

基于自注入锁定的光纤光栅传感解调技术

王旭, 孟德龙*, 李小康, 张玲娟, 陈天威

河南师范大学电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007

摘要 提出了一种基于自注入锁定的光纤光栅传感解调方法。采用光纤激光器结构,通过自注入锁定方法将激光器的输出波长锁定在传感光栅的反射波长处。利用啁啾光纤光栅的色散特性,将激光器波长的变化转化为谐振腔长的变化,利用激光拍频完成对激光波长变化的测量。阐述了所述方法的结构和测量原理,以温度传感为例进行了实验研究。所提方法具有解调系统简单、稳定性好、传感距离不受限制、兼容性良好的优点。

关键词 光纤光学; 自注入锁定; 激光拍频; 啁啾光纤光栅; 温度

中图分类号 O437.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.030606

Fiber Bragg Grating Sensing Demodulation Technology Based on Self-Injection Locking

Wang Xu, Meng Delong*, Li Xiaokang, Zhang Lingjuan, Chen Tianwei

College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China

Abstract A method of fiber Bragg grating sensing demodulation based on self-injection locking is proposed. This method adopts the structure of fiber laser, and the output wavelength of this fiber laser is locked at the reflection wavelength of the sensing grating by self-injection locking. Using the dispersion characteristic of the chirped fiber Bragg grating, the change of the wavelength of the laser is transformed into the change of the length of the resonant cavity. The wavelength change of the laser is measured by the laser beat frequency. The structure and measuring principle of this proposed method are described in detail, and the experimental research is carried out with the example of temperature sensing. This proposed method has the advantages of simple demodulation system, good stability, unlimited sensing distance and good compatibility.

Key words fiber optics; self-injection locking; laser beat frequency; chirped fiber grating; temperature

OCIS codes 060.2300; 060.3510; 140.3520

1 引言

光纤光栅(FBG)传感器具有抗电磁干扰、小尺寸、耐腐蚀、易于组网等优点^[1-4],能够用于对温度、应力等物理量的测量,在桥梁、大坝等大型土木工程中都得到了广泛应用^[5-8]。光纤光栅传感信号解调是光纤光栅传感器应用的关键技术之一,常用的光纤光栅解调方法包括可调谐滤波法和匹配滤波法等^[9-10]。由于主要采用光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔扫描或迈克耳孙干涉结构,受压电陶瓷的电滞效应影响,不仅降低了系统解调准确度且增加

了系统成本。为此,研究人员提出了激光拍频静态传感解调方法^[11-14],利用光纤激光器谐振腔的双折射或腔长变化实现应力和温度传感,这种方法将传感器与解调系统融为一体,简化了传感系统,但系统中的传感单元为光纤激光器的谐振腔,而非光纤光栅传感器,对商用光纤光栅传感系统缺乏兼容性。2016年,王旭等^[15]提出了一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置,直接将光纤光栅传感器作为激光器谐振腔的一部分,利用啁啾光纤光栅(CFBG)构成大色散腔结构实现了应力传感测量。但在长距离传感中,随着激光器腔长的增加,其相对腔长变化

收稿日期: 2018-08-10; 修回日期: 2018-09-13; 录用日期: 2018-09-18

基金项目: 新乡市科技攻关计划(CXGG17003)

* E-mail: 903669346@qq.com

减小,灵敏度降低,且激光拍频测量频率不能固定。为解决上述问题,本文提出了一种基于自注入锁定实现光纤光栅传感解调的方法。自注入锁定常被用来实现窄线宽的激光输出和提高激光输出质量^[16-19],通过自注入锁定的方法将激光器的输出波长锁定在传感光栅的反射波长处,利用啁啾光纤光栅的色散特性,将激光器波长的变化转化为谐振腔长的变化,不同于以往改变腔长的方法,其达到波长解调实现传感测量的目的。基于自注入锁定,可以在固定解调部分的条件下,完成对长距离光

