

基于光纤环形激光器的动态应变传感系统

毛黎明¹, 陶传义^{1*}, 顾子迪², 张婧¹, 成俊桦¹, 江旭海¹, 李娜¹

¹重庆理工大学理学院绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400054;

²中国人民解放军陆军勤务学院基础部, 重庆 401311

摘要 提出一种基于半导体光放大器的光纤环形激光器动态应变传感器系统。在此传感系统中,将基于半导体光放大器的光纤环形激光器结合光纤布拉格光栅作为光纤激光器的波长选择元件,用来探测外界的动态应变信号。激光腔的外部配置一个不可调谐的光纤法布里-珀罗滤波器作为强度解调器,同时配置光纤带通滤波器,可实现多个光纤光栅反射信号分离输出的功能。实验结果表明,传感系统对动态应变信号有良好的响应,能够测量高达 200 kHz 的动态应变信号,具备解调 MHz 频率范围信号的能力,验证了复用解调的可行性。该系统具有结构简单、成本低等特点,可应用于结构健康监测中动态应变信号的检测。

关键词 光纤光学; 强度解调; 动态应变; 滤波器; 光纤布拉格光栅

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006006

Dynamic Strain Sensing System Based on Fiber Ring Laser

Mao Liming¹, Tao Chuanyi^{1*}, Gu Zidi², Zhang Jing¹,

Cheng Junhua¹, Jiang Xuhai¹, Li Na¹

¹Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials Technology and Systems,

School of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Department of Fundamental Studies, Army Logistics University of People's Liberation Army of China,

Chongqing 401311, China

Abstract This study presents a dynamic strain sensor system based on the fiber ring laser containing a semiconductor optical amplifier. In this sensing system, the semiconductor optical amplifier based fiber ring laser in combination with a fiber Bragg grating is used as a wavelength selecting component of the fiber laser to detect the external dynamic strain signal. A non-tunable fiber Fabry-Pérot filter is deployed outside the laser cavity as an intensity demodulator, and the function of separating and outputting the reflected signals of multiple fiber gratings can be realized by configuring the fiber bandpass filter. Experimental results show that the proposed sensing system has a good response to the dynamic strain signal at a frequency of up to 200 kHz, and it has the ability to demodulate the MHz frequency range signal. The feasibility of multiplex demodulation is also verified. The system has a simple structure and low cost, and can be applied to the detection of dynamic strain signals in structural health monitoring.

Key words fiber optics; intensity demodulation; dynamic strain; filter; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 120.2440; 140.4480

1 引 言

近年来,测量应变^[1-4]、变形^[5-6]和温度^[7-8]等物理量在机械、航空和民用器械等结构健康监测(SHM)领域有着非常重要的意义^[9-12]。在这些测

量中最常见的是对动态应变的测量,这使得高灵敏度动态应变传感器在近年来备受关注。光纤光栅有许多方面的应用,在早期主要应用于工程结构健康监测领域,同时也在多光栅的复用方面有所应用^[13]。光纤布拉格光栅(FBG)是一种反射式光纤

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-06-18; 录用日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(51874064)、重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0152)、重庆理工大学研究生创新项目(ycx20192081)

* E-mail: taochuanyi@cqut.edu.cn

光栅,从光栅处反射的布拉格波长对温度、应变和压力这些外界因素较为敏感。FBG 传感器由于具有体积小、成本低、结构简单、抗电磁干扰、可实现准分布式测量等优点而被广泛应用于桥梁、航空航天、深海石油平台和土木结构等领域,有极大的商业价值^[14]。与其他传感器相比,FBG 传感器的这些优势使其在现代社会的发展中占据极其重要的地位。Tsai 等^[15]提出一种高精度和高采样率的自由光谱范围匹配解调仪,此系统配备可调谐光纤法布里-珀罗(FFP)滤波器和多通道的光纤带通滤波器(BPF),此 FFP 滤波器的自由光谱范围与 BPF 中每一个通道光谱范围匹配,使得 FFP 滤波器和光纤系统具有很好的兼容性。Han 等^[16]提出一种用于声发射检测的光纤超声波传感器系统,其光纤激光腔采用窄带的可调谐光学 BPF 和一个传感 FBG,掺铒光纤作为增益媒介。重庆理工大学的陶传义等^[17]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,此系统基于半导体光放大器的 FBG 传感系统监测高频动态应变信号(包括超声信号),将动态应变信号引起的光栅反射谱波长移动转化为相位变化,并被迈克耳孙干涉仪解调。在迈克耳孙干涉解调仪中,使用比例积分微分控制器补偿由温度和大的准静态应变引起的低频漂移,同时对光程差和布拉格光栅光谱线宽等参量进行分析和优化。利用该解调系统可对金属板受到撞击时激发的声发射进行感测,获取的动态应变信号频率高达 197 kHz。现代光纤光栅传感器的多路复用技术从根本上优化了传统的复杂传感器系统。用于实现分布式测量的准分布式光纤传感器不仅可以从各种测量领域中提取信息,还可以解决当前测量领域的许多复杂问题。因此,FBG 作为温度和应变传感器一

