

基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究

张满亮 孙琪真 王 梓 李晓磊 刘海荣 刘德明

(华中科技大学光电科学与工程学院, 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 利用弱反射光栅低反射率的特性, 提出了基于全同弱布拉格反射光栅的分布式光纤传感方案。采用“光波长时域反射”解调技术, 进行定位和解调, 实现高密度的准分布式传感。从理论上分析了光纤光栅反射率、光栅单元间隔以及传输损耗等对传感系统复用容量的影响。结果表明, 这种方法可以有效提高光栅传感系统的复用容量, 并降低信号解调成本。实验验证了该方案的可行性, 系统复用了4个反射率为6%的光纤布拉格光栅(FBG), 实现了单点、多点测量, 温度测量的分辨力达到0.12℃。

关键词 光纤光栅; 弱布拉格反射; 分布式传感; 光波长时域反射

中图分类号 TN253; TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.080604

Investigation on Distributed Optical Fiber Sensor Based on Identical-Low-Reflective Fiber Gratings

Zhang Manliang Sun Qizhen Wang Zi Li Xiaolei Liu Hairong Liu Deming

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract By exploiting the low reflectivity of low-Bragg-reflective fiber grating, the distributed optical fiber sensing scheme based on identical-low-Bragg-reflective fiber gratings is proposed, theoretically analyzed and experimentally studied. The demodulation technology named "optical wavelength time-domain reflection", which utilizes the optical power variation of reflected sensing signal in both time domain and wavelength domain, is adopted. The influence of reflectivity of fiber grating, interval between adjacent gratings and transmission loss of delay fiber on the multiplexing capacity of the sensing system are also discussed. Results demonstrate that this sensing scheme can increase the multiplexing capacity of sensing system effectively, implement multi-point measurement and reduce the cost of signal demodulation. Experiments on this scheme are conducted to prove its feasibility. Four fiber Bragg gratings (FBG) with the reflectivity of 6% are multiplexed in this system, which agrees with the calculation result. The resolution of 0.12℃ for temperature measurement is obtained.

Key words fiber grating; low-Bragg-reflective; distributed sensing; optical wavelength time-domain reflection

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735; 060.4230

1 引言

光纤传感器近年来引起了人们的很大关注, 它由单点检测逐渐发展成为多点准分布式和全分布式检测^[1~3]。分布式光纤传感技术是利用光纤的一维空间连续特性进行测量的技术, 由于其能够实现大范围测量场中分布信息的提取, 可以解决目前测量领域的众多难题, 成为了国内外的研究热点之一^[4~6]。在各种已经报道的分布式光纤传感技术中, 基于光纤布拉格光栅(FBG)复用的准分布式复用技术由于其自身对温度、应力应变、振动等外界物理参量的高传感灵敏度, 以及体积小、动态区间宽、可靠性高等突出优点, 成为目前光纤传感领域内最有力的竞争者之一。由于FBG具有良好的波长调制特性, 波分复用(WDM)技术成为了

收稿日期: 2011-03-03; **收到修改稿日期**: 2011-03-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60937002)、华中科技大学自主创新研究基金(Q2009026)和国家自然科学基金青年科学基金(60907037)资助课题。

作者简介: 张满亮(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感、光纤通信等方面的研究。

E-mail: zhangmanliang3333@126.com

导师简介: 孙琪真(1982—), 女, 副研究员, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: qzsun@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

最广泛的复用方式之一。然而,又正是由于波长调制的特性,每个 FBG 传感单元都需要占用一定的带宽,且彼此之间不能出现频域的重叠。因此,WDM 技术受到光源谱宽度的限制,复用容量只能达到 10 个左右^[7~10]。针对 WDM 技术的缺点提出的多波长编码复用技术,虽然可以在一定程度上增加分布式传感单元的复用容量,但却不可避免地带来高技术难度与高系统成本。时分复用(TDM)技术可以在时域上大大增加传感单元的复用数量,但考虑到传输的衰减以及光源强度有限,复用的光栅数目也都小于 10 个^[7]。WDM 和 TDM 的混合复用技术^[11],以及频分复用(FDM)技术、码分多址复用(CDMA)技术等,虽然都在一定程度上提高了 FBG 传感单元的复用容量,但都在一定程度上受到带宽和传输损耗的限制^[12,13]。