纤光栅传感解调研究,系统将解调单元进行固定,稳定了解调频率范围,保证了灵敏度,使传感距离不再受具体腔长大小的限制。

2 系统结构与原理

光纤激光器可以实现自注入锁定,在这里没有像常见的线性腔光纤激光器一样使用两个光纤光栅作为谐振腔腔镜,而为了实现该激光器的自注入锁定的目的,对激光器的基本组成结构进行了调整改进,其基本结构如图1所示。

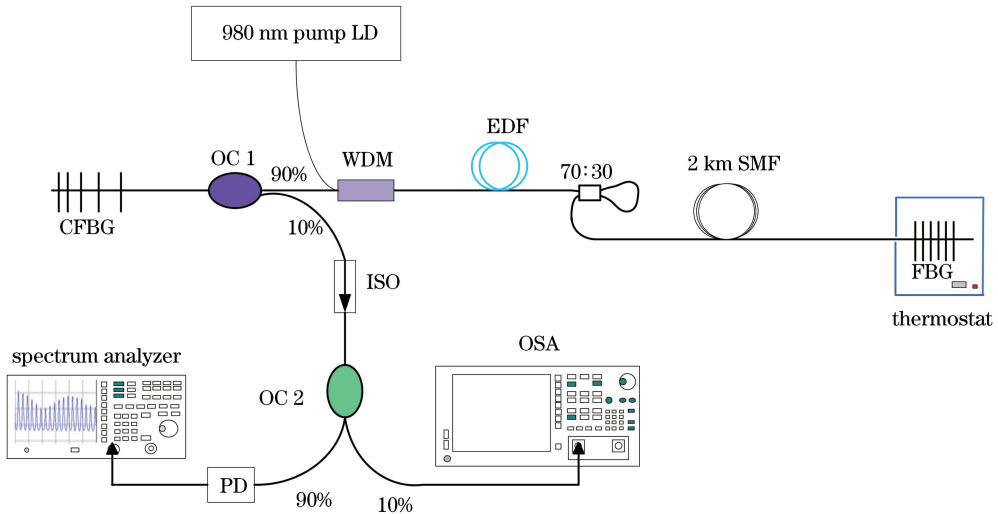


图1 基于自注入锁定的光纤光栅传感解调系统的结构原理图

Fig. 1 Schematic of fiber Bragg grating sensing demodulation system based on self-injection locking

系统解调部分采用光纤激光器结构,谐振腔的两个反射镜分别是线性啁啾光纤光栅(CFBG)以及由光纤耦合器(OC)组合而成的光纤环境。980 nm抽运光经过波分复用器(WDM)进入谐振腔,谐振腔中设有一段掺铒光纤(EDF),增益介质掺铒光纤在抽运光(LD)的激励下产生受激辐射,受激辐射的光在谐振腔内不断被放大并被啁啾光纤光栅选模,最终形成激光由光纤环境耦合出去,出射激光经过一定长度的单模光纤(SMF)后被传感光栅(FBG)所反射,传感光栅反射的光作为注入光耦合进入激光器谐振腔内进行自注入锁定。在谐振腔中会产生多纵模拍频,经光电探测器(PD)后可以在频谱仪上看到激光拍频信号。

激光谐振腔中相邻纵模频率间隔为

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nL}, \quad (1)$$

式中 c 为光在真空中的传播速度, n 为介质的折射率, L 为激光谐振腔腔长。对(1)式进行微分可得拍频的变化与腔长变化的关系为

$$\delta(\Delta\nu) \approx \Delta\nu \times \frac{\Delta L}{L}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu$ 为相邻纵模的拍频频率, ΔL 为谐振腔腔长的变化,表达式为

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \Delta\lambda \cdot c, \quad (3)$$

式中 D 是啁啾光纤光栅的色散率, $\Delta\lambda$ 为光纤光栅中心波长的变化量。根据啁啾光纤光栅的色散率,采用(3)式的形式可以得到光纤光栅中心波长的具体变化量,即实现对光纤布拉格波长的解调。

3 实验结果与分析

实验中,采用武汉光迅科技有限公司生产的啁啾光栅,带宽为 0.5 nm,色散量为 1700 ps/nm,中心波长是 1550.147 nm,啁啾光栅的时延随波长线性变化。光纤光栅的 3 dB 带宽 0.08 nm,反射率为 50%,中心波长为 1550.058 nm。激光器中的掺铒光纤长度约为 5 m,激光谐振腔的总长约 12 m,外腔中在光纤环境和传感光栅之间加入的单模光纤长