直在被积极研究,以期通过光波的多路复用技术来实现多点测量^[18]。

本文提出一种新的动态应变传感器系统,该系统在光纤环形激光器的激光腔中配置一个半导体光放大器(SOA),使得即使在多路复用的情况下也可以解调 FBG 传感器的动态应变信号。此结构中的 FBG 作为传感元件,从该传感部分反射的光信号进入激光腔内被循环放大,再经过光耦合器输出。输出的光信号通过不可调谐的 FFP 滤波器边缘滤波解调,解调后的信号通过 BPF 将不同传感元件检测的信号分离并被不同的光电探测器(PD)检测,最后可以通过监测激光输出的强度变化直接检测动态应变信号。该系统的主要优点是全光纤配置、结构紧凑、成本低、解调频率高,可应用于结构健康监测中高频动态应变的监测。

2 实验装置与工作原理

2.1 实验装置

动态传感器系统的实验原理图如图 1(a)所示。该装置的环形部分是一个激光腔,SOA(CLD1015, Thorlabs,美国)为系统的增益介质。光纤隔离器用于确保光信号在激光腔内只沿着一个方向传输。光纤环形器与激光腔连接的 FBG 为系统的传感元件,通过使用光学黏合剂使其粘附在压电陶瓷片(CMBP03, 哈尔滨芯明天科技有限公司,中国)上。图 1(b)为 FBG 的反射光谱示意图。激光腔外部通过 9:1 光耦合器连接的部分为 FFP(100 GHz, 合肥脉锐光电,中国)滤波器,FFP 滤波器的反射光谱如图 1(c)所示。FFP 滤波器的单个峰光谱比 FBG 的光谱窄得多,且光谱的位置固定。在 FFP 滤波器后配置一个与光电探测器连接的 BPF(194.75 THz, JDSUniphase,

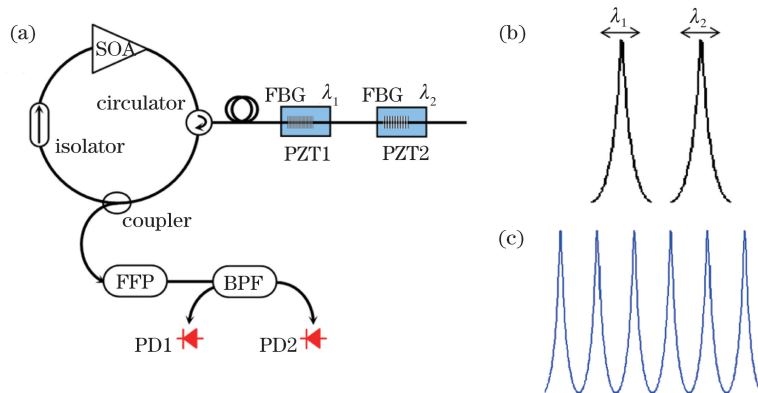


图 1 传感系统示意图。(a)基于 SOA 的光纤环形激光器示意图;(b) FBG 的反射光谱;(c) FFP 滤波器的透射光谱

Fig. 1 Diagram of sensing system. (a) Diagram of fiber ring laser based on SOA; (b) reflection spectrum of FBG; (c) transmission spectrum of FFP filter

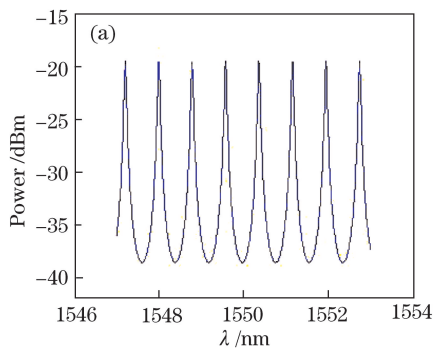
美国),此为解调部分,系统通过光电探测器将光信号转换成电信号来监测激光输出的功率变化。

