

一种基于级联长周期光纤光栅的力传感装置

郑晶晶, 张玲芬*

(宁波大学 理学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用光纤布拉格光栅(FBG)具有谱线窄、反射率高的特性和级联长周期光纤光栅(级联 LPFG)的边沿滤波特性, 设计了一种基于级联 LPFG 的力传感装置, 将拉力变化转变为 FBG 反射谱功率的变化. 在理论上分析了实验的可行性, 用光纤光栅刻写系统制作了符合要求的级联 LPFG 和 FBG, 用光谱分析仪对 FBG 的反射谱进行了监测. 用光纤功率计对 FBG 的反射功率进行了测量, 并对测得的数据进行了线性拟合, 其线性相关系数为 0.992 4, 装置的灵敏度为 $1.074 \mu\text{W} \cdot \text{N}^{-1}$. 在拉力为 0~0.6 N 的范围内功率与拉力有较好的线性关系. 测量范围和灵敏度取决于级联 LPFG 透射谱边沿的斜率. 该装置结构简单, 操作方便.

关键词: 长周期光纤光栅; 光纤布拉格光栅; 边沿滤波; 解调; 力传感

中图分类号: TN253

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 04-0078-04

光纤光栅是近年来出现的一种性能优良的光学无源器件, 具有柔软性好、精度高、抗电磁干扰和易于加工等优良物理性能^[1]. 其中光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)对温度和应变极为敏感, 通过检测 FBG 反射波长的变化能够有效地监测温度、拉力、形变等物理量, 国内外对其传感特性进行了广泛的研究^[2-3]. 长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)利用前向传输的包层模与纤芯基模间的耦合, 导致在透射谱中表现为具有较大带宽的吸收峰, 而级联 LPFG 是由两个参数相同的均匀长周期光纤光栅和一段普通单模光纤连接而成^[4-5], 级联 LPFG 可以获得比单个 LPFG 更好的光谱性能, 比单个 LPFG 具有较窄的吸收峰^[6], 因此可大大提高传感装置的测量灵敏度.

波长解调技术是 FBG 传感的关键技术之一, 得到了不断发展并相继提出多种传感解调方案^[7]. 1992~1994 年, Melle 和 Davis 等人提出了边沿滤波解调法^[8]. 在 LPFG 透射谱的吸收峰两侧各有一段近似线性的波段, 在此波段透射率与波长有近似线性的关系, 经 LPFG 滤波后 FBG 的反射光强随中

心波长的关系按滤波曲线变化. 基于输出光强与波长存在函数关系, 通过测量输出光强或功率, 由此来检测 FBG 反射波长信息, 可对传感 FBG 的反射谱进行波长解码^[9-10]. 本文利用 FBG 反射率高和对应变敏感的特点, 结合级联 LPFG 的滤波特性, 设计了一种基于级联 LPFG 滤波的 FBG 力传感装置, 适用于动态和静态测量, 具有较好的线性输出, 且系统反应迅速, 成本较低, 使用方便, 结构简单. 由于不需要对波长进行检测, 使得在实际野外测试中用光纤功率计代替光谱分析仪成为可能, 可通过测功率的方法实现力的传感.

1 边沿滤波线性解调原理

图 1 为基于级联 LPFG 边沿滤波的线性解调原理示意图. 图中虚线为级联 LPFG 的透射光谱, 实线为 FBG 的反射光谱. FBG 反射光经过级联 LPFG 滤波器后的功率信号 $I(\lambda)$ 可表示为^[11]

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda') d\lambda', \quad (1)$$

式中 $H(\lambda)$ 为级联 LPFG 的透射谱, $R(\lambda)$ 为 FBG 的反

射谱, 由于在一定波长范围内 $H(\lambda)$ 可近似为线性函数, 且 $R(\lambda)$ 的光谱线宽远小于该波长范围, 则 $I(\lambda)$ 可近似为线性函数, 即

$$I(\lambda) = H(\lambda) \cdot I_1(\lambda), \quad (2)$$

式中 $I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda'$ 为 FBG 反射谱总功率. 由(2)式可得, 该传感系统 FBG 的功率只与级联 LPFG 的透射谱有关. 通过外界拉力的作用使 FBG 发生一定的应变, 从而使其反射谱的中心波长发生位移, 由于受到级联 LPFG 边沿滤波的调制, 这种波长的变化导致 FBG 的反射谱的功率发生变化, 利用光纤功率计对 FBG 的反射谱的功率进行检测来获得待测拉力的信息, 达到解调的目的.