针对现有的分布式光纤传感技术存在的问题,本文提出一种新的基于弱反射光栅光纤的分布式传感系统,其传感光栅采用全同弱反射布拉格光纤光栅。由于其窄带宽、弱反射的特点,光源谱宽与传输损耗的限制大大减小,复用容量与传感距离相应大幅提高。采用“光波长时域反射”(OWTDR)解调技术,进行定位和解调,实现高密度的准分布式传感。

2 方案设计和理论分析

2.1 方案设计

图 1 所示为基于弱反射光栅光纤的分布式传感方法原理图。弱反射布拉格光纤光栅阵列作为系统的传感单元,这些弱反射光纤光栅反射率、中心波长和带宽等光学参数均相同,称为“全同”光栅。信号光入射到达弱反射光纤光栅时,与光纤光栅的中心波长一致的很小一部分信号光被光纤光栅反射回来,剩余的大部分光继续向前传输直到下一个弱反射光纤光栅,继续发生同样的作用,接着继续如此进行下去,直到序列中的最后一个光栅。最后只需要分析探测系统接收到的光栅中心波长的变化情况,就可以实现阵列中每个光栅的传感功能。这种光栅阵列的光波传输特性类似光纤中的非线性后向散射效应,如后向拉曼散射、后向布里渊散射等,能够实现长距离、无遗漏的分布式传感检测。同时与后向散射效应相比,其反射率高出 5~6 个数量级,因此能实现的传感精度比利用散射的分布式传感高出许多。

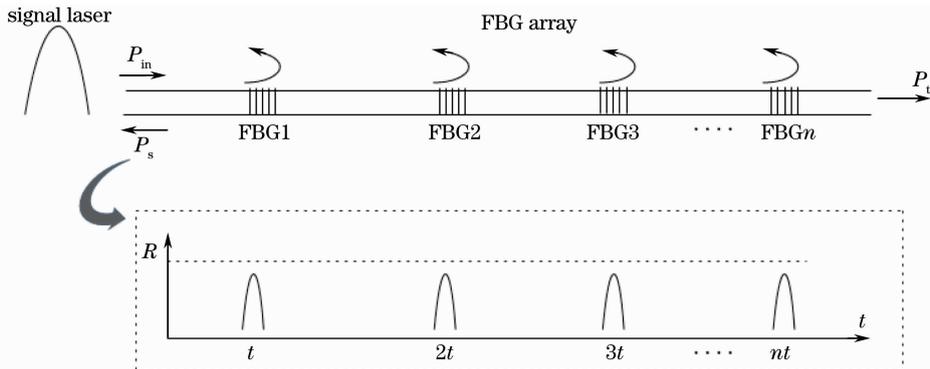


图 1 基于弱反射光栅光纤的分布式传感方法原理图

Fig. 1 Distributed optical fiber sensing scheme based on identical-low-Bragg-reflective fiber gratings

2.2 “光波长时域反射”传感信号解调技术

图 2 所示为光纤光栅解调示意图,光源输出一定重复频率的窄脉冲序列,同时输出波长周期性连续调谐变化,从源头上实现波长扫描。在某一时刻,特定波长的激光光脉冲输入弱布拉格反射光纤光栅阵列,如果某一个光纤光栅的中心波长因为外界参量作用漂移至与入射激光波长一致,则输入光脉冲在此光纤光栅位置发生后向散射,部分脉冲光强被反射,于是返回一个光脉冲到达光电探测器;否则入射光脉冲将完全透射一直向前传输,直至遇到能够对此波长反射的光纤光栅。一方面,通过反射光强与激光波长之间的关系,可以计算出中心波长漂移量,从而推算出被测量的大小;另一方面,通过反射光强与时间之间的关系,可以测量出反射光脉冲和输入光脉冲的时间延迟,从而测算出被测量的空间位置。激光器波长在调谐带宽内快速地连续变化一个周期,对应遍历整个测量范围内所有值,因此可测量分布式光纤沿线的场分布。这是一种基于传感光信号强度随时间域和波长域二元变化关系的分布式传感解调技术,称为“光波长时域反射”解调技术。