度约为 2 km。首先,解调系统在无光纤光栅反射光注入条件下,对激光器的激光输出进行验证。调节抽运光源,在光谱仪端进行观测,激光器没有稳定的波长输出,在啾啾光纤光栅反射带宽范围内观测到不稳定激光现象,如图 2 所示。

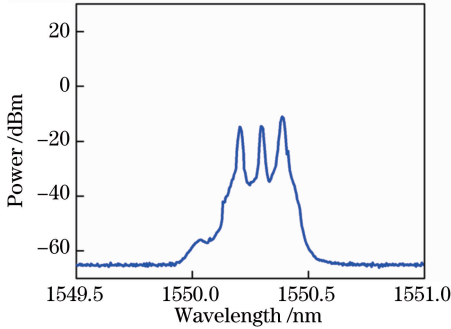


图 2 无注入锁定时激光器的输出激光谱线

Fig. 2 Laser output spectral lines without injection locking

逐步调节抽运功率达到阈值 20.6 mW,由于光纤光栅的反射光通过光纤环境注入激光器谐振腔,注入光抑制了谐振腔内的自发辐射,并锁定激光器的工作波长,通过光谱仪在啾啾光纤光栅反射带宽范围内观测到明显稳定的激光,且波长大小和远端光栅的反射波长相同,实现自注入锁定。此时光谱仪观测的激光器输出激光如图 3 所示,由(1)式可得,激光器中相邻纵模的频率间隔约为 8.36 MHz,在频谱仪观测到的拍频信号如图 4 所示。

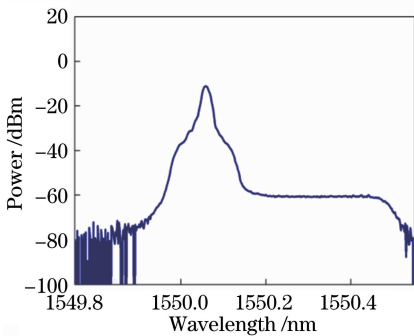


图 3 光谱仪上观测到的输出激光谱线

Fig. 3 Output laser spectral lines observed on spectrometer

观测到的拍频频率间隔与理论计算值相吻合。为了得到较大的拍频频率变化,实现更为精确的传感测量,实验中选择了相对较高的拍频频率作为观测频率,以百倍频率($V = 836.5575$ MHz)为中心频率,频谱宽度为 5 MHz 时的频谱图如图 5 所示。

方案以温度传感为例进行了实验验证。将光纤光栅传感器置于恒温箱中,调节恒温箱内的温度从 23.8 °C 以步长 0.5 °C 逐步升高到 63.3 °C,发现恒温

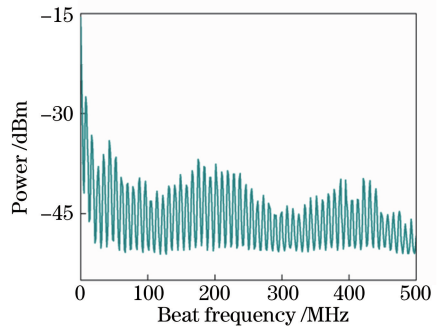


图 4 频谱仪上观测到的拍频信号

Fig. 4 Beat signals observed on spectrum analyzer

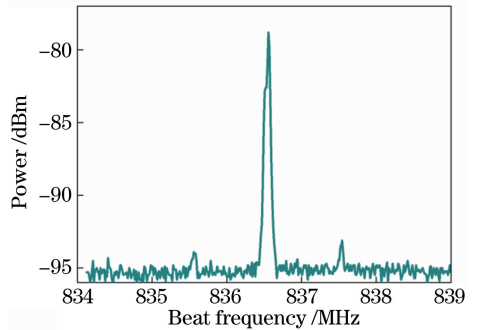


图 5 频谱仪上观测到的较高拍频频率的频谱

Fig. 5 Spectral diagram of the higher beat frequency observed on spectrum analyzer

