

doi: 10.3788/gzxb20164507.0706002

基于半导体光纤环形激光器的光纤布喇格 光栅动态应变传感系统

陶传义^{1,2}, 魏鹤鸣²

(1 重庆理工大学 光电信息学院, 重庆 400054)

(2 Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA)

摘 要:提出一种能实时识别外来撞击声发射信号的被动结构健康监测系统. 此系统使用基于半导体光放大器的光纤布喇格光栅传感系统监测高频动态应变, 动态应变引起的光栅反射谱波长移动转化为相位变化, 并被迈克尔逊干涉仪解调. 在迈克尔逊干涉解调仪中, 使用 PID 控制器补偿由温度和大的准静态应变引起的低频漂移. 对光程差和布喇格光栅光谱线宽等参量进行了分析和优化. 利用该解调系统成功地对金属板受到撞击时激发的声发射进行了感测, 可获取的动态应变信号频率高达 197 kHz.

关键词:传感器; 动态应变监测; 半导体光放大器; 光纤布喇格光栅; 干涉仪; 解调

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0706002-6

Dynamic Strain Sensor System Using Fiber Bragg Grating-Tuned Semiconductor Fiber Ring Laser

TAO Chuan-yi^{1,2}, WEI He-ming²

(1 School of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

(2 Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA)

Abstract: A passive structural health monitoring system was presented for sensing foreign-object impact by using a semiconductor optical amplifier-based Fiber Bragg Grating (FBG) sensor that monitors high frequency dynamic strains. Strains applied on the FBG sensors were encoded as wavelength shifts of the light reflected by the FBG sensor which were then converted into phase shifts and demodulated by the Michelson interferometer. A Proportion Integration Differentiation (PID) feedback controller was employed to prevent interference drifting away from quadrature due to temperature and low frequency fluctuations. The adaptability of the demodulator and the optimum optical path difference were investigated. The impact signal from FBG dynamic strain sensor is acquired at the frequency up to 197 kHz.

Key words: Sensor; Dynamic strain monitoring; Semiconductor optical amplifier; Fiber Bragg grating; Interferometer; Demodulation

OCIS Codes: 060.3735; 060.2370; 060.3510; 140.4480; 120.5050

0 引言

结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 是利用在线无损传感技术, 通过信号分析, 达到检测结构损伤的目的. 该技术的核心是一个连续监测结构的传感器系统, 其最终目的是提供结构损坏或退化的早期预警. 撞击监测的 SHM 技术多采用超声方

法^[1-2], 可分为主动和被动模式. 主动模式是指传感器主动激励, 周围的其他传感器接收瞬态应力波, 可以判断出缺陷的位置和尺寸. 主动模式主要用于识别撞击引起的损坏, 而非实时监测撞击或声发射事件本身. 而被动模式是基于撞击产生的应力波, 激活系统工作, 并由传感器接收应力波, 从而可以判断撞击的能量和位置, 工作原理类似于声发射系统. 使用传感器网络

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51304260) 和重庆市自然科学基金项目 (No. cstc2012jjA40057) 资助

第一作者: 陶传义 (1984-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: taochuan-yi@cqut.edu.cn

收稿日期: 2016-01-13; 录用日期: 2016-04-25

<http://www.photon.ac.cn>

可以持续监控大面积结构件,并实时识别外来的撞击或声发射事件,对外来情况造成的严重撞击事件进行监测并警告.要求 SHM 系统提供如下信息:撞击事件发生、撞击的位置,撞击能量量级和撞击的严重程度评估.

被动超声的 SHM 系统通常使用压电型传感器^[3](Piezoelectric Transducer, PZT),但是此类系统不利于多路复用,而光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器易于多路复用并能够形成大型 FBG 传感器网络,已被广泛应用于应变、温度和压力的远程光纤传感^[4-6].但是 FBG 传感器在用于监测应力波引起的高频动态应变时还是受到诸多限制.在被动 FBG 传感系统中,通常使用宽带光源如超辐射发光二极管、放大自发辐射光源和掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA).FBG 反射光因其窄带特性而非非常微弱,此方法限制了信噪比和解调系统的带宽.因此,使用光纤激光器获取高输出功率的 FBG 传感系统被广泛而深入地研究^[7-9].FBG 激光传感器系统大多采用掺铒光纤(Erbium-Doped Fiber, EDF)作为增益介质,FBG 同时作为传感头和激光腔反射镜.此方法提高了系统信噪比,然而铒离子的均匀加宽限制了激光模式的数量,因模式竞争这些激光模式功率不稳定.另外,如果采用可调谐滤波器扫描激光波长,此时扫描速度又限制了传感器的动态范围.FBG 激光传感器如果选择具有非均匀加宽的半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)作为增益介质,则可以克服模式竞争并产生多模激光^[9].

