

# 基于拍频解调的光纤光栅位移传感器

徐雨露, 倪屹\*, 余涛, 郭瑜

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

**摘要** 为提高光纤光栅监测微小位移的灵敏度和精度, 提出并实现一种基片式环形光纤光栅位移传感器, 利用谐振腔中不同模式拍频信号的变化实现传感。Sagnac 环形腔有效提升了抽运光源的利用率, 同时拥有比直腔更小的相位噪声和更高的信噪比。该传感器采用应变片式结构, 能够有效地对光纤进行保护, 更加精确地测量由位移引起的频率变化。实验中每 5 mm 观察一次传感信号的漂移情况, 重复实验的多组实验结果表明, 该传感器频移与位移基本呈线性变化, 线性拟合度高达 0.9995, 灵敏度为  $-45.4$  kHz/mm, 根据频谱仪的最高精度, 可得传感器的测量精度为  $0.88 \times 10^{-3}$  mm, 与理论推导基本一致。

**关键词** 激光器; 位移传感器; 光纤激光器; 线性度; 应变片; 灵敏度

中图分类号 TN253; TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170622

## Fiber Bragg Grating Displacement Sensor Based on Beat Frequency Demodulation

Xu Yulu, Ni Yi\*, Yu Tao, Guo Yu

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** In order to improve the sensitivity and accuracy of fiber Bragg grating (FBG) monitoring micro-displacement, a substrate-based FBG displacement sensor is proposed and implemented. The sensing is realized based on beat-frequency signals of different modes in the resonator. The Sagnac ring cavity effectively improves the utilization of the pump light source, and has smaller phase noise and higher signal-to-noise ratio than the straight cavity. The substrate-based strain sensing structure can effectively protect the optical fiber and accurately measure the frequency variation caused by the displacement. In the experiment, the drift of the sensing signal is observed every 5 mm. The results of repeated experiments are recorded. The results show that the frequency shift varies linearly with the displacement, the degree of linear fit is up to 0.9995, and the sensitivity is  $-45.4$  kHz/mm. According to the highest precision of the spectrometer, we obtain that the measurement accuracy of the sensor is  $0.88 \times 10^{-3}$  mm, which is basically consistent with the theoretical derivation.

**Key words** lasers; displacement sensor; fiber laser; degree of linearity; strain gauge; sensitivity

**OCIS codes** 140.3510; 140.3518; 280.3420; 280.4788

## 1 引言

1989 年, Meltz 等<sup>[1]</sup>利用紫外激光侧面写入技术降低了光纤光栅(FBG)的制作难度, 实现了大批量 FBG 的制作。FBG 传感器凭借其高精度、可远距离传输、高灵敏度、不受电磁干扰和使用寿命长等优点, 在传感领域得到迅速发展。

Kashyap 等<sup>[2]</sup>和 Ball 等<sup>[3]</sup>对光纤激光拍频传感

器进行了研究, 率先提出可利用频率信号来代替波长实现解调, 而无需使用复杂昂贵的光学仪器检测波长的变化。光纤激光拍频传感器通过监测拍频信号来获得准确的外界物理量的变化。近年来, 基于光纤激光器构成的 FBG 有源拍频传感系统在光纤超声传感、桥梁结构监测等领域应用广泛。提高传感器的灵敏度和测量精度、延长传感器的使用寿命已成为相关应用中首要解决的问题。

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-05-14; 录用日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61701195)、中央高校基础科研经费(JUSRP11740)