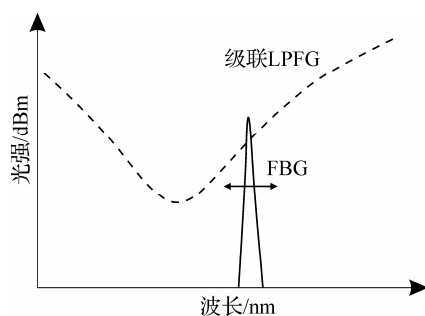


图1 边沿滤波线性解调原理

2 拉力测试实验装置

实验采用的级联 LPFG 和 FBG 是利用准分子激光器(德国 ATL 公司, ATLEX-300 SI)和光纤光栅刻写系统制作而成. 级联 LPFG 是两个参数相同的 LPFG 用普通单模光纤串接而成, 其透射谱如图 2(a)所示, FBG 的反射谱如图 2(b)所示, FBG 的中心波长约 1 545.5 nm, 3 dB 带宽 0.18 nm, 反射率 0.9. 从图 2 可以看出 FBG 反射谱的线宽远小于级联 LPFG 的线宽. 在级联 LPFG 透射谱上选定一段近似线性的波段(1 545.5~1 547.0 nm)作为 FBG 的滤波波段. 为了达到好的滤波效果, 应选择合适的 FBG, 使其中心波长正好落在级联 LPFG 透射谱的线性区域.

将 FBG 的两端光纤分别固定于拉力驱动装置的两个光纤夹具中, 通过调节螺旋测微器给 FBG 逐渐施加拉力, 由拉力计可以读出作用力的大小. 实验过程中将级联 LPFG 放在温度恒定(恒温 26 °C), 折射率不变的稳定的环境中, 以确保在整个实验过程中其透射谱形状保持不变. 基于级联 LPFG 边

沿滤波的拉力测试实验装置如图 3 所示. 实验时, 采用平坦度较高的宽带光源, 使布拉格光栅反射光功率保持相对稳定. 将 ASE 宽带光源与光环行器端口 1 相连, 光环行器端口 2 与 FBG 连接, 经 FBG 反射的光返回到光环行器, 将级联 LPFG 接在光环行器的端口 3 和光谱分析仪(日本 Yokogawa 公司的 AQ6370C)之间, 由光谱分析仪监测 FBG 的反射谱. 若在野外操作时, 不方便使用光谱分析仪, 这时可用体积小、携带方便的功率计来代替光谱分析仪监测从 FBG 反射回来的光功率.