箱中光纤光栅的中心波长随着温度的升高而变化。光纤光栅的反射光经光纤环境注入到谐振腔中,激光器工作波长发生变化,啾啾光纤光栅上相应的反射波长位置也发生移动,在频谱仪上观察到对应波长下拍频观测信号的频率移动。通过对实验数据的重复测量,图 6 显示了光谱仪上观测到的温度从 23.8 °C 以步长 5 °C 变化到 58.8 °C 时激光器输出波长的移动情况,可以发现,随着激光器工作波长的变化,观测到的拍频频率也相应变化,结果如图 7 所示。

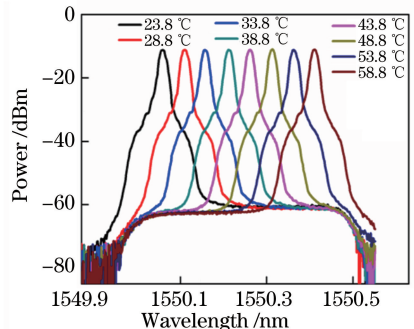


图 6 不同温度下激光器的输出谱线

Fig. 6 Laser output spectral lines under different temperatures

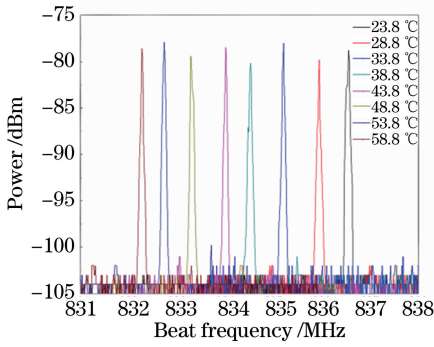


图7 不同温度下激光能量与拍频间的关系曲线

Fig. 7 Relationship between laser energy and beat frequency under different temperatures

由图6和7可知,当恒温箱内的温度升高时,光纤光栅中心波长呈增大趋势,拍频频率呈减小趋势。根据选定的观测频率的变化量,已知啁啾光栅的色散率 D ,由(3)式可得恒温箱内的温度变化量 ΔT 和观测频率变化量 $\delta(\Delta\nu)$ 的关系,即

$$-\frac{2\delta(\Delta\nu)L}{\Delta\nu \cdot D \cdot c \cdot \lambda} = (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T, \quad (4)$$

式中 λ 是远端光纤光栅的中心波长, α_s 是光纤的热膨胀系数, ζ_s 为光纤的热光系数。

利用软件拟合温度从23.8 °C以步长0.5 °C变化到63.3 °C时的波长变化曲线以及观测频率的变化曲线分别如图8和9所示,拟合度分别为99.99%和99.599%,基本呈线性变化。

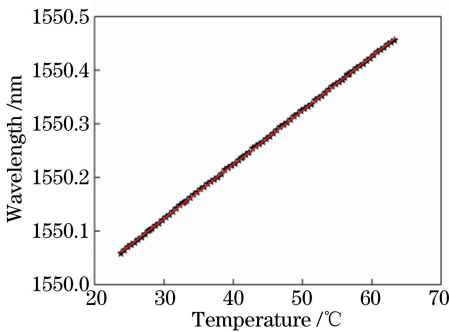


图8 不同温度下波长的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of wavelength under different temperatures

本文测量结果的精确程度受激光拍频稳定性的影响,实验中提出了三种解决方案:1)电域频谱的时间平均法,通过对所测得的拍频信号利用数字滤波器进行时间平均来提高稳定性。2)选用一段3 m的未抽运的掺铒光纤作为饱和吸收体对谐振腔的一些模式进行选择吸收,从而达到锁模的目的,实现拍频信号的稳定。3)选择合适的980 nm抽运功率,使其刚高于阈值,从而达到稳定拍频的目的。

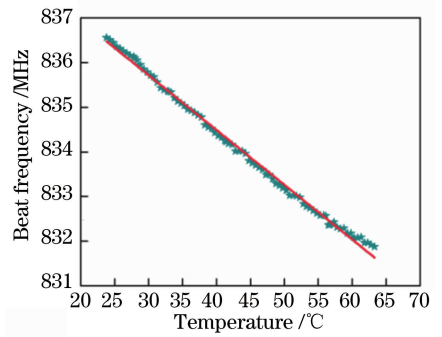


图9 不同温度下拍频频率的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of beat frequency under different temperatures