\* E-mail: niy2011@163.com

2010年,罗建花等<sup>[4]</sup>提出一种基于多纵模光纤激光器的有源位移传感器,其线性拟合度为0.9993,测量精度为 $3.8 \times 10^{-3}$  mm。该传感器的谐振腔由两个FBG构成,拍频周围存在很多噪声频率,测量精度较低。本文提出并设计了一种新的FBG位移传感器,该传感器具有以下优势:1)使用Sagnac环谐振腔,可以减小前述有源位移传感器谐振腔由于两端的FBG相位不完全匹配而产生的额外噪声(在拍频信号周围会产生偏振模式);2)引入应变片设计,使得预拉伸的光纤在被拉伸后回缩变化小,光纤恢复稳定的速度快,避免了外力直接作用在光纤上所带来的损坏,外界拉伸可以均匀地作用在预拉伸的光纤上,从而提高传感器的灵敏度。本文对实验装置的传感原理进行了分析,通过记录分析拉伸应变片后传感信号的变化情况,对传感器设计的可行性、线性度和传感器的稳定度进行了验证。

## 2 传感器结构及工作原理分析

### 2.1 传感器装置图

目前,光纤激光传感器广泛应用于传感领域,被用来测量应变、温度、声波等各种参数。本文提出一种基于应变片(strain gauge)的FBG位移传感器,通过应变片自由端位移的变化得到传感器位移与传感信号的关系。该传感器的结构如图1所示。

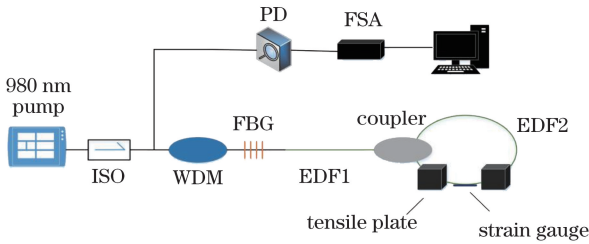


图1 环形FBG位移传感器实验装置图  
Fig. 1 Experimental setup diagram of ring FBG displacement sensor

将980 nm的抽运光通过波分复用器(WDM)输入到环形多纵模光纤激光谐振腔中,掺铒光纤EDF1的一端接入FBG,另一端连接一个1:1的3 dB耦合器(coupler),耦合器两端由掺铒光纤EDF2连接闭合构成一个Sagnac环,以代替传统的光纤激光器直腔中由FBG构成的光纤激光谐振腔。抽运光经过1:1的耦合器后,沿着顺时针和逆时针两个方向传播进入环形谐振腔,在环形谐振腔中产生的纵模激光经过EDF1后返回到FBG,在FBG的选模作用下,其中与FBG波长相匹配的光能够稳定地输出到光电探测器(PD),光信号转换成电信号后

被传输到频谱仪(FSA),最后在终端显示器上显示拍频信号。抽运光进入谐振腔后,在谐振腔内来回振荡一次,具有增益作用的掺铒光纤为其提供能量,提高了抽运光的整体利用率。

### 2.2 应变片结构

设计的应变片的结构与受力情况如图2所示。应变片由固定端、环形平面弹簧结构、弧形过渡段和平板结构构成。将树脂胶涂抹在应变片两端的圆槽内,两端黏接固定光纤,光纤作为传感单元固定在平板结构的两圆孔凹槽之间。外界施加的应力大部分作用在环形平面弹簧结构上,图2所示的 $F$ 即为外界施加形变时应变片受到的拉力。光纤与应变片之间的应变是刚性传递,由两端的大环形弹簧结构传递到中间环形结构,引起平板结构上光纤的拉伸。

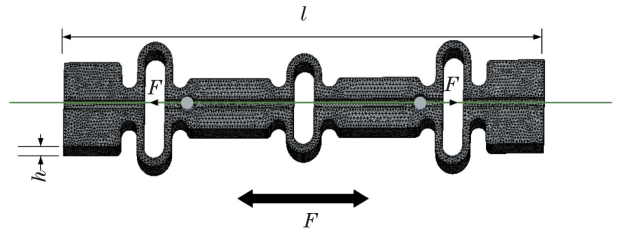


图2 应变片结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of strain gauge

实验将图1所示的掺铒光纤EDF2粘贴在应变片平板结构的两圆孔内,将应变片固定在拉伸平台的拉伸板上,通过控制拉伸板使应变片受到水平的拉伸变形,从而改变传感器受到的应力。该应变片能承受的最大拉伸变形为产生 $\pm 5000 \mu\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ 用来表示极其微小形变的变形程度)条件下的应力<sup>[5]</sup>。设应变片的长度为 $l$ ,厚度为 $h$ ,根据结构力学<sup>[6]</sup>,应变片平板结构中轴凹槽上任意一点的应变 $\epsilon$ 取决于应变片的自由端偏移量 $Q$ ,即