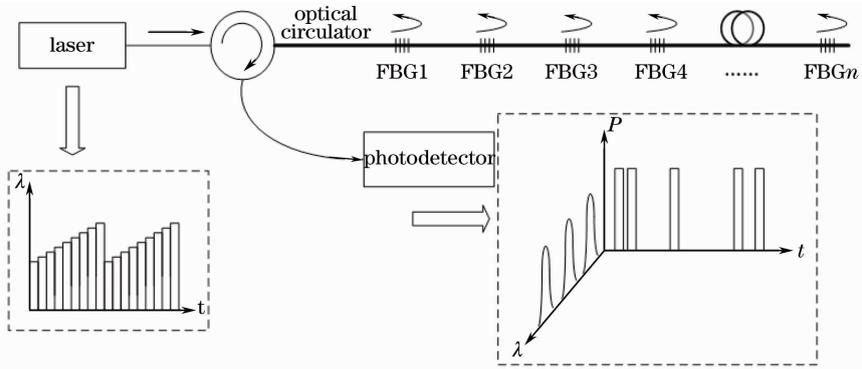


图 2 OWTDR 的工作原理

Fig. 2 Operation principle of OWTDR

2.3 传感系统的容量分析

考虑到实际应用中,光纤传输损耗、瑞利散射极限、光纤光栅单元之间多途径反射以及光电探测器的探测极限和动态范围等因素均会影响系统的复用容量,可以将这些限制条件归纳如下。

1) 为了有效提取信号光信息,应使得光纤光栅自身反射回来的信号光功率远远大于后向散射光功率,即满足 $P_{\text{FBG}}(n) \geq 10P_{\text{Rayleigh}}$ 。

2) 由于传感系统使用的是弱反射光纤光栅,反射率很低,各级多反射光强度相差很大,比如若光栅的反射率为 1%,各级多反射光的强度相差 10^4 量级,因此只考虑一级多反射的情况。图 3 给出了串接 4 个光纤光栅情况下的光纤光栅自身反射和光栅之间的一级多反射路径示意图,为了避免光纤光栅之间多次反射引起的干涉效应,将光纤光栅之间设计成非等间隔,保证光纤光栅自身反射和一级多反射的光程差大于光源的相干长度。为了有效区分信号光和多次反射光,应使信号光强远远大于一级多反射光强,即 $P_{\text{FBG}}(n) \geq 10P_{\text{mr}}$ 。

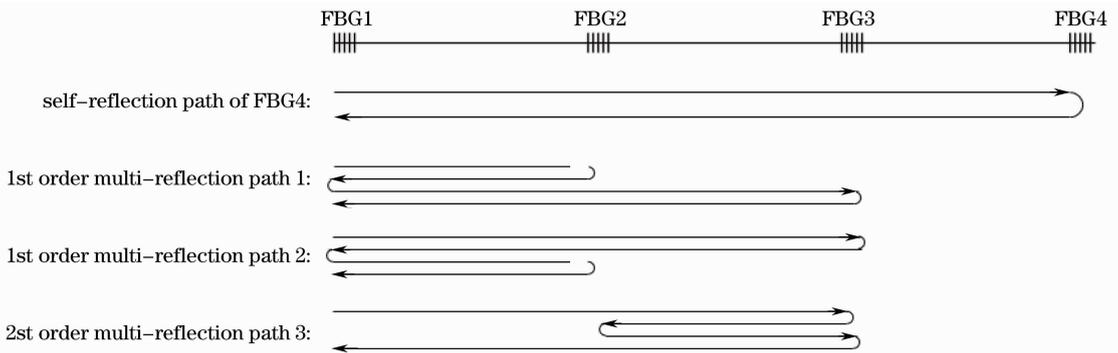


图 3 一级多反射路径示意图

Fig. 3 Paths of the first order multi-reflections

3) 考虑到光电探测器的极限和动态范围,最后一个光纤光栅反射回来的信号光强必须大于光电探测器的探测极限,而且第一个光纤光栅和最后一个光纤光栅反射回来的信号光强差必须在光电探测器的动态范围内。

