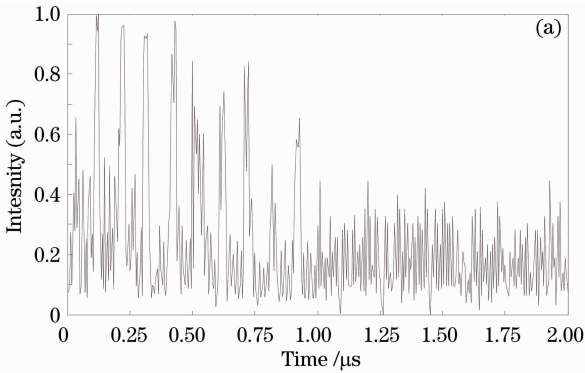


图5 系统数据采集。(a)未过去噪的数据采集;(b)叠加上去噪后的数据采集

Fig. 5 System data acquisition. (a) Undenoised data acquisition; (b) denoised data acquisition

3.1 复用分析

实验所用弱光栅反射率为3%,通过表1可知,理论上能够复用17个,但是受到系统宽带光源光强的限制和光电探测器检测范围的影响,加之每个光栅外接 10 m 的普通单模光纤,在复用第4个光栅的时候,监测的信号极其微弱,以至于不能对后期的信号进行拟合处理。但如果通过提高系统光强和改变光电探测器的能力,则可复用更多容量的光栅。

3.2 温度拟合

对室温下中心波长为 1529.488 nm 弱光栅进行拟合实验,采用不同的步进波长验证,其高斯拟合图如图6所示。对于图4中 $\Delta\lambda$ 进行不同的调节, $\Delta\lambda$ 越小,拟合准确度越高,但是所需时间越长,图6展示了3种不同 $\Delta\lambda$ 分别为 10 、 25 、 50 pm 时的高斯拟合图

型,其得到的光栅中心波长分别为 1529.487 、 1529.491 、 1529.483 nm 。温度误差分别为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。即当 $\Delta\lambda=50\text{ pm}$ 时,温度误差在允许的范围内,因此经过实验验证通过调节位置装置使高反光栅的中心波长步进波长为 50 pm 时,可在不影响精确度的情况下减少测量的时间,同时并能够同时对9个光栅进行数据采集和拟合,这大大减少了光栅的监测时间。

宽带光源的光谱只是近似平坦的,在某一波段可能存在不平坦的区域,当通过EDFA前向放大时可能使入射光谱出现较大波动,使相对应的光栅反射信号的强度变大,因此在拟合时对采集的实验点产生一定的影响,使图形拟合时出现较大的误差,如图7所示。通过提高宽带光源的平坦区域,可以使

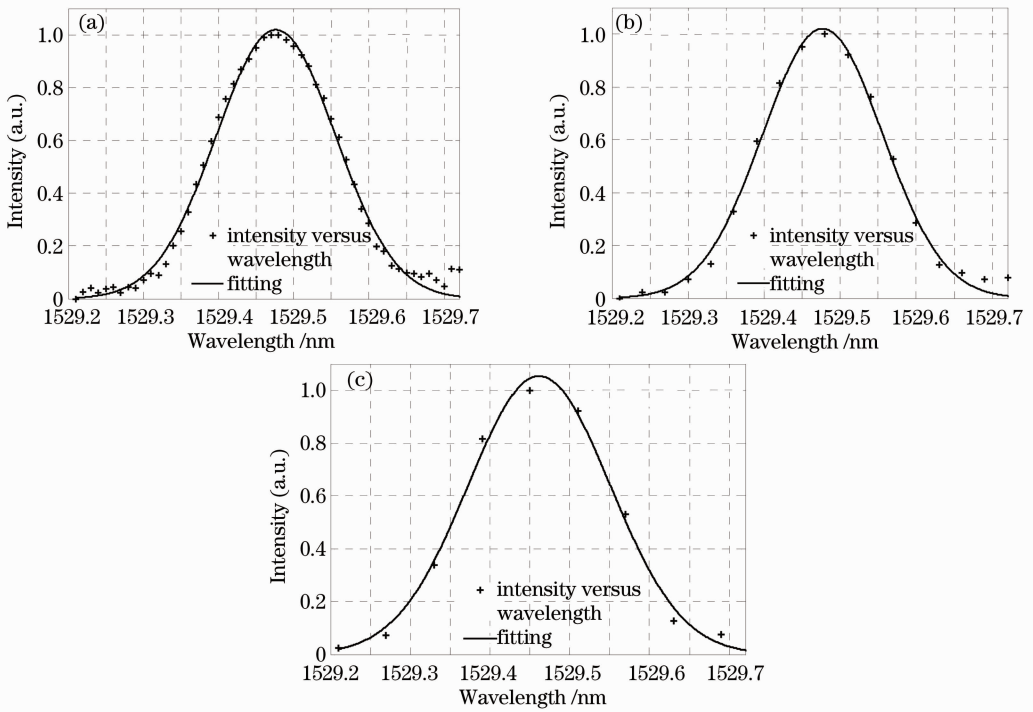


图6 不同步进波长下的高斯拟合。(a) 10 pm; (b) 25 pm; (c) 50 pm

Fig. 6 Gaussian fitting with different step wavelengths. (a) 10 pm; (b) 25 pm; (c) 50 pm