目前主要有 3 种不同的解调方法可用来检测 FBG 传感器的光谱移动信号,包括扫描技术、光谱技术以及干涉技术.其中,采用扫描技术解调方式的有法布里-珀罗(Fabry-Perot)扫描滤波器^[10]、声-光可调谐滤波器^[11]、可调谐激光源^[12],这些系统采样率较低,而且无法同时进行多个光纤光栅传感信号的解调.由于它们是时分多路复用技术,为了监测撞击信号和声发射,要求所有的传感器必须同时都是激活的,此技术则不再适用.光谱技术的时频分辨率低,如果多个传感器必须始终是激活的,此技术则不适合动态测量^[13].干涉解调技术对于监测动态应变很理想,采用该技术的主要有马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪^[14]、基于光折变晶体的双波混频(Two-Wave Mixing, TWM)干涉仪^[1,2]和迈克尔逊(Michelson)干涉仪^[5-7]等.TWM 干涉仪可提供多通道动态传感,并且对低频机械扰动和温度漂移不敏感^[1-2],而迈克尔逊干涉解调能够提供亚皮应变级(sub-picostrain, $<10^{-12}$)分辨率的动态测量,并且具有高达 3.5 MHz 的频率响应^[6-8].

本文采用基于 SOA 的光纤环形激光器 FBG 传感系统检测撞击激发的声发射信号,通过迈克尔逊干涉

仪解调 FBG 动态应变传感信号.此研究将为 SOA-FBG 传感系统实现串联的 FBG 动态应变传感器多路复用打下基础.

1 实验装置与工作原理

图 1 给出基于半导体光纤环形激光器的布喇格光栅传感系统与迈克尔逊干涉解调装置.其中 SOA-FBG 传感系统由半导体光放大器、环形器、隔离器、FBG 传感头(反射率 90%,中心波长 1 539.4 nm)和一个 20:80 光耦合器构成.半导体光纤环形激光器输出光直接导入干涉仪并准直,高精度偏振分光棱镜(Polarized beam splitter, PBS)将入射光分离为功率比 50:50 的信号光束和参考光束.两光束分别沿着光程差约 9 mm 的非平衡光路传播,然后它们重新结合形成干涉进入两个光电探测器.信号光反射镜安装在精密平移台上,用于调节信号光和参考光之间的路程差.参考光从固定于压电执行器的硅片上反射回来.第一个光电探测器的电压输出接入比例-积分-微分(Proportional-Integral-Differentiating, PID)反馈控制器以电控方式驱动压电执行器,从而抑制温度和低频波动引起的干涉渐渐偏离正交,因为只有当在正交点才能获得最佳灵敏度^[6-8].另一个光电探测器的输出通过数字示波器记录,并连接计算机作数据处理.

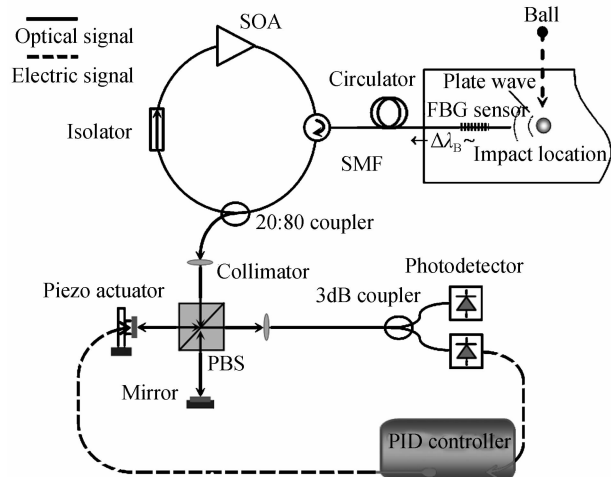


图 1 基于半导体光纤环形激光器的光栅传感系统与迈克尔逊干涉解调装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for the SOA-based FBG laser sensor with a Michelson interferometric modulation system