从 SOA 发射的宽谱光经光纤环形器传输到 FBG,每一个 FBG 传感元件都具有不同的布拉格波长,这使得来自传感器的信号可以在波长域中被分离。通过 FBG 反射回来的大部分反射光经过激光腔被循环放大,最终形成激光输出到解调部分。从激光腔输出的信号光被 FFP 滤波器边缘滤波。当外部动态信号作用到 FBG 上时,FBG 的光谱会发生快速移动,这使得从激光腔放大输出的信号光与 FFP 滤波器的滤波光谱也随之变化,最后可从输出端观察到信号的强度变化。

2.2 工作原理

传感部分所用到的每个 FBG 在强度解调系统中的原理是相同的,所以此处只针对其中一个 FBG 的工作原理进行分析。对于单独的 FBG 传感器,从光纤环形激光器输出的光谱可以表示为

$$I(\lambda) = I_0 \exp \left[-4(\ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda} \right)^2 \right], \quad (1)$$



式中, I_0 为输出光的峰值强度, λ_B 和 $\Delta\lambda$ 分别为 FBG 的中心波长和 3 dB 带宽。FFP 滤波器的功率传输系数(透射光谱)可表示为^[19]

$$F(\lambda) = \frac{T^2}{(1+R)^2} \times \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} nL \cos \theta + \varphi \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中, T 和 R 分别是法布里-珀罗腔的功率透射系数和反射系数, L 和 n 是法布里-珀罗腔的长度和介质折射率, θ 为入射角, φ 为光在法布里-珀罗反射腔界面反射时的相位变化。FFP 滤波器的透射光谱仿真如图 2(a)所示,其通道间隔为 100 GHz。FBG 中心波长 λ_B 与临近的 FFP 滤波器第 k 个谐振峰 λ_k 的波长差 $\delta\lambda$ 可表示为

$$\delta\lambda = \lambda_B - \lambda_k. \quad (3)$$

FBG 中心波长 λ_B 相对于相邻 FFP 滤波器第 k 个谐振波长 λ_k 发生改变,输出光功率也会随之变化,其关系如图 2(b)所示。

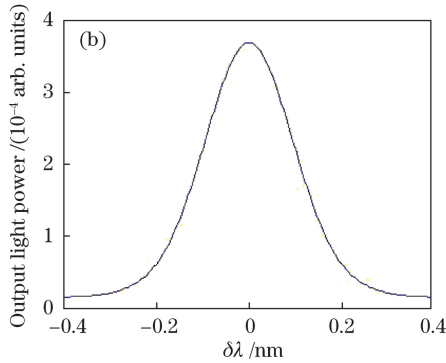


图 2 仿真模拟结果。(a)FFP 滤波器的透射光谱;(b)输出光功率与波长差 $\delta\lambda$ 的关系

Fig. 2 Simulation results. (a) Transmission spectrum of FFP filter; (b) relationship between output optical power and wavelength difference $\delta\lambda$

系统所检测到的信号强度 $P(\lambda)$ 与 FBG 从环形激光输出的光谱 $I(\lambda)$ 、FFP 滤波器透射光谱 $F(\lambda)$ 、BPF 透射光谱 $B(\lambda)$ 之间的乘积成比例关系,可表示为

$$P(\lambda) \propto \int I(\lambda)F(\lambda)B(\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

$B(\lambda)$ 可表示为

$$B(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda_l < \lambda < \lambda_r \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (5)$$

此式是归一化的 BPF 传输方程, $\delta\lambda_{\text{BPF}} = \lambda_r - \lambda_l$ 是用于分离不同布拉格波长光信号的 BPF 参数。检测灵敏度可表示为

$$S = \left| \frac{\partial P}{\partial (\delta\lambda)} \right|. \quad (6)$$

图 3 为检测灵敏度与波长差 $\delta\lambda$ 之间的关系。显然,不同的波长差导致不同的灵敏度,其最佳灵敏度位于灵敏度曲线的两个极值点^[20]。工作时,希望 FBG 反射峰与 FFP 滤波器临近谐振峰的波长差位于两个极值点(FBG 最优解调波长差)附近区域。