结合上述 3 个限制条件,用 Matlab 进行了仿真计算,其中设定光纤损耗为 0.16 dB/km,瑞利散射系数为 $10^{-7}/\text{m}$,光源相干长度 15 cm,光纤光栅之间间隔从 20 m 开始,以 7.5 cm 等差递增,光纤光栅反射率为 0.1%~10%,初始入射光功率为 -10 dBm,光电探测器的探测极限为 -50 dBm,动态范围 25 dB。图 4 给出的是非等间距情况下光纤光栅串联复用数与光纤光栅反射

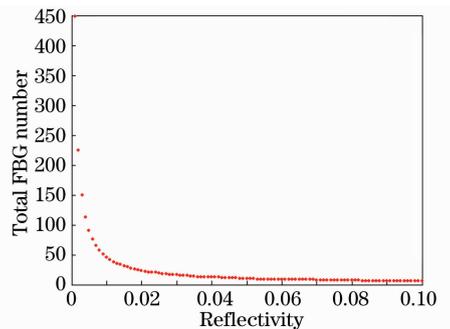


图 4 光纤光栅复用数与反射率的关系图
Fig. 4 Relationship between multiplexing capacity and reflectivity of FBG

率的分析结果图,从图中可以看出,光纤光栅反射率为 0.1% 时,复用数目可以达到 450 个。

3 实验及结果分析

通过分布式温度传感实验来验证方案的可行性,采用的系统框图如图 5 所示。实验中将可调谐激光器作为系统光源,输出窄带直流光通过由脉冲函数发生器驱动的电光调制器在时域上进行强度调制,脉冲光信号通过光环形器进入作为传感载体的弱布拉格反射光纤光栅阵列。由分布式光纤光栅阵列反射的脉冲光信号经过光环形器进入高速光电探测单元。高速探测单元、脉冲函数发生器的电信号都送入数据采集模块,按照“光波长时域反射”解调技术进行数据处理,即可得出空间场内的分布式传感信息。

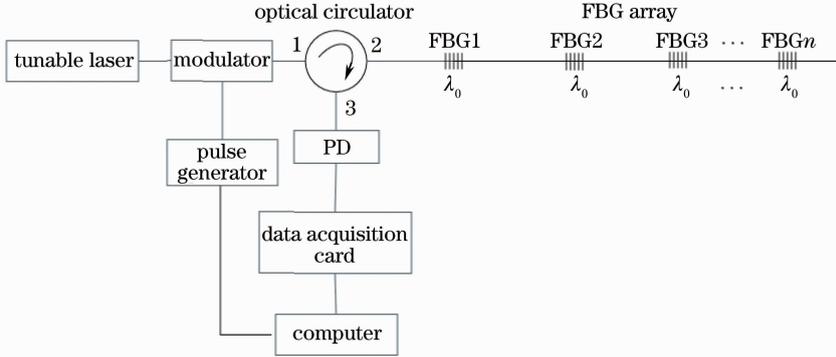


图 5 分布式温度传感系统

Fig. 5 Distributed temperature sensing system

可调谐激光器型号为 FLS-2600B,其输出带宽为 0.02 nm,波长范围为 1510~1612 nm,分辨力为 1 pm,波长精度为 ± 15 pm,电光调制器型号为 SWT-MOD21212,温度控制采用恒温水浴加热设备,保证传感光栅均匀受热;探测单元为高速光电探测器,型号 PFTM91-3,极限探测功率为 -52.10 dBm,动态范围为 25 dB。由高速、高精度数据采集卡进行传感数据采集并送入计算机进行数据处理。

采用紫外光相位掩模技术制备弱布拉格反射光纤光栅,在其上刻制了 4 个全同的弱布拉格反射光纤光栅作为传感单元。将 4 个光纤光栅分别标记为 FBG1,FBG2,FBG3,FBG4,中心波长一致,在常温下均为 1526.412 nm,3 dB 线宽 0.11 nm,反射率约为 6%。图 6 为光纤光栅 FBG1 的光谱图。