信号光和参考光在光程差(Optical Path Difference, OPD)不超出激光相干长度($\Delta c = \lambda_B^2 / \Delta \lambda$, $\Delta \lambda$ 为光谱域线宽)的条件下发生干涉,并且在两束光正交处才允许线性和高灵敏地解调动态波长移动.FBG 反射光的光谱移动 $\Delta \lambda_B(t)$ 引起的干涉光束相位差由下式给出^[1-2]

$$\Delta \varphi(t) = -\frac{2\pi d}{\lambda_B^2} \Delta \lambda_B(t) + \varphi_n \quad (1)$$

式中, d 是光程差, λ_B 是 Bragg 中心波长, φ_n 是由环境引起的随机偏差导致的相位漂移。

迈克尔逊干涉仪干涉条纹由信号光 E_{01} 和参考光 E_{02} 的干涉叠加决定^[15], 即

$$I(t) = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} |\gamma_{12}| \cos [\Delta\varphi(t) + \varphi_0] \quad (2)$$

式(2)中, φ_0 表示两光束的初始相位差; γ_{12} 是与光程差有关的复相干度, 对于高斯线型光谱, $|\gamma_{12}| = \frac{2\sqrt{r}}{r+1} \cdot$

$\exp(-\pi c^2/2c_c^2)$, 其中 $r = E_{02}^2/E_{01}^2$, $\tau = d/c$, 相干时间

$\tau_c = \sqrt{2\ln 2}/\pi/\Delta\nu$, 而激光谱线宽度 $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda_B^2$ 。因此,

当光程差 $d=0$ 时, $|\gamma_{12}| = 2\sqrt{r}/(r+1) \approx 1$ 。并且, 复相干度随着光程差的增加而降低。如上所述, 信号在正交点获得最佳解调, 而对正交的微小偏离将导致光强因相移而变化。在迈克尔逊干涉解调仪中使用 PID

控制器能够来补偿由温度和大的准静态应变导致的低频漂移^[6-8]。设置特定参量的 PID 控制器的反馈电压能够主动地补偿任何准静态漂移以维持干涉仪在正交状态。因此光电探测器输出信号 $s(t)$ 仅仅与高频光谱移动有关, 将式(1)和 $|\gamma_{12}|$ 等参量代入式(2)右边第三项并化简得

$$s(t) \propto 4E_{01}E_{02} \frac{\sqrt{r}}{r+1} \exp \left[-\frac{\pi^2}{4\ln 2} \left(\frac{d\Delta\lambda}{\lambda_B^2} \right)^2 \right] \cdot \sin \left[\frac{2\pi d}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B(t) \right] \quad (3)$$

根据式(3), 输出信号强度 $s(t)$ 的主要影响因素包括: 光程差 OPD、SOA-FBG 激光谱线宽度 $\Delta\lambda$ 、Bragg 中心波长 λ_B 以及 FBG 光谱移动 $\Delta\lambda_B$ 。 $\Delta\lambda$ 通常在 0.1~1.0 nm 范围, 而 λ_B 位于 1 550 nm 附近。

2 结果与讨论

2.1 传感器与干涉仪的参量匹配与优化

根据式(3), 波长解调信号强烈地受光程差 OPD (d) 变化的影响。图 2 给出不同线宽(Linewidth)的 FBG 传感器信号振幅(Amplitude)随光程差的变化三

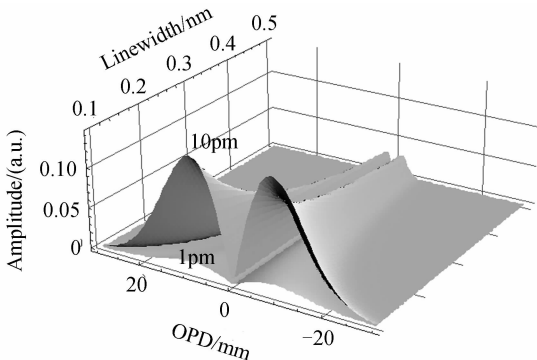


图 2 光谱移动为 1 pm 和 10 pm 时 FBG 线宽和光程差对波长解调信号的影响

Fig. 2 Wavelength demodulated signal amplitude as a function of the OPD for different linewidth FBG sensors