图 4(a)为 FFP 滤波器解调 FBG 波长移动的原理图,图中给出了 FFP 滤波器的 3 个相邻谐振峰,其中心波长分别为 λ_{k-1} 、 λ_k 和 λ_{k+1} 。针对不同带宽 $\Delta\lambda$ 的 FBG,能够实现 FBG 有效解调的波长差 $\delta\lambda$ 应当满足的近似条件^[20]为

$$0.1\Delta\lambda < |\delta\lambda| < \Delta\lambda. \quad (7)$$

鉴于高频动态应变引起的波长移动非常微小

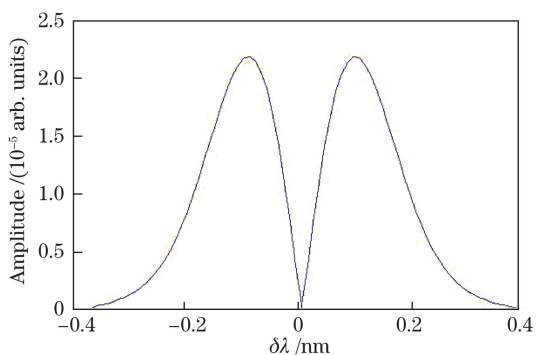


图 3 探测灵敏度和波长差 $\delta\lambda$ 之间的关系
Fig. 3 Relationship between detection sensitivity and wavelength difference $\delta\lambda$

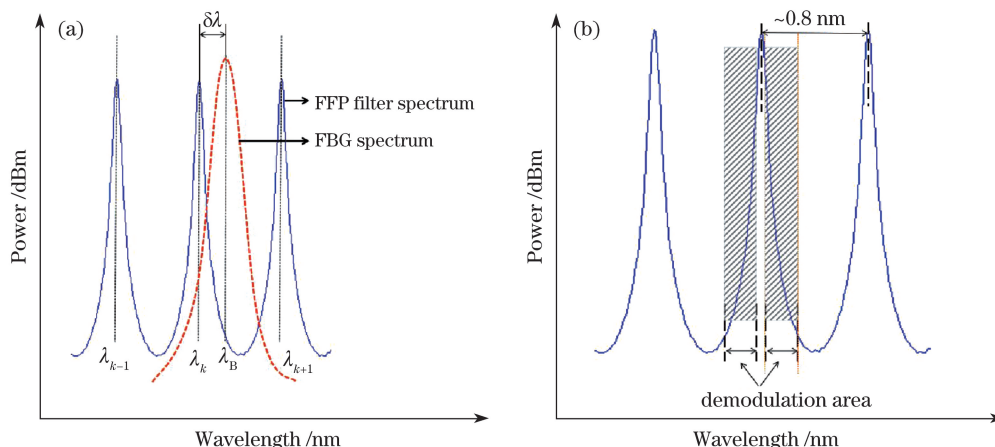


图 4 解调原理示意图。(a) FFP 滤波器透射谱和 FBG 反射光谱；(b) 通道间隔为 100 GHz 的 FFP 滤波器对 0.2 nm 带宽 FBG 的可解调范围

Fig. 4 Diagram of demodulation principle. (a) Transmission spectrum of FFP filter and reflection spectrum of FBG; (b) demodulation range of 0.2-nm bandwidth FBG corresponding to FFP filter with 100-GHz channel interval

3 实验结果和讨论

3.1 动态应变信号的测量

在基于光纤环形激光器的动态传感器系统中, SOA 的非均匀展宽特性决定此光源可以生成多个激光模式。在该系统中, 利用 FFP 滤波器的强度解调技术可以对图 1(a) 所示的基于 SOA 的多路复用 FBG 传感器进行解调。实验以双通道动态信号检测系统为例。

系统所使用的 SOA 的最大驱动电流为 500 mA, 实验环境温度保持在 25 °C。传感部分首先使用单个 FBG, 并使用 100 GHz 通道间隔的 FFP 滤波器来判定该系统的传感特性。图 5 为光谱分析仪 (AQ6370D, 横河, 日本) 测量的 FBG 和 FFP 滤波器的光谱图, 其中传感 FBG 的中心波长 $\lambda_1 = 1539.54$ nm。

