

# 一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置

王 旭 张豪杰 温 泉 陈龙飞 王 芳 刘玉芳

河南师范大学物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007

**摘要** 结合线性啁啾光纤布拉格光栅(CFBG),设计了一种基于激光拍频实现应力测量的传感装置。系统采用 CFBG 的时延改变谐振腔的腔长的方法,把波长变化转化为腔长变化,不同于以往改变腔长的方法,达到波长解调实现传感测量的目的。对线性 CFBG 的时延谱进行了测量,并对系统结构和测量原理进行了详细的阐述,对测量结果和精确度也进行了分析与计算。谐振腔长变化可达到 6.2 cm,腔长变化值与腔长比达到 2.55%,使应力测量精度可以提高到  $10^{-7}$  N。

**关键词** 光纤光学; 应力; 拍频; 啁啾光纤布拉格光栅

**中图分类号** O437.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0801011

## A Stress Fiber Sensor Based on Laser Beat Frequency

Wang Xu Zhang Haojie Wen Quan Chen Longfei Wang Fang Liu Yufang

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

**Abstract** Combining the characteristics of linear chirped fiber Bragg grating (CFBG), a stress fiber sensor based on laser beat frequency is designed. Using the method of CFBG converting the wavelength change into the length change of resonant cavity, the wavelength demodulation is achieved. The proposed method is different from previous methods changing the cavity length. The group delay of linear CFBG is measured and the system structure and principle are described in detail. Besides, the measuremental results and precision are analyzed and calculated. The length change of cavity can reach 6.2 cm, which accounts for 2.55% of total cavity length. The results show that the strain measurement precision can be up to  $10^{-7}$  N.

**Key words** fiber optics; strain; beat frequency; chirped fiber Bragg grating

**OCIS codes** 060.2300; 060.2410; 140.3510

## 1 引 言

在光纤传感领域,光纤光栅传感器的应用前景十分广阔,它具有抗电磁干扰、尺寸小、重量轻、耐腐蚀等优点。光纤光栅作为传感器件,感测信息作用在光纤光栅上被转化为布拉格波长的移动。相对于其他传感元件,光纤光栅传感器的优点在于波长绝对编码、不受系统损耗和光源功率波动的影响、稳定性好、灵敏度高;采用适当技术可以实现温度、应变、压力、位移、加速度、电流、电压、磁场、浓度等多参量的测量;还可埋入被测结构内部或粘贴其表面,其应用价值显著提高。但如何解调波长编码信号是实现光纤光栅传感的关键。传统测量是通过光谱测量布拉格波长的变化<sup>[1-2]</sup>,不仅系统价格昂贵,而且解调部分多因采用干涉法致使系统稳定性受到影响,因此,如何更好地实现波长解调成为了人们关注的焦点。比如,最初是利用分布反馈式(DFB)激光器实现拍频,它基于光纤双折射形成<sup>[3-7]</sup>,对谐振腔要求很短(一般 10 mm 左右),通过感测信息改变光纤双折射实现测量,易受外界因素影响。为了消除短腔的弊端,1)采用长腔拍频实现对温度变化信息的提取,如基于两对光纤光栅形成的拍频系统<sup>[8]</sup>、两个光纤光栅组成的 DFB 激光器拍频<sup>[9]</sup>,以及利用多个

**收稿日期:** 2016-03-16; **收到修改稿日期:** 2016-04-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(61307122,61475043)、河南省基础和先进技术研究项目(142102210450)、研究生科研创新项目(YL201404)

**作者简介:** 王 旭(1965—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信技术、电磁场与微波技术及其应用方面的研究。

E-mail: zhj815616@126.com

超弱反射光纤光栅的拍频频谱<sup>[10]</sup>,然而光纤光栅带宽较窄限制了其测量范围;2)把组成谐振腔的光纤多次缠绕在被测单元上<sup>[11-14]</sup>,被测单元的变化拉伸光纤致使腔长变化,但由于受到光纤拉伸强度的限制使腔长变化不明显,测量精度得不到提高;3)通过多纵模拍频<sup>[15-20]</sup>形成的拍频频率间隔的变化感知传感信息,但也存在腔长变化量小使测量精度受到限制的问题。因此,寻找切实可行、精度较高的解调方案,是使光纤光栅传感走向实用化所必须解决的首要问题。