维曲面图。上曲面和下曲面对应的 FBG 反射光谱中心波长移动量 $\Delta\lambda_B$ 分别为 10 pm 和 1 pm。可以看出, 较大的光谱移动量对应较大的波长解调信号。当光程差等于 0 时, 没有可探测波长解调信号。随着光程差增加, 信号振幅增加到最大值, 此后因条纹可见度降低, 信号开始下降。图 3 给出 0.1 nm 光谱线宽的 FBG 传

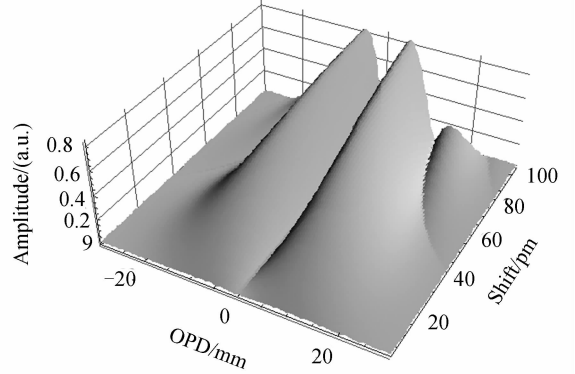


图 3 FBG 光谱移动量和光程差对波长解调信号影响
Fig. 3 Wavelength demodulated signal amplitude as a function of the OPD for different spectral shift of FBG sensors with a linewidth of 0.1 nm

感器信号振幅随不同光谱移动 $\Delta\lambda_B$ 和光程差 OPD 的变化三维曲面图。对于给定线宽的 FBG 传感器, 必定存在一个最优光程差 d_{opt} 可使波长解调信号最大化。式(3)中, 波长解调信号取得极大值的条件为

$$\frac{\partial^2 s(t)}{\partial \Delta\lambda_B \partial d} = 0 \quad (4)$$

即

$$\frac{\pi}{\lambda_B^6} \exp \left[-\frac{\pi^2}{4\ln 2} \left(\frac{d\Delta\lambda}{\lambda_B^2} \right)^2 \right] \left\{ \left[2\lambda_B^4 - \frac{(\pi d\Delta\lambda)^2}{\ln 2} \right] \cdot \cos \left[\frac{2\pi d}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B(t) \right] - 4\pi d \lambda_B^2 \Delta\lambda_B(t) \cdot \sin \left[\frac{2\pi d}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B(t) \right] \right\} = 0$$

一般地, $\Delta\lambda_B(t) < 10$ pm, 可视为极小量, 求解方程

$$\lim_{\Delta\lambda_B(t) \rightarrow 0} \frac{\partial^2 I(t)}{\partial \Delta\lambda_B \partial d} = 0 \quad (5)$$

得到最优光程差

$$d_{opt} = \frac{\sqrt{\ln 4} \lambda_B^2}{\pi \Delta\lambda} \quad (6)$$

根据式(6), 最优光程差与 FBG 线宽成反比。图 4 表示 FBG 光谱线宽与计算的最优光程差的关系。从此图可以看出 Bragg 中心波长 λ_B 在 C 波段波长范围内 (1 530~1 565 nm) 最优光程差相近, 这有利于多个 FBG 传感器多路复用。同时从图 2 还可以看出, FBG 线宽越窄, 最优光程差越大, 此时解调信号也越大。然而 FBG 线宽过窄时通常要求更长的 Bragg 光栅长度, 这可能会降低其最大响应频率, 而且光程差过大将降低 FBG 传感器检测的动态范围。

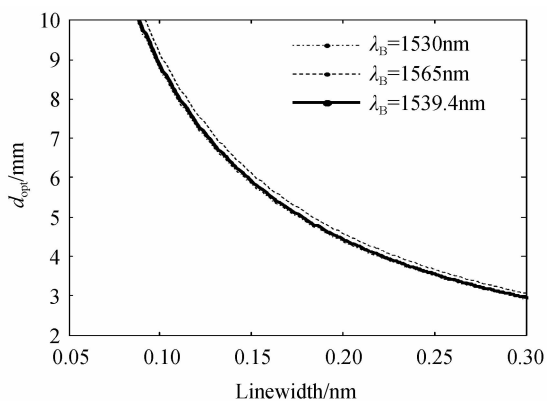


图4 FBG光谱线宽与最优光程差的关系

Fig. 4 Numerical determination of relationship between the optimum OPD and the spectral linewidth of FBG sensors