调制信号的产生方法是利用现场可编程门阵列(FPGA)板产生周期脉冲电信号,驱动马赫-曾德尔电光调制器,将连续光信号调制成为脉宽 100 ns、周期 $2 \mu\text{s}$ 的脉冲光信号。图 7 所示为可调谐激光器波长为 1526.412 nm 时,由分布式传感光纤反射回来的传感信号的时域波形,其中连续 4 个脉冲序列分别对应 FBG1~FBG4 这 4 个传感光栅的反射光脉冲。

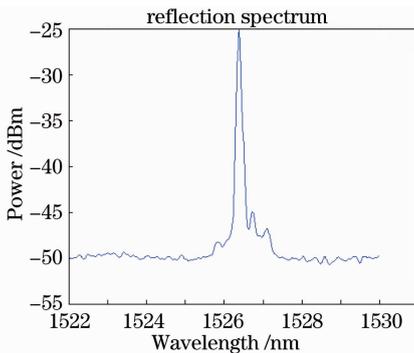


图 6 光纤光栅 FBG1 的光谱图

Fig. 6 Spectrum of FBG1

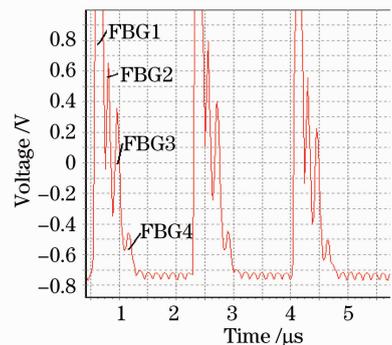


图 7 脉冲光信号的时域波形

Fig. 7 Time domain waveform of sensing signal

对光纤光栅进行了温度标定,标定结果为

$$\lambda_{sc} = 0.0087T + 1526.248(\text{nm}). \quad (1)$$

1) 单点的测量

对 FBG1 水浴加热升高温度,在某个确定的温度条件下,调节可调谐激光器输出波长,可以观察到 FBG1 对应的时域反射脉冲信号从无到有,幅值由小到大再变小的过程。时域反射波形幅值最大时,对应光栅反射谱中心波长,此时可调谐激光器的示数即为 FBG1 当前中心波长。温度变化范围在 20 ℃~70 ℃,记录不同温度下 FBG1 的反射中心波长,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合曲线如图 8 所示,得出 FBG1 中心波长和温度的线性关系表达式为

$$\lambda_c = 0.0086T + 1526.251(\text{nm}). \quad (2)$$

参照定标结果,根据解调的光纤光栅反射波长可以计算出外界温度的理论值。图 9 为实验中温度的实际测量值和理论值的对比,温度的最大误差为 2.14 ℃,平均误差为 1.13 ℃,该传感系统对温度的分辨力可以达到 0.12 ℃。测量误差主要来源于可调谐激光器的波长精度、温度控制的精度和数据采集卡分辨力。

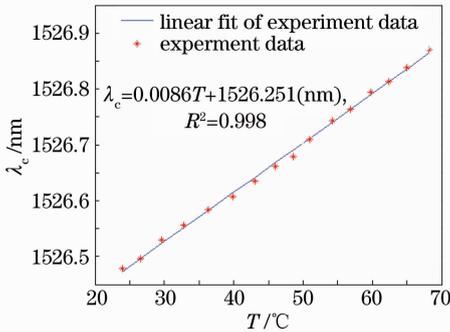


图 8 实验测量的 FBG1 中心波长和温度关系

Fig. 8 Temperature sensing characteristics of FBG1

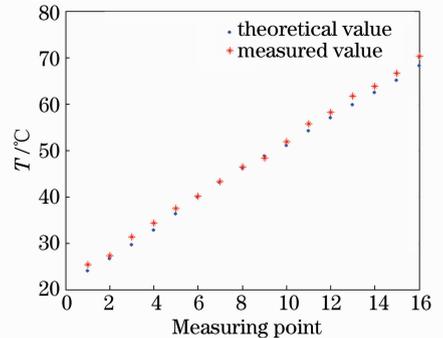


图 9 温度的理论值与实际测量值的对比

Fig. 9 Comparison between the theoretical value and the measured value of external temperature