(一般低于数十 pm), 当所使用的 FBG 的带宽 $\Delta\lambda$ 约为 0.2 nm 时, 根据(7)式得到可解调的波长差范围为 $0.02 \text{ nm} < |\delta\lambda| < 0.2 \text{ nm}$ 。需要说明的是: 当波长差的绝对值小于 0.02 nm 时, 解调时容易出现倍频失真, 但是其解调能力并不受影响; 波长差超过 0.2 nm 时, 信号极其微弱以至于不能正常解调。通道间隔为 100 GHz 的 FFP 滤波器的可解调范围如图 4(b) 所示。对于通道间隔为 100 GHz 的 FFP 滤波器, 本系统的光纤光栅可解调范围仅限于 FFP 滤波器各个谐振峰光谱附近区域, 例如可解调的特定 FBG 中心波长位于图 4(b) 中给出的可解调区域。

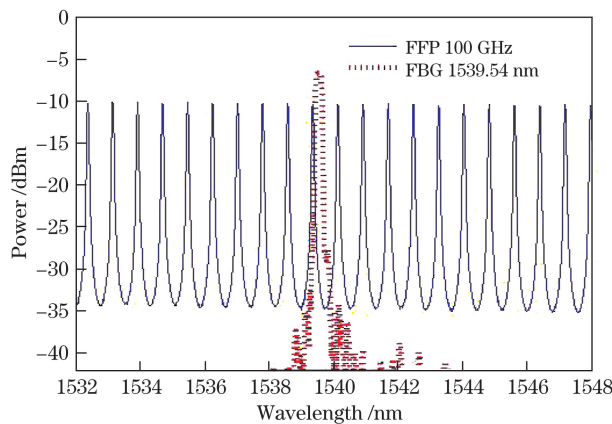


图 5 FBG 和 FFP 滤波器的光谱图
Fig. 5 Spectra of FBG and FFP filter

系统对动态应变的响应可以通过将 FBG 粘在由函数发生器驱动的长方形压电陶瓷片 (PZT) 上来测试。首先讨论仅使用单个粘在 PZT 上的 FBG 检测动态应变信号的情况, FBG 的布拉格波长为

1539.54 nm。实验中函数发生器的输出信号为连续的正弦信号,电压的峰峰值为 20 V,经解调后的信号可由示波器显示。图 6 为解调结果,其调制频率

分别为 5 kHz、10 kHz、60 kHz 和 200 kHz。可以看出示波器输出波形处于稳定状态,并且输出信号的频率与 PZT 的驱动频率一致。

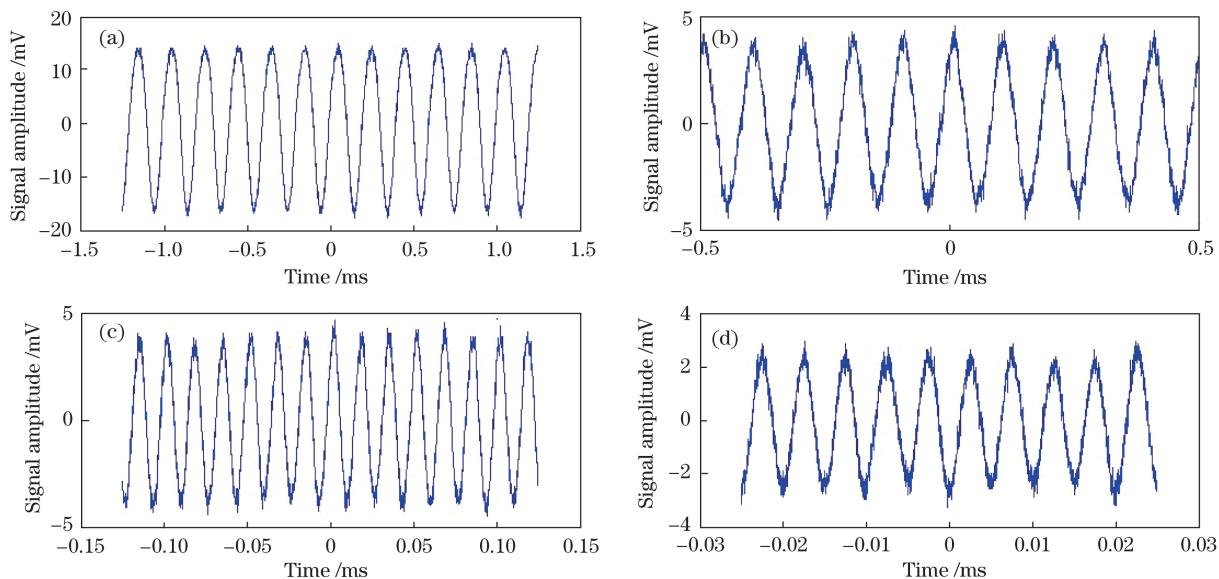


图 6 系统对不同频率动态应变信号($3 \mu\epsilon$)的解调结果。(a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 60 kHz; (d) 200 kHz

Fig. 6 Demodulation results of dynamic strain signals ($3 \mu\epsilon$) at different frequencies.