$$\epsilon = \frac{hQ}{l^2} \quad (1)$$

因此,通过改变应变片的自由端偏移量 $Q$ ,即可改变施加在传感器上的应变。

### 2.3 实验工作原理

抽运光经过WDM入射到谐振腔,在环形谐振腔的作用下,腔内光波来回振荡的次数增多,腔内入射光和反射光相互干涉,形成稳定的驻波,最后得到不同模式的纵模激光。当谐振腔内增益大于损耗时,在FBG的选模作用下,只有在小于FBG带宽且激光器谐振频率远小于反射带宽的情况下,激光器会输出多个连续离散的激光模式,如图3所示<sup>[7-8]</sup>。

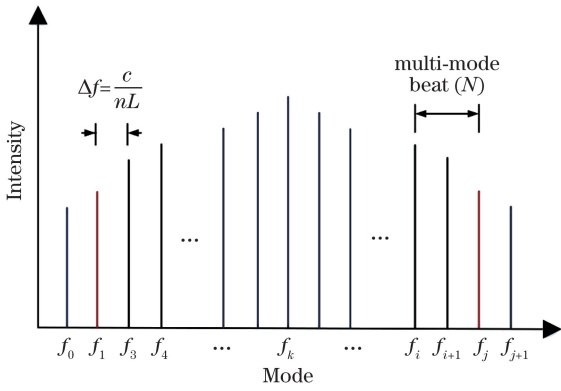


图3 拍频产生理论

Fig. 3 Beat frequency generation theory

图3所示的 $f_0, f_1, f_k, f_i, f_j$ 均为离散模式的拍频信号。任意两个模式间的拍频信号可以表示为<sup>[9]</sup>

$$f_N = \frac{(j-i)c}{n(L_1 + 2L_2)} = \frac{Nc}{nL}, \quad (2)$$

式中: $c$ 为光速; $n$ 为腔内折射率; $L_1$ 为耦合器两个接头间的掺铒光纤长度; $L_2$ 为FBG与耦合器之间的长度; $L$ 为谐振腔总长度; $i$ 和 $j$ 分别表示不同的模式, $i, j = 1, 2, 3, \dots, k, \dots$ ;  $N = j - i$ ,代表拍频信号。

若选择拍频信号 $f_N$ 作为传感信号,则当传感器发生形变并引起腔长改变时,多纵模激光的模式间隔也会发生改变,从而导致拍频信号的频率发生变化<sup>[10]</sup>。拍频信号的频率变化量为

$$\Delta f_N = -\frac{Nc}{nL} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right) = -f_N (1 - P_e) \epsilon, \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式可得

$$\Delta f_N = -f_N (1 - P_e) \frac{hQ}{l^2}, \quad (4)$$

式中: $P_e$ 为光纤有效弹光系数,一般取0.22。由(4)式可知,相邻纵模之间的拍频信号的变化与应变片自由端位移量 $Q$ 成正比,通过拍频信号的变化就可以解调出外界施加给传感器的位移<sup>[11-13]</sup>。

### 3 实验结果分析

实验中测得谐振腔长 $L = 11.82$  m,其中, $L_1 = 5.26$  m, $L_2 = 3.28$  m。应变片的长度 $l$ 为4.50 cm。掺铒光纤在1530 nm的吸收系数为12 dB/m。FBG的中心波长为1550.3 nm,带宽为0.25 nm,反射率为90%。拍频信号的频谱图如图4所示。