本文基于 DBR 激光器实现拍频,选择了时延量大、线性度好的啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)作为反射镜,使光纤光栅波长的变化转化为腔长的变化,设计了一种免于受光纤双折射影响同时可以提高测量精度的方案。系统通过拍频频率变化来测量,不受系统损耗和光源波动的影响,利用激光拍频成功实现了对应力的测量,稳定性好。由于 CFBG 时延量大,很小的波长变化即会引起谐振腔长发生大的变化,相对腔长变化量与总腔长比达到 2.55%,大大提高了测量精度。在频谱分析仪分辨率为 2.5 kHz 的情况下,应力测量精度可达到  $10^{-7}$  N。系统不仅结构简单、成本低,而且把光信号测量转化为电信号测量,为数据处理提供了方便,具有重要的参考意义。

## 2 系统结构与原理

系统结构如图 1 所示。光纤光栅(FBG)和线性 CFBG 组成一个光纤谐振腔,980 nm 抽运光源(pump LD)通过波分复用器(WDM)进入光纤谐振腔,光纤谐振腔中设有非线性增益的掺铒光纤,当抽运电流达到阈值,在谐振腔中产生多纵模拍频,经探测器(PD)探测后在射频(RF)频谱分析仪上可以看到稳定的激光拍频信号。

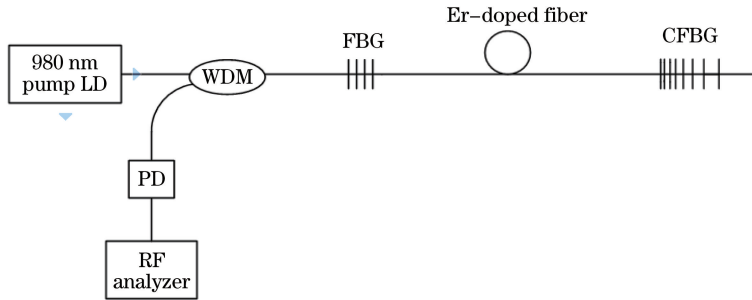


图 1 利用激光拍频实现应力测量的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of strain sensor by using laser beat frequency

激光谐振腔中相邻纵模间的拍频频率为

$$\Delta\nu = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L}, \quad (1)$$

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的变化关系为

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

式中  $\Delta L$  是谐振腔腔长的变化, $\Delta\nu$  为相邻纵模的拍频频率变化。

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

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - p_e) X_e, \quad (4)$$

式中  $D$  是 CFBG 的色散率, $\lambda$  和  $\Delta\lambda$  分别是 FBG 中心波长和其变化量, $p_e$  是光纤的有效弹光系数(约为 0.22), $X_e$  为光纤光栅的轴向应力。根据 CFBG 的色散率,采用(3)式的形式可以得到 FBG 中心波长的具体变化量,即实现对光纤布拉格波长的解调,进而由(4)式求出外界轴向应力。利用 CFBG 波长的变化来改变谐振腔长的变化,不同于先前的方法,使相对腔长变化量大大增加。测量系统不仅简单,而且测量精度也进一步得到提高。

### 3 实验结果与分析

实验中,FBG 的 3 dB 带宽为 0.08 nm、反射率为 60%,CFBG 是由武汉光迅科技股份有限公司提供,带宽为 0.5 nm,色散率为 1700 ps/nm,时延随波长线性变化,FBG 和 CFBG 中心波长分别是 1550.146 nm 和 1550.147 nm。图 2、图 3 分别为 CFBG 的反射谱和时延谱,测试数据由厂家给出,测试系统包括色散测试仪器 Agilent 86038B 与可调谐激光器 81642A。光谱分析仪采用横河 Yokogawa AQ6370C,分辨率为 0.01 nm,频谱分析仪采用安泰信 AT6030DM,分辨率为 2.5 kHz。