(a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 60 kHz; (d) 200 kHz

实验还对高于 200 kHz 调制频率的动态信号进行了解调。图 7(a)为系统在 18 MHz 和 20 MHz 时的动态响应解调结果,可以看到解调的信号也相当稳定,同样具有良好的响应。为对解调的频率进

行验证,对解调信号进行了傅里叶变换,将时域信号转换为频域信号,变换后的图谱如图 7(b)所示。从图中可看出动态应变信号的频率与 PZT 的驱动频率完全一致。

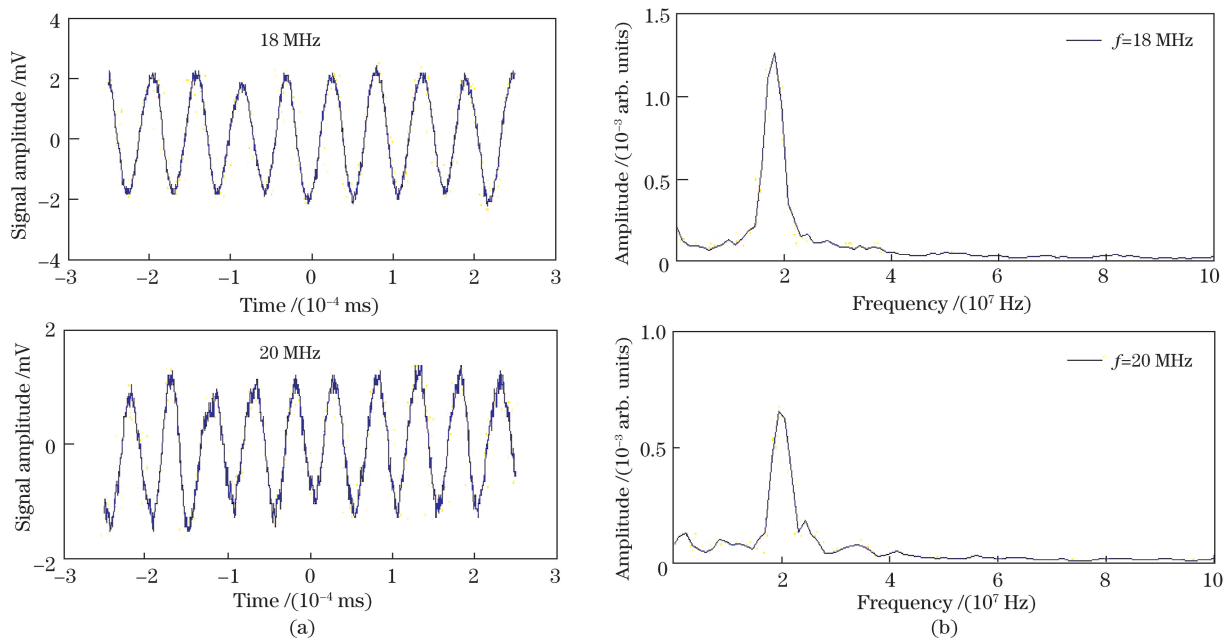


图 7 系统对不同动态信号解调的结果及傅里叶变换图谱。(a) 18 MHz 和 20 MHz 解调信号;

(b) 18 MHz 和 20 MHz 解调信号的快速傅里叶变换

Fig. 7 Demodulation results of different dynamic signals and Fourier transform spectra. (a) 18 MHz and 20 MHz demodulation signals; (b) fast Fourier transform of 18 MHz and 20 MHz demodulation signals

3.2 超声信号的测量

为验证该系统在超声检测应用中的可行性,将另一个布拉格中心波长为 1550.23 nm 的 FBG 放入工作频率为 33 kHz 的超声波清洗机中,以检测水中的超声波信号。图 8(a)和图 8(b)分别为对 33 kHz 瞬态超声信号(超声启动瞬间)和连续超声信号响应的解调结果。实验结果表明该系统可以很好地解调瞬态和连续的超声信号,响应频率与超声工作频率一致。

