

基片式多纵模拍频光纤激光位移传感器

余 涛, 郭 瑜, 倪 屹

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 提出并设计了一种基片式多纵模拍频光纤激光位移传感器, 利用谐振腔中不同模式之间的拍频信号实现传感, 可以监测物体微小位移。该传感器采用应变传感基片结构, 有效对光纤进行保护, 并能缓冲拉伸和压缩带来的形变, 增加传感器灵敏度。同时在原有多纵模拍频光纤激光器的基础上进行了改进, 使系统获得更高的信噪比。阐述了多纵模拍频传感器的测量原理, 设计制作应变片并搭建实验平台。实验选取 4 个不同拍频信号作为传感信号, 实验数据表明: 在 0~30 mm 范围内, 频率漂移基本呈线性变化, 线性拟合度最高可以达到 0.999 4, 这与理论推导结果一致。由于拉伸平台的拉伸精度限制, 该传感器的测量精度为 1×10^{-3} mm。经过反复实验表明, 该传感器具有良好的稳定性。

关键词: 位移传感器; 应变传感基片; 多纵模; 拍频信号

中图分类号: TN253; TP212 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0322001

Multi longitudinal mode beat frequency fiber laser displacement sensor based on substrate

Yu Tao, Guo Yu, Ni Yi

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A kind of optical fiber laser displacement sensor with multi longitudinal mode beat frequency was proposed and designed. The sensor could be realized by using the beat frequency signal between different modes in the resonator to monitor the small displacement of the object. The sensor used a strain sensing substrate structure to effectively protect the optical fiber and buffer the deformation caused by stretching and compression, and increase the sensitivity of the sensor. At the same time, the original multi longitudinal mode beat fiber laser was improved, which made the system get higher signal-to-noise ratio. The measuring principle of multi longitudinal mode beat sensor was described, and strain gage was designed and built. In the experiment, four different beat frequency signals were selected as sensing signals. The experimental data show that the frequency shift is basically linear in the range of 0 to 30 mm, and the highest linear fitting degree can reach 0.999 4, which is in agreement with the theoretical results. Because the precision of the stretching platform is limited, the measuring accuracy of the sensor is 1×10^{-3} mm. Repeated experiments show that the sensor has good stability.

Key words: displacement sensor; strain sensing substrate; multi longitudinal mode; beat frequency signal

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61701195); 中央高校基础科研经费(JUSRP11740); 江苏省自然科学基金青年基金(BK20160190)

作者简介: 余涛(1993-), 男, 硕士生, 主要从事光纤光栅传感方面的研究与应用。Email: yutjob@foxmail.com

导师简介: 倪屹(1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光电集成, 光学传感方面的研究。Email: niy2011@163.com

0 引言

自 1989 年 Meltz 等^[1]提出光纤布拉格光栅可以用紫外激光从侧面曝光来制作之后,人们迅速提出了各种光纤光栅制作的方法,从而使得光纤光栅在传感领域占有一席之地。1990 年, Kashyap 等^[2]首次将光纤光栅运用于光纤激光器,随后美国海军实验室将光纤激光器应用到传感系统,这标志着光纤激光器传感的诞生。在过去的几十年里,光纤激光传感因其灵敏度高,信噪比强,不受电磁干扰等特点得到广泛研究与应用。

1993 年, G.A. Ball 提出一种偏振型光纤激光拍频传感器^[3],该传感器不需要使用复杂昂贵的光学设备来观察波长漂移,而是直接通过对拍频信号进行观测,解调获得外界物理量的变化。这是第一次提出并使用频率信号来代替波长实现传感解调。1999 年, O. Hadeler 等用多次曝光的方法在同一段光纤上制成两种光栅栅距不同的单模激光器谐振腔,制成短腔铒钕共掺偏振型光纤激光拍频传感器,通过两个不同的谐振腔得到两种不同的拍频信号,通过监测两种拍频信号的变化,实现了对温度和应变的同时测量。但是该方案存在很多问题:噪声太大,信号信噪比不高,系统不稳定等。不过也为后来的拍频系统多参量测量提供了一定的参考。相比于光学解调,频率解调系统简单、成本低、实际应用价值较高,近些年来研究投入也越来越多。