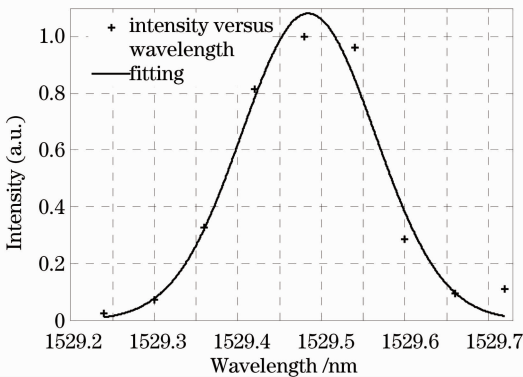


图7 拟合误差图

Fig. 7 Fitting-error diagram

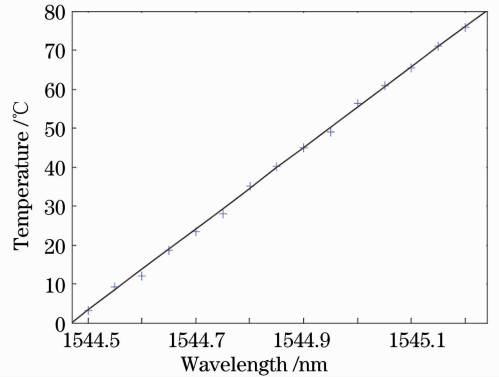


图8 FBG 温度拟合图

Fig. 8 Fitted FBG temperature

光栅的复用数量和拟合精度都有很大的提高。

3.3 温度标定

把光栅 FBG₂₂ 放置水浴箱里, 设置温度由 5 °C ~ 80 °C, 每 5 °C 对所有光栅测量一次, 并对光栅 FBG₂₂ 进行温度标定, 其拟合图形如图 8 所示。

根据实验结果, 利用最小二乘法拟合, 可获得光栅 FBG₂₂ 的波长-温度线性关系为

$$T_{m1} = 20 + 104 \times (\lambda - 1544.660), \quad (7)$$

式中 T_{m1} 单位为 °C, λ 单位为 nm。从中可知, 中心波长 1544.660 nm, 温度敏感系数为 10.4 pm/°C, 拟合度 R^2 为 95%。

4 结 论

本文设计一种新型高速高复用的光栅分布式系统, 将高反射光栅与弱光栅结合使用, 利用波分复用与光时域反射技术, 以提高光栅的复用容量和减少系统测量时间。在 5 °C ~ 80 °C 的温度范围内, FBG 的中心波长随温度呈良好的线性变化, 线性度达到 95%, 温度误差只有 0.5 °C, 空间分辨率为 10 m。系统很好地实现了分布式多点温度的监测, 且相对于可调谐激光器作为系统光源的系统能够大大缩短监测时间, 具有较好的前景。虽然系统可以再增加更多不同中心波长的光栅, 以提高空间分辨率和复

用容量,但是受到宽带光源平坦频域的限制,复用容量不能无限大。光栅在在监测中受到噪声的干涉,对采集到的数据有影响,对拟合图形的中心波长带来较大误差,通过提高光电转换器的性能和采用叠加消噪算法可以减少噪声的干扰。

参 考 文 献

- 1 Pang Dandan, Sui Qingmei, Jiang Mingshun. New fiber Bragg grating high temperature sensing network based on diffraction demodulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105005
庞丹丹, 隋青美, 姜明顺. 基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105005
- 2 J. Liu, J. Zhang, X. Li *et al.*. Study on multiplexing ability of identical fiber Bragg gratings in a single fiber [J]. *Chinese J. Aeronautics*, 2011, **24**(5): 607~612
- 3 Zhang Pengbo, Hu Liaolin, Hua Dengxin *et al.*. Design of dual lasers driving circuits in optical time domain reflectometry-fiber Bragg grating sensing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0405002
章鹏博, 胡辽林, 华灯鑫等. 光时域反射光纤光栅传感系统中双激光器的驱动设计[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0405002
- 4 C. Crunelle, M. Wuilpart, C. Caucheteur *et al.*. Original interrogation system for quasi-distributed FBG-based temperature sensor with fast demodulation technique [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, **150**(2): 192~198
- 5 C. Crunelle, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Quasi-distributed temperature sensor combining fibre Bragg gratings and temporal reflectometry technique interrogation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(3-4): 412~418
- 6 Y. Wang, J. Gong, D. Y. Wang *et al.*. A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber Bragg gratings[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(2): 70~72
- 7 Zhang Yanjun, Xie Xiaopeng, Xu Huabin. Distributed temperature sensor system based on weak reflection fiber gratings combined with WDM and OTDR [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(8): 69~74
张燕君, 谢晓鹏, 徐华斌. WDM与OTDR结合的弱光栅分布式温度传感网络[J]. *光电工程*, 2012, **39**(8): 69~74
- 8 Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105004
张晓丽, 梁大开, 芦吉云等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105004
- 9 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 89~91
张颖, 刘志国, 郭转运等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 89~91
- 10 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 11 Cui Jian, Dong Xiaopeng, Wu Zhaoxi *et al.*. A high-precision method for determining the FBG peak wavelength shift based on FBG actual reflection spectrum match[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0705001
崔剑, 董小鹏, 吴兆喜等. 基于FBG实际反射谱匹配的FBG峰值波长偏移量的高精度确定方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0705001

栏目编辑: 王晓琰