2) 多点的测量

这种传感方法可以实现多点测量。图 10 是 FBG2 和 FBG3 在同温度条件下测量的时域波形,调节可调谐激光器输出波长,可以观察到 FBG2 和 FBG3 对应的时域反射脉冲信号同时达到最大幅值,说明多点同时测量时,光纤光栅之间互不影响,光纤光栅信息不会丢失。

3) 复用容量分析

当传感光栅反射率为 6% 时,理论上传感单元复用数目可以达到 9 个。但受实验条件所限,制作光纤光栅所用的型号 PSF-GeB-125 光敏光纤自身传输损耗很大,在 1550 nm 处损耗达到 107.298 dB/km,光纤光栅之间的 20 m 延时纤损耗达到 2.15 dB,那么对于第 5 个光纤光栅,光纤的传输损耗将达到 17.2 dB,反射回来的光信号很弱,因此实验中得到 4 个全同光纤光栅的复用度。但是如果选用低损耗光敏光纤或将 G.652 光纤进行载氢处理,制作弱反射光纤光栅即可避免自身传输损耗大和熔接损耗大的问题,从而提高系统的复用容量。

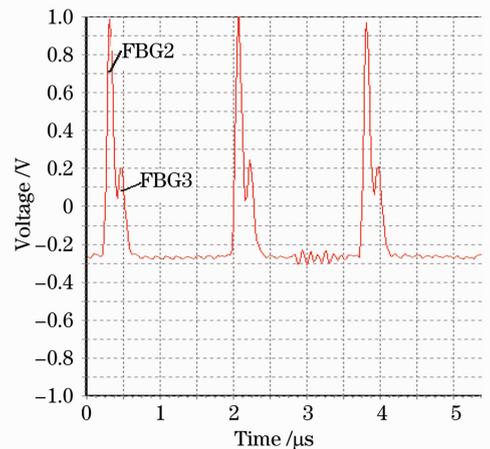


图 10 FBG2 和 FBG3 同温度测量的时域波形

Fig. 10 Time domain waveform of FBG2 and FBG3

4 结 论

利用弱反射光纤光栅的低反射率特性,提出了基于全同弱布拉格反射光栅的分布式光纤传感方案,有效避免了复用容量的限制,通过采用光波长时域反射技术进行定位和解调,实现了高密度的准分布式传感。该种方案简化了解调系统的结构,降低系统成本,极大地提升了复用容量。通过改进光源的调谐精度、降低光纤光栅的反射率以及提高光电探测器的性能等措施可望获得更高的测量精度。

参 考 文 献

- 1 Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15): 151122
- 2 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhenan *et al.*. High precision optical fiber Bragg grating demodulation system based on the source filtering for seismic detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2219~2223
乔学光, 丁 锋, 贾振安 等. 基于光源滤波的高精度光纤光栅地震检波解调系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2219~2223
- 3 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): 1~5
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): 1~5
- 4 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1462
- 5 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 6 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
- 7 Jiang Desheng, Fan Dian, Mei Jiachun *et al.*. Multiplexing/demultiplexing technology based on fiber Bragg grating sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 14~28
姜德生, 范 典, 梅加纯 等. 基于 FBG 传感器的分复用技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(4): 14~28
- 8 S. Abad, F. M. Araujo, L. A. Ferreira *et al.*. Comparative analysis of wavelength-multiplexed photonic-sensor networks using fused biconical WDMs[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(4): 475~483
- 9 D. C. Norman, D. J. Webb, R. D. Pechstedt *et al.*. Extended range interrogation of wavelength division multiplexed fibre Bragg grating sensors using arrayed waveguide grating[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(24): 1714~1716
- 10 Y. Sano, T. Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 132~139
- 11 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
- 12 X. Wan, H. F. Taylor. Multiplexing of FBG sensors using modelocked wavelength-swept fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(21): 1512~1514
- 13 L. C. G. Valente, A. M. B. Braga, A. S. Riberio *et al.*. Combined time and wavelength multiplexing technique of optical fiber grating sensor arrays using commercial OTDR equipment[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(1): 31~35