根据(2)式计算得到相邻纵模之间的频率间隔为

$$\Delta f = c/(nL) = 0.1751 \times 10^8 \text{ Hz}.$$

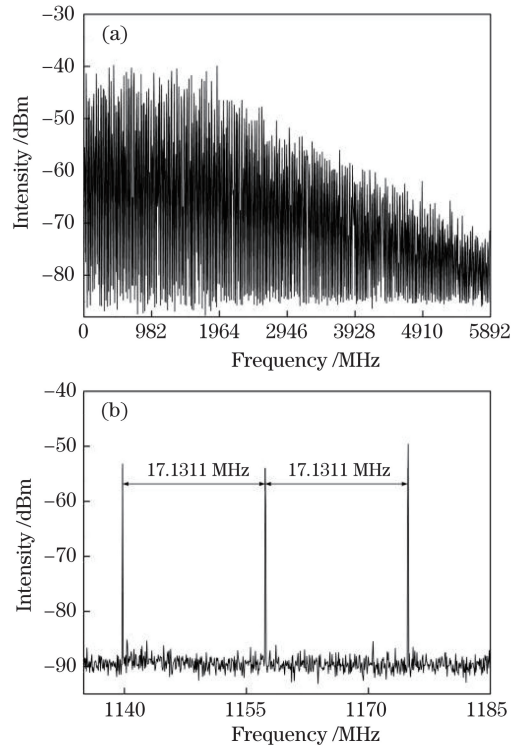


图4 传感器的频谱。(a)频谱仪输出的拍频信号;  
(b)相邻纵模的拍频信号

Fig. 4 Spectra of sensor. (a) Beat signal of spectrometer output; (b) beat signal of adjacent longitudinal modes

由图4可以看出,在980 nm抽运光下,9 kHz~5.89 GHz的拍频信号可以同时产生,拍频信号的频率等间距排列,相邻的频率间隔为17.13 MHz,信噪比约为45 dBm。频谱仪观测到的频率间隔与根据(2)式计算出的理论值17.51 MHz较符合。

实验中取应变片自由端变化范围为0~20 mm,考虑到拍频信号强度和灵敏度的关系,综合选取1122.52 MHz作为传感信号,每拉伸5 mm观察一次拍频信号。图5为不同位移下拍频信号的频谱图。

由图5可知,曲线 $a, b, c, d, e$ 的位移分别为0, 5, 10, 15, 20 mm。实验结果表明,当位移从0 mm向20 mm变化时,该传感器的模式间隔频率随着光纤激光器谐振腔长度的改变基本成比例变化,传感器拍频信号向低频漂移,从1122.52 MHz漂移到1121.62 MHz。对实验测量的数据进行线性拟合,得到相邻纵模之间拍频信号与位移的关系,如图6所示。

借助泰克频谱仪可以清晰地观测到通过光电探测器转换后的多纵模拍频信号。如图6所示,拍频传感信号的漂移变化与位移呈线性关系,其线性拟合度高达0.9995,灵敏度为 $-45.4$  kHz/mm@

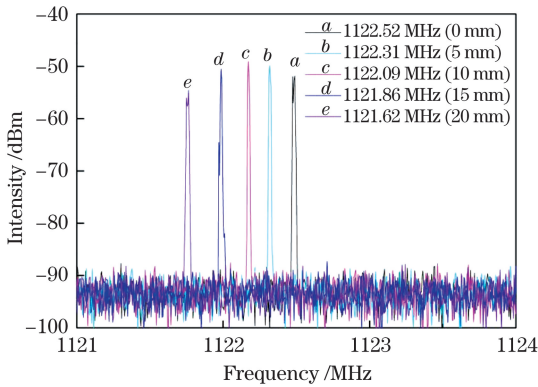


图5 不同位移下拍频信号的漂移频谱图

Fig. 5 Drift spectrum diagram of beat frequency signal under different displacements