图5为实验中SOA-FBG光纤环形激光器输出光谱(Fiber laser output),此时SOA泵浦电流100 mA. 光纤光栅反射峰输出激光的3 dB线宽 $\Delta\lambda$ 大约0.1 nm, Bragg中心波长 λ_B 为1 539.4 nm,因此根据式(6)得到最优光程差 d_{opt} 为8.9 mm. 另外,根据式(3),最大的动态应变幅度受限于平衡相移

$$\left[\frac{2\pi d}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B(t) \right] \leq \frac{\pi}{2}$$

即

$$\Delta\lambda_B \leq \frac{\lambda_B^2}{4d} \quad (7)$$

因此,对于一个光谱线宽大约0.1 nm, Bragg波长 λ_B 为1 539.4 nm的FBG传感器, $\Delta\lambda_B \leq 67.5$ pm,对应最大动态应变幅度为 $56 \mu\varepsilon$ [2].

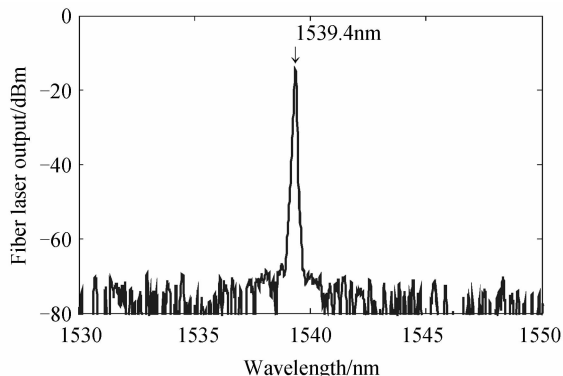


图5 SOA-FBG 光纤激光输出

Fig. 5 SOA-FBG-based fiber laser output

2.2 传感器对撞击声发射信号的探测

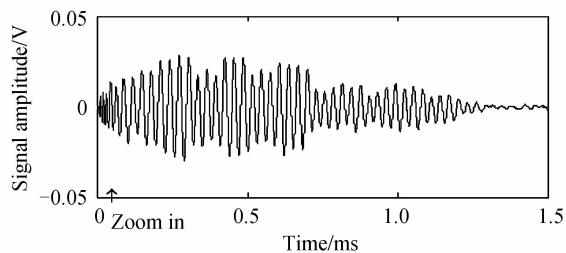
李宁和魏鹏等[16]对光纤布喇格光栅声发射检测技术用于轴承状态监测的研究表明:光纤布喇格光栅声发射方法检测到的信号谱底噪声小,谱线清晰、干净,更容易分辨故障频率和分析故障的严重程度,优于振动和压电式声发射传感方法. 实验中,采用SOA-FBG传感器与迈克尔逊干涉解调系统监测金属板上撞击荷载产生的瞬时响应. 由于产生的声波波长大小和金属板

厚度相近,撞击荷载在金属板上产生兰姆(Lamb)导波模态[1-2]. 兰姆波引起的表面动态应变 ε_z 可以通过监测该应变引起的FBG光谱移动 $\Delta\lambda_B$ 来检测

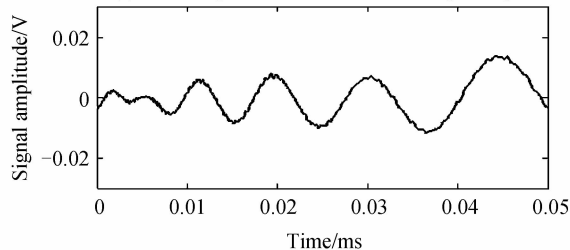
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]}{2} \right\} \varepsilon_z + (\alpha_A + \alpha_n) \Delta T \quad (8)$$

式中各参量见文献[2]. 式(8)表明 Bragg 波长移动是机械应变 ε_z 和温度变化 ΔT 的函数. 以前的研究表明中心波长 1 550 nm 的 FBG 传感器 $1 \mu\varepsilon$ 应变将引起 1.2 pm 波长移动,而 1°C 温变将导致约 13 pm 波长变化[2]. 下面我们通过实验证实基于干涉解调技术的SOA-FBG传感系统对撞击引起的声发射信号的检测能力.