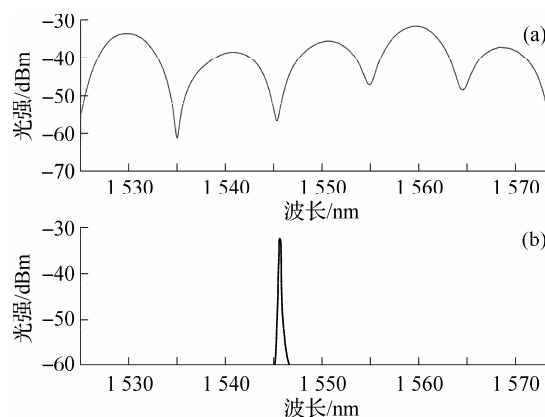


图2 (a)级联 LPFG 的透射谱, (b)FBG 反射谱

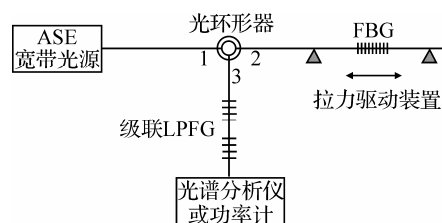


图3 拉力传感实验装置

3 实验结果分析

按图 3 搭建拉力测试传感实验装置, 通过改变 FBG 两端轴向拉力, 测出不同拉力下的 FBG 反射谱. 图 4 为测得的不同拉力下经级联 LPFG 滤波的 FBG 反射谱. 图中虚线为级联 LPFG 的透射光谱, 实线为 FBG 的反射光谱. 可以看出随着拉力的不断增加, FBG 反射谱中心波长不断向长波方向移动. 图中画出了拉力变化从 0.1 N 增加到 0.6 N 时, FBG 中心波长从 1 545.94 nm 增加到 1 546.60 nm, 同时 FBG 反射峰不断抬高, 变化趋势与级联 LPFG 透射谱的边沿形状相同.

图 5 为 FBG 反射波长与拉力的变化曲线, 经

线性拟合, 相关系数 R^2 为 0.999 8, 显示出拉力与波长是严格线性的, 与理论相符. 这也是传统的用光谱分析仪对 FBG 进行波长解调监测拉力的方法.

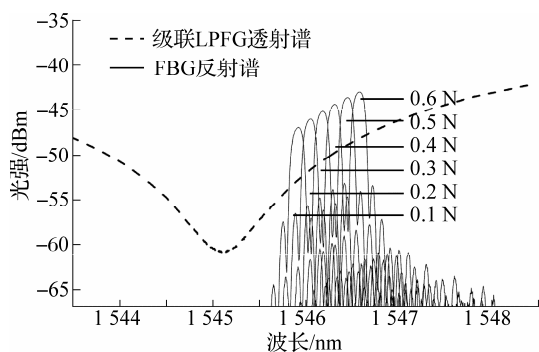


图4 不同拉力下的 FBG 反射谱

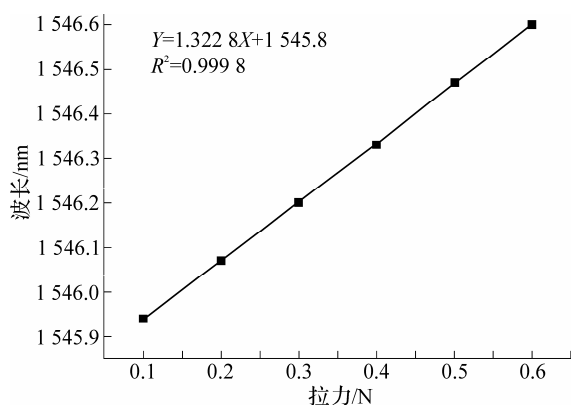


图5 FBG 的反射波长随拉力的变化曲线

在图 3 的实验装置中用功率计代替光谱分析仪, 得到经级联 LPFG 边沿滤波的 FBG 反射光功率与拉力的变化曲线如图 6 所示. 经线性拟合, 相关系数 R^2 为 0.992 4, 显示出功率计读数与拉力之间也有较好的线性关系.