3.3 复用解调

图 9 为两个中心波长不同的 FBG ($\lambda_1 =$

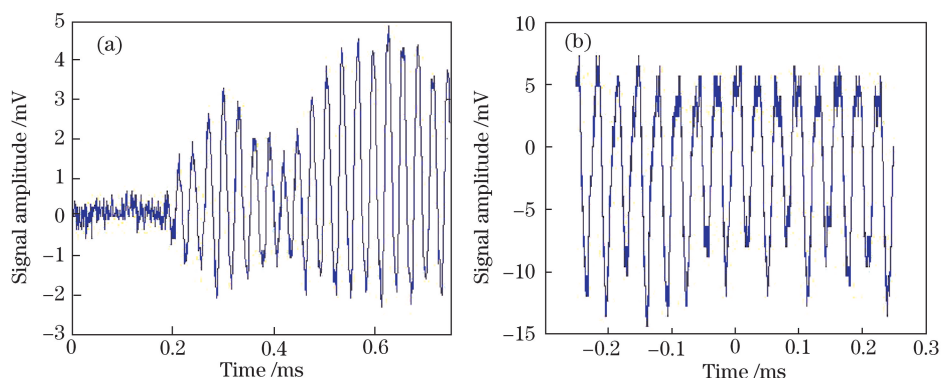


图 8 超声信号解调结果。(a) 33 kHz 瞬态超声信号解调结果;(b) 33 kHz 连续超声信号解调结果

Fig. 8 Demodulation results of ultrasound signals. (a) Demodulation results of 33 kHz transient ultrasound signal; (b) demodulation results of 33 kHz continuous ultrasound signal

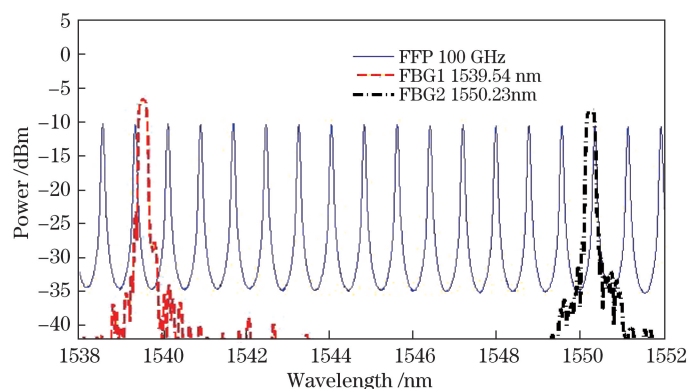


图 9 用于复用解调的 FBG 和 FFP 滤波器的光谱图

Fig. 9 Spectra of FBG and FFP filter for multiplex demodulation

将两个不同中心波长的 FBG 级联以验证多路复用解调的可行性,其中布拉格中心波长为 1539.54 nm 的 FBG 粘在 PZT 上,中心波长为 1550.23 nm 的 FBG 放置在超声波清洗机中。根据 BPF 的参数特性,1539 nm 附近的光信号可以通过 BPF,随后被 PD2 探测到,其他范围的光信号在 BPF 中返回并被 PD1 探测到。图 10 为系统同时解调动态应变信号的结果,可以看到两个光电探测器

1539.54 nm, $\lambda_2 = 1550.23$ nm) 与通道间隔为 100 GHz 的 FFP 滤波器的光谱图,实验对串联 FBG 的复用解调效果进行研究。该系统使用的 BPF 具有约 2 nm 的带宽,其作用是用来分离系统中不同中心波长 FBG 的反射信号。此外,通道间隔为 100 GHz 的 FFP 滤波器光谱中与传感部分两个 FBG 中心波长最接近的两个波峰中心波长分别为 $\lambda_{k_1} = 1539.36$ nm (波长差 $\delta\lambda = 0.18$ nm) 和 $\lambda_{k_2} = 1550.35$ nm (波长差 $\delta\lambda = -0.12$ nm),外部的动态应变作用到 FBG 上会使 $\delta\lambda$ 相应地改变,系统地解调后可由探测器输出信号的强度变化。