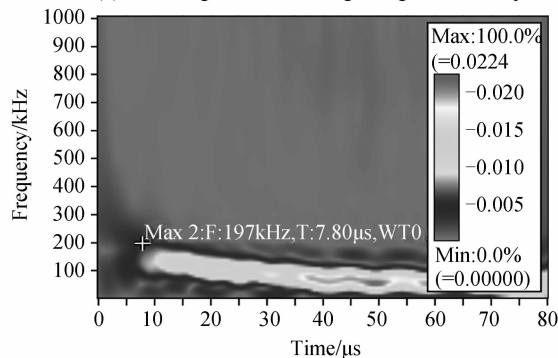
首先,使用环氧/有机硅粘结剂将FBG传感器固定于1 mm厚铝板表面上,让一个0.5 g钢珠(直径5 mm)从铝板上空50 cm高度处以自由落体方式撞击铝板,撞击点位于铝板表面FBG传感器轴向延长线10~15 cm处,如图1. 通过示波器捕获解调信号,同时用该信号触发示波器. 图6(a)给出撞击信号的时间响



(a) Time response of FBG sensor to impact signal



(b) An enlargement of the beginning of sensor response



(c) Time frequency response of the FBG sensor

图6 传感器对撞击声发射信号的时间响应

Fig. 6 Dynamic strain response of the FBG sensor to impact signal induced by dropping a ball bearing on a metal plate which simulates Lamb wave

应曲线. 高频声发射传感信号周期性地振荡, 振幅快速增加到最大值后逐步降低, 显著的振荡信号大约持续 1.3 ms, 频率变化看起来并不显著. 图 6(b) 为放大的起始响应信号, 振荡从小振幅开始而频率逐渐降低. 通过 AGU-Vallen Wavelet 小波变换软件, 对获得的响应信号数据进行频率域分析. 瞬态信号 $s(t)$ 在时间域和频率域产生的振幅分布 $CWT(\tau, S)$ 由下式给出^[2]

$$CWT(\tau, S) = \frac{1}{\sqrt{S}} \int s(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{S} \right) dt \quad (9)$$

其中

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2 + i\omega_p t \right]$$

$\psi^*(t)$ 是 $\psi(t)$ 的复共轭, τ 是时间域平移参量, S 是频率域比例因子, ω_p 是小波母函数中心频率, $\gamma = 5.336$ 满足小波容许性条件. 图 6(c) 给出 FBG 传感器的时域响应信号的小波变换. 撞击信号的频率从起始的约 197 kHz 降低到 33 kHz.

采用 SOA-FBG 传感系统再一次对金属板受到撞击时引起的声发射信号进行检测, 并用同一信号与传统 PZT 声发射传感器进行比较 (两传感器相距为 1 cm). 图 7 给出 FBG 传感器 (a) 和 PZT 传感器 (b) 的动态应变响应对比, 其中插图给出两种传感器的时间

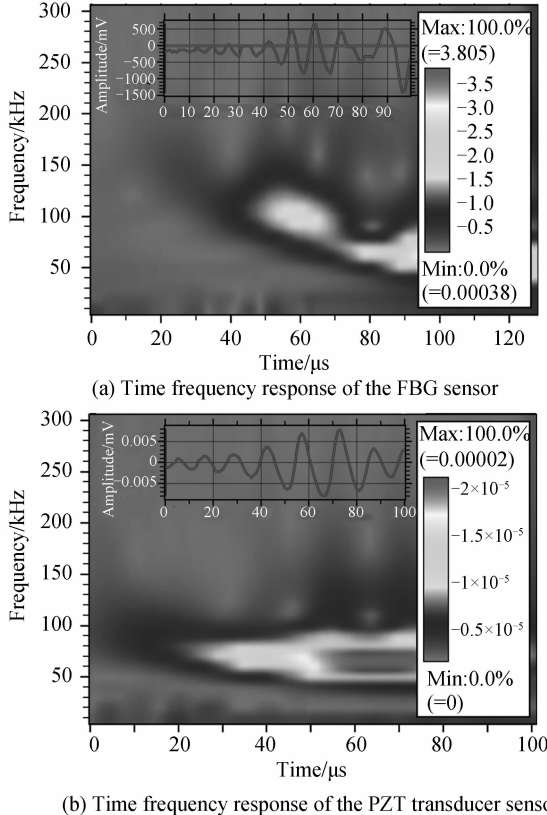


图 7 FBG 传感器和 PZT 传感器的动态应变响应对比
Fig. 7 Dynamic strain response of the FBG sensor and the PZT transducer; the insets show time response of the sensors