文中提出并设计了一种基于多纵模光纤激光器的位移传感器,利用激光器谐振腔激射产生的多纵模,经过光电探测器生成拍频信号进行传感。通过将掺铒光纤粘贴在应变传感基片上,当应变片被拉伸时,谐振腔长度会发生变化,使得被观测的拍频信号发生漂移。在光纤激光传感解调技术中,拍频解调提供了一种简单的电域信号处理方法,目前电信号的解调技术比较成熟,避免了需要复杂的、高稳定光学器件开发的难题,同时解调设备廉价,解调灵活稳定等优点是传统光纤传感器所不具备的,很大程度上降低了系统的复杂性和解调所需的成本。同时该方法减少了环境噪声耦合,提高了传感器的灵敏度。在环境监测、水声监测、土木工程健康监测等领域具有广阔的应用前景^[4-6]。

1 基本原理

多纵模拍频光纤激光传感^[7]的基本结构如图 1 所示,在掺铒光纤两端熔接两个中心波长相同且高反射率的光纤布拉格光栅作为反射镜,就构成了一个有源的光纤激光器谐振腔。

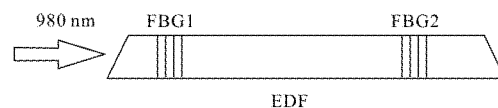


图 1 多纵模拍频光纤激光传感器的基本结构
Fig.1 Basic structure of multi longitudinal mode beat fiber laser sensor

将泵浦光源注入该激光器谐振腔中,当光纤光栅的反射带宽远远大于激光器谐振腔频率时,根据激光器原理,在激光腔内生成多个连续离散的激光模式。再将生成激光输入光电探测器生成频率信号 V_q 为:

$$V_q = \frac{qc}{2nL} \quad (1)$$

式中: q 为模式数; c 为光速; n 为腔内折射率; L 为腔长。

那么相邻两个谐振频率的拍频信号为:

$$\Delta V = V_{q+1} - V_q = \frac{(q-1)c}{2nL} \frac{qc}{2nL} = \frac{c}{2nL} \quad (2)$$

光纤激光谐振腔输出的任意两个纵模激光之间拍频信号可用图 2 表示。

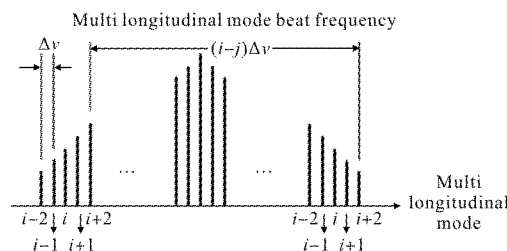


图 2 谐振腔内不同纵模之间拍频信号示意图
Fig.2 Schematic diagram of beat signals between different longitudinal modes in resonant cavity

由公式(2)可以发现,若选择拍频信号 V_N 作为传感信号,当多纵模激光传感器发生形变引起腔长发生改变时,多纵模激光的模式间隔也会随之发生改变,最后体现在拍频传感信号频率变化上。

2 实验装置

实验制作的多纵模拍频光纤激光器如图 3 所

示。实验中 980 nm 的泵浦光经过 980 nm/1 550 nm 的波分复用器(WDM)入射到多纵模激光谐振腔,当泵浦光源输出光功率高于谐振腔阈值时,在光纤光栅(FBG)的选模作用下,与 FBG 波长相匹配的纵模激光会由多纵模激光谐振腔稳定产生并输出,经过 WDM 另一端的光隔离器(ISO)进入光电探测器(PD)中,最后利用频谱仪(FSA)对生成的电子拍频信号进行观测。

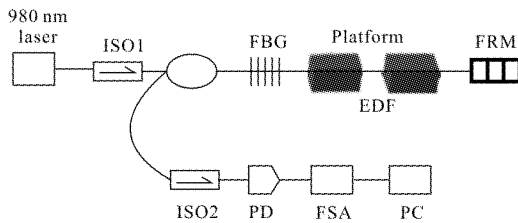


图 3 多纵模拍频光纤激光器实验结构图

Fig.3 Experimental structure diagram of multi longitudinal mode beat frequency fiber laser