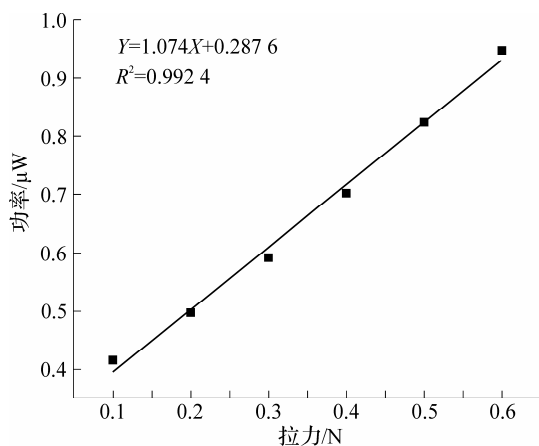


图6 FBG 的反射光功率随拉力的变化曲线

由于级联 LPFG 边沿波段不是严格的线性, 且

由于温度等环境原因使级联 LPFG 透射谱有微小漂移等都会对实验造成误差, 为了达到良好的线性度, 在级联 LPFG 透射光谱的选择上, 应让 FBG 反射波长落在线性度较好的波长范围内来保证较小的测量误差; 还要选取合适的斜率来同时兼顾灵敏度和测量范围, 若要使拉力测量范围大, 应选择较为平坦的边沿作为滤波波段, 若有较高的测量灵敏度, 则应选择斜率较大的边沿作为滤波波段. 本拉力传感装置的灵敏度为 $1.074 \mu\text{W} \cdot \text{N}^{-1}$, 拉力变化范围在 0~0.6 N 内有较好的线性关系.

4 结语

本文设计了一种基于级联 LPFG 滤波的 FBG 力传感装置. 利用 FBG 的窄带高反射性和级联 LPFG 的边沿滤波特性将拉力变化转变为 FBG 反射谱的功率变化. 在选定的滤波波段范围内进行了拉力测试, 系统的灵敏度为 $1.074 \mu\text{W} \cdot \text{N}^{-1}$, 其线性相关系数为 0.992 4. 由于采集的是 FBG 反射光的功率信息而不是波长信息, 这就给野外测试带来了方便, 可以用体积小、携带方便的功率计来代替价格昂贵、体积较大的光谱分析仪, 只要测出 FBG 反射回来的光功率, 即可获得待测的拉力信息, 达到传感的目的.

参考文献:

- [1] MIHAILOV S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. Sensors, 2012, 12(2):1898-1900.
- [2] KINET D, MEGRET P, GOOSSEN K W, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions[J]. Sensors, 2014, 14(4):7394-7399.
- [3] 于庆革, 南钊. 双周期光纤光栅传感器原理及工程应用[J]. 山西建筑, 2011, 37(31):163-164.
- [4] RUAN J, QIN Z X, ZENG Q K. A high sensitivity temperature sensor realized with cascaded long period fiber grating-based Sagnac loop[J]. Optics Communications, 2014, 319(10):42-44.
- [5] JAMES S W, KORPOSH S, LEE S W, et al. A long period grating-based chemical sensor insensitive to the influence of interfering parameters[J]. Optics Express, 2014, 22(7):8012-8023.
- [6] 何如双, 钱梦, 胡雪芳, 等. FBG 滤波的级联 LPFG 温度和折射率传感装置[J]. 光子学报, 2016, 45(1):57-61.

- [7] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4):519-531.
- [8] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号边缘滤波解调技术研究进展[J]. 光通信技术, 2014, 38(4):38-41.
- [9] 朱珠, 梁大开, 孙红兵. 基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(3):110-116.
- [10] 刘波, 童峥嵘, 陈少华, 等. 一种长周期光纤光栅边缘滤波线性解调新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(2):199-202.
- [11] 邹红波, 梁大开, 曾捷, 等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅解调系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(6):723-727.

A force sensing device based on cascaded long period fiber grating

ZHENG Jing-jing, ZHANG Ling-fen*

(Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Using the narrow band, high reflectivity of fiber Bragg grating (FBG) and the edge filter of cascaded long period fiber grating (LPFG), a force sensing device based on cascaded LPFG is presented. The variation of force is transformed into the power changes of FBG reflection spectrum. The feasibility of the experiment was analyzed. The cascaded LPFG and FBG meeting requirement are made using the fiber grating fabrication system. The FBG reflection spectrum has been monitored using a spectrum analyzer. The FBG reflection power has been measured using the power meter. The linear fitting is conducted and the correlation coefficient is found to be 0.992 4 and the sensitivity be $1.074 \mu\text{W} \cdot \text{N}^{-1}$. It manifests a good linearity between power and force in range of 0-0.6 N. The measuring range of force and sensitivity depends on the edge slope of the cascaded LPFG transmission spectrum. The device is structured in simplicity and handy to operate.

Key words: long period fiber grating; fiber Bragg grating; edge filtering; demodulation; force sensing

(责任编辑 韩 超)