响应. 对比发现两种传感器的敏感度相近, 并且 FBG 传感器的敏感度略高于 PZT 传感器. 经过反复的实验, FBG 传感器对声发射的响应呈现良好的再现性. 需要说明的是, 基于干涉解调的光栅传感系统的分辨率主要取决于解调仪, 而不是 SOA-FBG 传感系统本身. 此实验测到的声发射致应力波频率可以进一步提高, 相关参量如传感距离、传感方向等问题有待下一步实验研究.

3 结论

提出一种基于干涉解调技术的半导体光放大器-光纤布喇格光栅传感系统, 对迈克尔逊干涉仪的解调工作原理进行了分析和参量优化, 对于线宽 0.1 nm 光纤光栅传感器输出激光, 最优光程差为 8.9 mm. 利用解调系统成功地对金属板受到撞击时引起的声发射信号进行了感测. 此技术可应用于对撞击和声发射事件的动态监测.

致谢: 感谢西北大学 Krishnaswamy 教授的帮助.

参考文献

- [1] KIRIKERA G R, BALOGUN O, KRISHNASWAMY S. Adaptive fiber bragg grating sensor network for structural health monitoring: applications to impact monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, **10**(1): 5-12.
- [2] QIAO Y, ZHOU Y, KRISHNASWAMY S. Adaptive demodulation of dynamic signals from fiber Bragg gratings using two-wave mixing technology [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(21): 5132-5142.
- [3] PETCULESCU G, KRISHNASWAMY S, ACHENBACH J D. Group delay measurements using modally selective Lamb wave transducers for detection and sizing of delaminations in composites [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, **17**(1): 015007.
- [4] SHU Yue-jie, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, et al. Investigation on evaluation theory of fiber Bragg grating tensile fatigue property [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 805-811.
舒岳阶, 陈伟民, 章鹏, 等. 光纤布喇格光栅器件应力疲劳评价理论研究 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(7): 805-811.
- [5] YU You-long, TAM Hwa-yaw, CHUNG Weng-hong. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 987-989.
余有龙, 谭华耀, 鍾永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 987-989.
- [6] ZHU Y, ZHU Y, BALOGUN O, et al. Dynamic strain sensing in a long-span suspension bridge using fiber Bragg grating sensors [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, **1335**: 1418-1423.
- [7] BALOGUN O, KRISHNASWAMY S. A fiber Bragg grating based tunable laser source for quasi-static and dynamic strain monitoring [C]. *SPIE*, 2009, **7295**: 729501.
- [8] LIU T, HU L, HAN M. Multiplexed fiber-ring laser sensors for ultrasonic detection [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 30474-30480.
- [9] KIM S, KWON J, KIM S, et al. Multiplexed strain sensor using fiber grating-tuned fiber laser with a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,

2001, **13**(4): 350-351.

- [10] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(16): 1370-1372.
- [11] XU M, GEIGER G H, DAKIN J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1993, **14**(3): 391-396.
- [12] FOMITCHOV P, KRISHNASWAMY S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(4): 956-963.
- [13] DAVIS M A, KERSEY A D. Application of a fiber Fourier Transform spectrometer to the detection of wavelength encoded signals from Bragg-grating sensors [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1289-1295.
- [14] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection [J]. *Electronics Letters*, 1992, **28**(3): 236-238.
- [15] BORN M, WOLF E. Principles of optics; electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [M]. New York: Cambridge University Press, 7th edition, 1999.
- [16] LI Ning, WEI Peng, MO Hong, *et al.* Bearing state monitoring using a novel fiber Bragg grating acoustic emission technique[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, **34**(3): 172-177.
- 李宁, 魏鹏, 莫宏, 等. 光纤光栅声发射检测新技术用于轴承状态监测的研究[J]. *振动与冲击*, 2015, **34**(3): 172-177.