实验中笔者将之前的多纵模激光谐振腔进行了改进,将谐振腔一端的 FBG 换成了全反射镜,有效地避免了两个 FBG 中心波长不匹配带来的噪声,提高了泵浦光源的能量利用率和信号的信噪比。

为了能够将谐振腔的变化反应在频谱上,并能够在拉伸光纤时对传感器进行保护,文中设计一种新型光纤应变传感基片,如图 4 所示。应变片中间轴向的凹槽用来固定光纤,同时槽内滴加少量硅胶对光纤进行保护,但是不影响光纤的轴向拉伸变形。两侧和中间的双环形平面弹簧结构能有效缓冲拉伸和压缩带来的形变。当传感器固定在被测物体上工作时,待测物的移动通过固定端传递到两端环形弹簧上,再传递到中间环形结构上,使中间平板结构产生应变,带动平板结构上的掺铒光纤纵向拉伸。



图 4 光纤应变传感基片示意图

Fig.4 Schematic diagram of optical fiber strain sensing substrate

实验中将多纵模激光谐振腔内一段掺铒光纤粘贴在应变片凹槽内,再将应变片固定在位移平台固定端和移动端之间,通过旋转微分头来控制平台对应变片的拉伸,改变谐振腔长度,进而改变谐振腔内

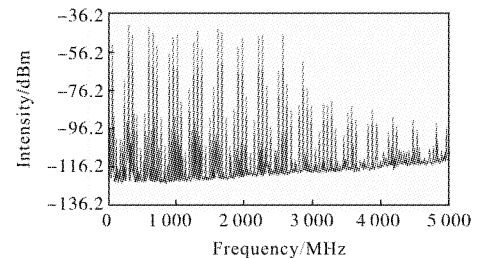
多纵模模式之间的频率间隔,利用频谱仪对频率信号漂移进行观测,就能够得到施加在谐振腔的位移大小。

3 实验结果分析

测得谐振腔长度 $L=1.17\text{ m}$,其中掺铒光纤长度 0.3 m ,其吸收系数为 $12\text{ dB/m}@1\ 530\text{ nm}$,光纤光栅中心波长 $1\ 550.3\text{ nm}$,带宽 0.25 nm ,反射率 90% 。根据公式(2)计算得到相邻纵模之间的频率间隔为:

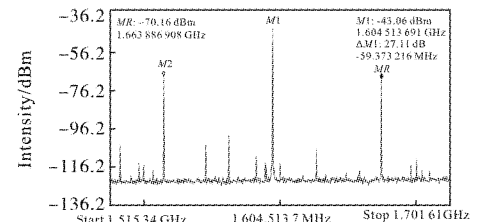
$$\Delta\nu = \frac{c}{2nL} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.45 \times 1.7} = 0.59 \times 10^8\text{ Hz} \quad (3)$$

由图 5 可知,从 $59.373\ 2\text{ MHz} \sim 5\text{ GHz}$ 范围内的电子拍频信号可以稳定生成。电子拍频信号的频率呈等间距排列,间隔 $59.373\ 2\text{ MHz}$,信噪比超过 50 dB 。考虑到外界温度和谐振腔长度等因素,频谱仪显示频率间隔与理论计算值基本一致。理论上,以上范围内拍频信号都可以作为传感信号,但由多纵模激光器原理可知:频率过低,位移-拍频频率响应度会很低,频率过高,信号强度和信噪比都会变弱,综合考虑选取 $783.148\ 2$ 、 $166\ 4.369\ 4$ 、 $2\ 548.335\ 7$ 、 $3\ 343.856\ 1\text{ MHz}$ 拍频信号作为传感信号。



(a) 光电探测器输出的整个频谱

(a) Entire spectrum of the photodetector output



(b) 等间距拍频信号

(b) Equidistance beat frequency signal

图 5 多纵模拍频光纤激光器输出频谱图

Fig.5 Output spectrum diagram of a multi longitudinal mode beat frequency fiber laser