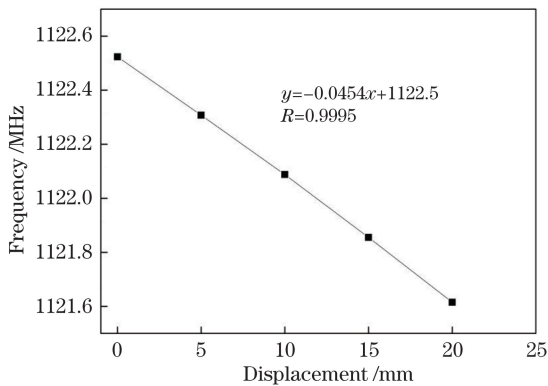


图6 相邻纵模间拍频与应变片位移的关系曲线

Fig. 6 Relationship between beat frequency and strain gauge displacement of adjacent longitudinal modes

1122.52 MHz, 实验结果与理论推导基本一致。泰克频谱仪所能分辨的最小频率为 10 Hz, FBG 位移传感器纵模之间的带宽为 40 Hz, 所以频谱仪分辨的最高精度为 40 Hz, 根据灵敏度计算可得该传感器的精度为  $0.88 \times 10^{-3}$  mm。从图 4(b) 中可以观察到, 在拍频信号的左右两边会出现一些规律的极小幅度的信号, 也就是噪声频率信号。这些频率信号呈规律分布, 当抖动光纤或拍动实验平台时, 噪声频率信号会在某一状态下消失。通过实验分析发现, 这些信号对传感器稳定性的影响微弱。

在整个实验过程中, 由于存在外界环境的不稳定因素和观察到的微小的噪声频率信号, 因此需要对传感器的稳定性进行测试。分析实验数据可知, 频率越高, 传感器的灵敏度越高, 但是拍频信号的强度也越弱。综合考虑, 选取频率为 1886.2130 MHz 的信号作为测试信号, 在 5 h 内每隔 30 min 记录一次频率变化。如图 7 所示, 测试信号在  $\pm 0.6$  kHz 范围内漂移, 这对本实验的测量结果几乎没有影响, 由此可见传感器稳定性很好。

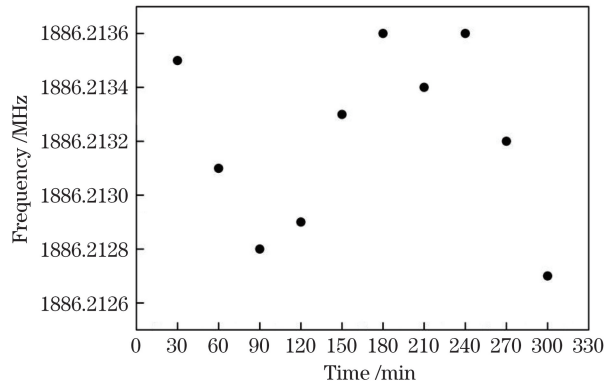


图7 传感器稳定性测试图

Fig. 7 Measured result of sensor stability

## 4 结 论

提出一种基片式环形 FBG 位移传感器, 利用设计的应变片对传感器谐振腔部分进行保护, 并使用 1:1 耦合器与光纤组成的环形腔代替 FBG, 以减小相位噪声并提高激光器的转换效率。通过实验得知, 在 0~20 mm 范围内, 该位移传感器能够监测到被测物体的微小位移变化, 拍频传感信号与位移基本呈线性变化, 线性度达到 0.9995。受系统所使用的频谱仪和外界环境的影响, 该传感器的测量精度为  $0.88 \times 10^{-3}$  mm。该系统解调部分简单廉价, 仅需要一台光电探测器与一台频谱仪。该位移传感器能有效拓展光学传感宽度, 降低传感成本<sup>[14]</sup>。但是, 目前该位移传感器还没有完成封装, 这对实验数据有一定的影响, 今后需进一步优化谐振腔传感特性, 提高拍频信号的信噪比与稳定性<sup>[15-16]</sup>。在实际生产生活中, 考虑到外部环境因素对传感结果造成的误差, 在使用之前需要对传感器进行封装和标定。本实验是在实验室的理想环境下进行的, 未考虑环境温度对传感器的影响, 在真正的应用中, 该系统会受到不止一种变化量的影响, 还可能会受压力、振动、负载等的影响, 因此还需要进一步完善实验, 分析拍频传感原理, 以实现同时对多个变化量的同时测量。此外, 还应进一步降低系统解调难度和传感系统的成本。