通过检测温度参数来校验系统的性能,检测结论与设置的相应温度数据基本相符,证实了本方案的有效性和可操作性。但由于啁啾光栅的群时延谱是非理想线性的,存在着起伏抖动,即存在多个波长处对应的群时延是相同的,将会在很大程度上对检测结果的准确度造成误差干扰。拍频观测信号的准确观察记录将有利于温度变化的高精度检测,本文频谱仪分辨率为1 kHz,如果选择更高频率的拍频信号进行观测或采用更高分辨率的频谱仪,可以进一步提高测量精度。

4 结 论

提出了一种基于自注入锁定实现光纤光栅传感的解调方法,采用自注入锁定实现长距离光纤光栅传感解调,并以温度传感为例完成了实验测量。利用啁啾光纤光栅的色散特性,将激光器波长的变化转化为谐振腔腔长的变化,不同于以往改变腔长的方法,达到了传感解调的目的。所提方法具有解调系统简单、对现有的光栅传感系统兼容性好等优点,光纤光栅的传感距离不再受限于激光器的腔长。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z L, Wang Y, Sun Y Y, *et al.* Analysis and experimental study on the strain transfer mechanism of an embedded basalt fiber-encapsulated fiber Bragg grating sensor [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 017105.
- [2] Zhou J, Zhou Z, Zhang D. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(11): 1117-1122.
- [3] Tian S Z, Zhang G Q, Wang D P. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating

- sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
- 田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
- [4] 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.
- [5] Li H N, Li D S, Song G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering [J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1647-1657.
- [6] Majumder M, Gangopadhyay T K, Chakraborty A K, *et al.* Fibre Bragg gratings in structural health monitoring: present status and applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 150-164.
- [7] Wang P, Zhao H, Liu J, *et al.* Dynamic real-time calibration method for fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on tunable Fabry-Perot filter [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806006.
- 王鹏, 赵洪, 刘杰, 等. 基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806006.
- [8] Song X G, Liu P, Cheng Z M, *et al.* An algorithm of dynamic load identification based on FBG sensor and Kalman filter [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328012.
- 宋雪刚, 刘鹏, 程竹明, 等. 基于光纤光栅传感器和卡尔曼滤波器的载荷识别算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328012.
- [9] Jung E J, Kim C S, Jeong M Y, *et al.* Characterization of FBG sensor interrogation based on a FDML wavelength swept laser[J]. Optics Express, 2008, 16(21): 16552-16560.
- [10] Zou H B, Liang D K, Zeng J. Dynamic strain measurement using two wavelength-matched fiber Bragg grating sensors interrogated by a cascaded long-period fiber grating [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 199-203.
- [11] Guan B O, Jin L, Zhang Y, *et al.* Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1097-1112.
- [12] Guan B O, Tam H Y, Lau S T, *et al.* Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 169-171.
- [13] Haderer O, Rønnekleiv E, Ibsen M, *et al.* Polarimetric distributed feedback fiber laser sensor for simultaneous strain and temperature measurements[J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 1953-1958.
- [14] Zhang Y, Guan B O, Tam H Y. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement [J]. Optics Communications, 2008, 281(18): 4619-4622.
- [15] 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.
- [16] Ohtsubo J. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1141-1154.
- [17] Masoller C, Abraham N B. Low-frequency fluctuations in vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers with optical feedback [J]. Physical Review A, 1999, 59(4): 3021-3031.
- [18] Viktorov E A, Mandel P. Low frequency fluctuations in a multimode semiconductor laser with optical feedback [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(15): 3157-3160.
- [19] Gao Y, Wang J, Wang W R, *et al.* Wavelength tunable laser based on Fabry-Perot laser self-injection locking [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061401.
- 高毅, 王菊, 王文睿, 等. 基于法布里-珀罗激光器自注入锁定的波长可调谐激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061401.