探测到的信号基本没有串扰。该实验结果表明基于 SOA 的光纤环形激光传感系统可用于多个 FBG 动态应变传感器的复用解调。

4 结 论

提出一种基于半导体光放大器的光纤环形激光器动态应变传感系统,系统使用 SOA 作为光纤环形激光器的增益介质,其输出可以通过 FFP 滤波器

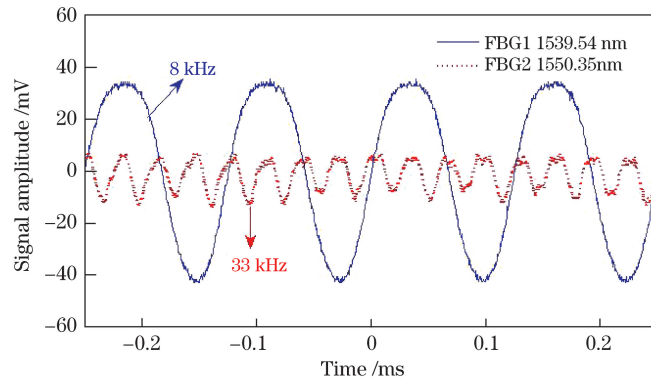


图 10 系统的复用解调信号

Fig. 10 Multiplexed demodulation signal of the system

解调,从理论上分析了解调信号的灵敏度范围。研究表明,基于 SOA 的光纤环形激光器动态应变传感系统可对 5~200 kHz 动态信号进行测量,并能对 18 MHz 及 20 MHz 超高频进行解调,且响应良好。同时,在不同环境中的复用解调实验也证明该系统在多路复用解调中具有广阔的应用前景。因此,这种基于多路复用 SOA 的光纤环形激光传感系统可用于结构健康监测中动态应变信号的检测。

参 考 文 献

- [1] Wei H M, Tao C Y, Zhu Y N, *et al.* Fiber Bragg grating dynamic strain sensor using an adaptive reflective semiconductor optical amplifier source[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2752-2759.
- [2] Duan D W, Rao Y J, Hou Y S, *et al.* Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(8): 1033-1036.
- [3] Murayama H, Kageyama K, Uzawa K, *et al.* Strain monitoring of a single-lap joint with embedded fiber-optic distributed sensors[J]. *Structural Health Monitoring*, 2012, 11(3): 325-344.
- [4] Zhou W J, Wong W C, Chan C C, *et al.* Highly sensitive fiber loop ringdown strain sensor using photonic crystal fiber interferometer[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3087-3092.
- [5] Wei H M, Zhao X F, Li D S, *et al.* Corrosion monitoring of rock bolt by using a low coherent fiber-optic interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 67: 137-142.
- [6] Wei H M, Zhao X F, Kong X L, *et al.* The performance analysis of distributed Brillouin corrosion sensors for steel reinforced concrete structures[J]. *Sensors*, 2013, 14(1): 431-442.
- [7] Yilmaz G, Karlik S E. A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 125(2): 148-155.
- [8] Barrera D, Finazzi V, Villatoro J, *et al.* Packaged optical sensors based on regenerated fiber Bragg gratings for high temperature applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 107-112.
- [9] López-Higuera J M, Rodríguez Cobo L, Quintela Incera A, *et al.* Fiber optic sensors in structural health monitoring[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 587-608.
- [10] Guo H L, Xiao G Z, Mrad N, *et al.* Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 3687-3705.
- [11] Motamedi M H, Feng X, Zhang X T, *et al.* Quantitative investigation in distributed sensing of structural defects with Brillouin optical time domain reflectometry[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(10): 1187-1196.
- [12] Ansari F. Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18(8): 879-889.
- [13] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪,苑立波,田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [14] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328009.
廖常锐,何俊,王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328009.
- [15] Tsai P, Sun F G, Xiao G Z, *et al.* A new fiber-Bragg-grating sensor interrogation system deploying free-spectral-range-matching scheme with high

- precision and fast detection rate[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(4): 300-302.
- [16] Han M, Liu T Q, Hu L L, *et al.* Intensity-demodulated fiber-ring laser sensor system for acoustic emission detection[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29269-29276.
- [17] Tao C Y, Wei H M. Dynamic strain sensor system using fiber Bragg grating-tuned semiconductor fiber ring laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 0706002.
陶传义, 魏鹤鸣. 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[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0706002.
- [18] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(4): 355-375.
- [19] Yoshino T, Kurosawa K, Itoh K, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(10): 1612-1621.
- [20] Chen R, Tao C Y, Jiang X H, *et al.* Detection of dynamic signals from multiplexed SOA-based fiber-ring laser sensors[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10159-10163.