## 参 考 文 献

- [1] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- [2] Kashyap R, Armitage J R, Wyatt R, et al. All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm[J]. Electronics Letters, 1990, 26(11): 730-732.

- [3] Ball G A, Meltz G, Morey W W. Polarimetric heterodyning Bragg-grating fiber-laser sensor[J]. Optics Letters, 1993, 18(22): 1976-1978.
- [4] Luo J H, Zhang H, Liu B, *et al.* Multi-longitudinal-mode fiber laser based displacement sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1280-1283.  
罗建花, 张昊, 刘波, 等. 基于多纵模光纤激光器的有源位移传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1280-1283.
- [5] Zhu X Y, Liu H L, Ni Y, *et al.* New double-loop desensitization FBG strain sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030605.  
朱星盈, 刘化利, 倪屹, 等. 新型双环减敏式光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030605.
- [6] Jia C L. Research on active fiber sensing technology based on DBR fiber laser[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.  
贾承来. 基于 DBR 光纤激光器的有源光纤传感技术研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [7] Wang X, Zhang H J, Wen Q, *et al.* A stress fiber sensor based on laser beat frequency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801011.  
王旭, 张豪杰, 温泉, 等. 一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801011.
- [8] Yu T, Guo Y, Ni Y. Multi longitudinal mode beat frequency fiber laser displacement sensor based on substrate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3): 0322001.  
余涛, 郭瑜, 倪屹. 基片式多纵模拍频光纤激光位移传感器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 0322001.
- [9] Zhang Y L, Chen X F, Zhang J T, *et al.* A low-cost FDM system for multi-longitudinal mode fiber laser sensor array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(20): 2186-2189.
- [10] Han Z Y, Hu Y X, Chen X F, *et al.* Fiber laser beat frequency sensor[J]. Optoelectronic Technology, 2017, 37(4): 231-239.  
韩志勇, 胡蕴薪, 陈雪峰, 等. 光纤激光拍频传感器[J]. 光电子技术, 2017, 37(4): 231-239.
- [11] Yin J J, Xu X M, Ding Y P. Real-time monitoring and demodulation system of fiber Bragg grating displacement sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 010601.  
尹建璟, 许雪梅, 丁一鹏. 光纤光栅位移传感器实时监测解调系统[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 010601.
- [12] Li M H, Cheng L, Li Y M, *et al.* Design of displacement sensor based on the bending loss of U-type winding fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606007.  
李明昊, 程琳, 李亚明, 等. U型缠绕式光纤弯曲损耗位移传感器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606007.
- [13] Liu S C. Fiber laser sensor based on beat frequency demodulation method[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.  
刘盛春. 基于拍频解调技术的光纤激光传感技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [14] Yu X J, Dong X, Chen X F, *et al.* Large-scale multilongitudinal mode fiber laser sensor array with wavelength/frequency division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(11): 2299-2305.
- [15] Guo Y X, Xiong L, Kong J Y, *et al.* Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 50-58.  
郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50-58.
- [16] Zhang J T. Research and application of key technique for multiplexing of the fiber Bragg grating sensor[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.  
张金涛. 光纤光栅传感器复用关键技术的研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.