设谐振腔长度为 L , 应变片的长度 l , 粘贴在应变片上的掺铒光纤长度也为 l 。设移动端位移为 Δl , 此时观测信号的频率变化量为:

$$\Delta V_N = \frac{Nc}{2nL} \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right) = \frac{Nc}{2nL} \frac{l}{L} (1 - P_e) \varepsilon \quad (3)$$

根据材料力学应变公式可知:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(3), 可得:

$$\Delta V_N = -V_N (1 - P_e) \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

式中: P_e 为光纤有效弹光系数, 约为 0.22。

由公式(5)可知, 拍频信号的漂移量与位移平台位移 Δl 的变化成正比关系。可以认为拍频信号随移动平台位移的增加呈线性关系变化。

实验中拉伸平台移动端位移 Δl 的变化范围为 0~30 mm, 每移动 2 mm 观测记录漂移后的频率。信号对位移的响应如图 6 所示。

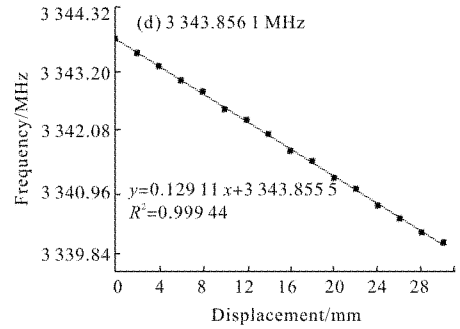
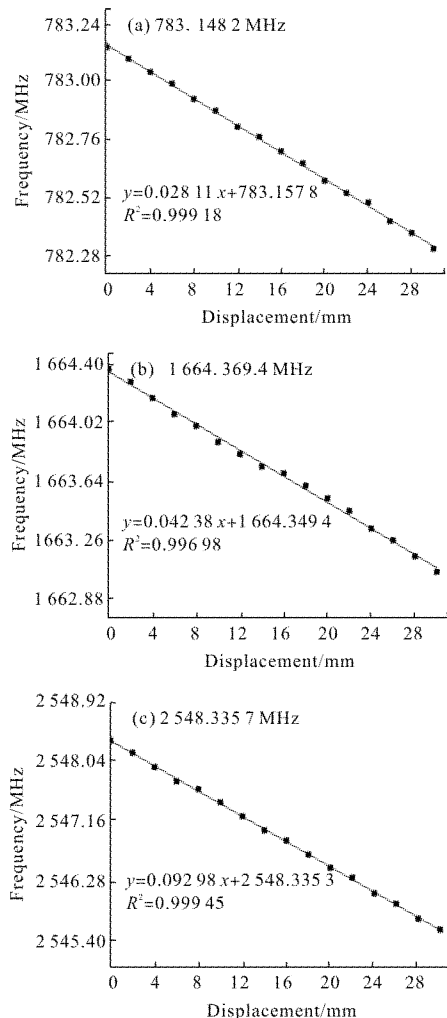


图 6 拍频信号与移动端位移的关系

Fig.6 Relationship between the different beat frequency signal and the moving end displacement

由图 6 可以看出, 拍频传感信号的变化与拉伸平台移动端的位移变化呈线性关系, 线性拟合度最高可以达到 0.999 4。传感器的灵敏度分别为 $-28.1 \text{ kHz/mm}@783.148 2 \text{ MHz}$, $-42.4 \text{ kHz/mm}@1664.369 4 \text{ MHz}$, $-93.0 \text{ kHz/mm}@2548.335 7 \text{ MHz}$, $-129.1 \text{ kHz/mm}@3343.856 1 \text{ MHz}$, 这比公式(5)理论灵敏度都要小些, 可能因为粘贴在应变片凹槽中的掺铒光纤没有能够完全与应变片贴合, 外界变化没有完全作用在掺铒光纤上, 导致实验结果与理论存在偏差, 但是位移与频移的整体关系还是符合的。由于拉伸平台的拉伸精度限制, 该传感器的测量精度为 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

在整个实验过程中, 传感器没有封装, 而是直接暴露在室内空气中, 因此需要对其稳定性进行测试。笔者选取灵敏度最好的 $3343.856 1 \text{ MHz}$ 拍频信号作为参考信号, 每隔 20 min 记录一次, 持续 4 h。如图 7 所示, 测量到的频率漂移都在 $\pm 1.1 \text{ kHz}$ 之内, 这主要是环境扰动以及频谱仪检测的分辨率所导致, 对该实验测量结果几乎没有影响。

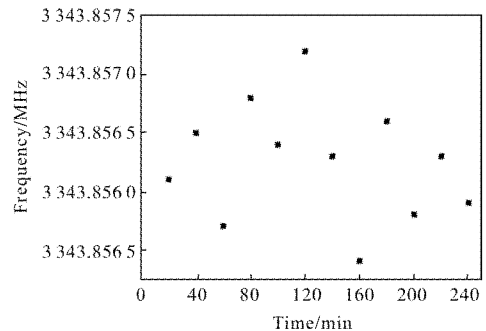


图 7 拍频信号稳定性示意图

Fig.7 Stability diagram of beat frequency signal

4 结 论

文中以多纵模拍频信号作为传感物理量,提出并实现了一种基于多纵模拍频光纤激光器的位移传感器。传感器采用了应变传感基片结构,有效保护了掺铒光纤谐振腔,同时在传感器工作时能够将微小的移动反应在谐振腔变化上。经过实验测试最终得到:在 0~30 mm 内,该传感器的线性度最高 0.999 4 左右,基本呈线性变化。灵敏度会随选取频率变化而变化,频率越高灵敏度越好。该传感器在普通光纤式传感器所具有的灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点的基础上,还拥有解调难度小,成本低的特点,在桥梁、大坝、建筑工程等施工焊接处监测有一定的应用前景。后期封装标定完整后,还可以埋入桥梁和房屋中对微小的振动进行监测。另外,在实验中笔者发现在拍频信号的左右两边会出现一些幅度小且规律分布的频率信号。通过分析得出,该部分信号是谐振腔内不同偏振态产生的拍频^[6],主要是由光纤双折射效应引起两个正交激光偏振模之间的轻微模式分裂造成的。可以针对两种拍频不同的敏感特性实现多物理量的测量^[9-10]。同时该传感器也可以运用波长解调的原理,来实现拍频和波长的双参量解调^[11-13],结合波分复用、频分复用、波分频分混合复用等技术组建光纤激光拍频传感阵列网络,实现传感的大规模网络化^[14]。

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 1 500 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.
- [4] Zhang Y, Chen X, Zhang J, 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.
- [5] Qin Yixuan, Ni Yi, Yao Huixuan. Design of laser array based on REC technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005002. (in Chinese)
秦逸轩,倪屹,姚辉轩.基于REC技术的激光器阵列传感系统设计[J].*红外与激光工程*, 2017, 46(10): 1005002.
- [6] Zhang Jintao. Research and application of key technologies of fiber grating sensor reuse [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
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.
- [7] Liu Shengchun. Research of fiber laser sensing technology based on beat frequency demodulation technology [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese)
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.
- [8] Gao L, Huang L, Chen L, et al. Study on fiber ring laser in sensing application with beat frequency demodulation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45(1): 137-141.
- [9] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese)
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.
- [10] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 629-635. (in Chinese)
徐宁,戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计 [J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 629-635.
- [11] Yu X, Dong X, Chen X, et al. Large-scale multi-longitudinal mode fiber laser sensor array with wavelength/frequency division multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 99: 1-1.
- [12] Guo Yongxing, Xiong Li, Kong Jianyi, et al. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)
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.
- [13] Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, et al. Study on strain and cross sensitivity of long period fiber grating temperature sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1020-1023. (in Chinese)
梁丽丽,刘明生,李燕,等. 长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 1020-1023.
- [14] Li Xiaobin, Song Jianzhong, Guo Yubin, et al. Optical code division multiple access technology and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 487-492. (in Chinese)
李晓滨,宋建中,郭玉彬,等. 光 CDMA 技术及其应用[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 487-492.