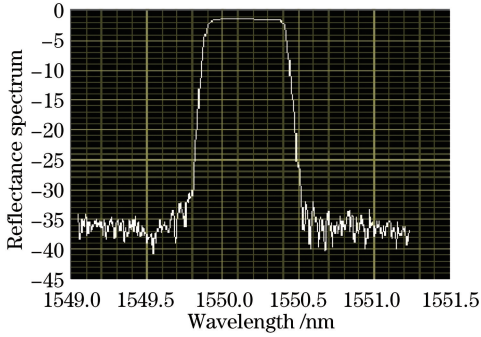


图 2 啁啾光纤光栅反射谱

Fig. 2 Reflectance spectrum of CFBG

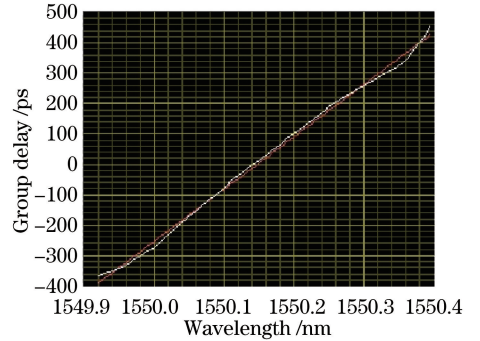


图 3 啁啾光纤光栅的时延谱

Fig. 3 Group delay of CFBG

实验中选取 CFBG 是非常关键的。1) 波长变化引起腔长的变化由它实现;2) 它的时延是否线性对测量精度至关重要。因此实验先对 CFBG 的部分带宽进行了时延测量,测量结果和公司提供的基本一致,如图 4 所示,拟合度  $R$  达到 99.298%。

选择线性度好的带宽进行传感测量。掺铒光纤长度约 1 m,激光谐振腔的总长约 2.4 m,拍频频率与理论计算值相吻合,实验中选择了强度相对较高的拍频频率( $\nu=41.3375$  MHz)作为观察信号。对 FBG 逐渐施加轴向应力(应力的大小根据 FBG 中心波长变化推导得出),随着应力的不断增大,FBG 中心波长随之变化,对应在 CFBG 上的波长位置也相应发生移动,图 5 为拍频频率变化过程。

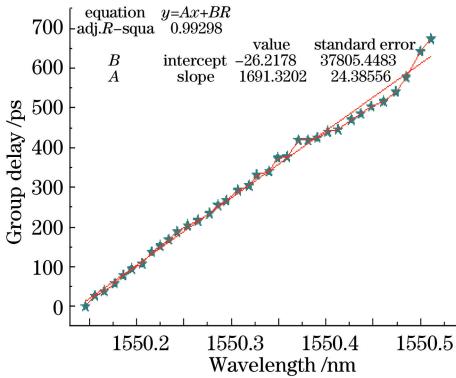


图 4 啁啾光纤光栅部分带宽时延谱

Fig. 4 Group delay of part bandwidth of CFBG

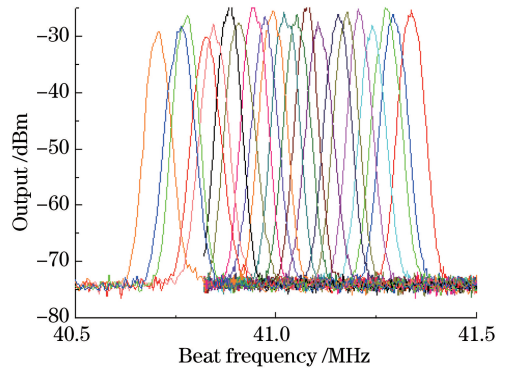


图 5 拍频信号变化过程

Fig. 5 Changes of beat frequency signal

已知频率的变化,根据 CFBG 的色散率,可知谐振腔长的变化量。其中,FBG 的栅区长度变化可以忽略不计,腔长的变化最终反映在拍频信号上,用 OriginPro8.0 软件拟合不同应力下的拍频频率,如图 6 所示,应力和拍频频率基本呈线性变化,拟合度  $R$  达到 99.736%,在频谱仪分辨率为 2.5 kHz 的情况下,应力测量精度可达  $10^{-7}$  N,比分辨率为 0.01 nm 的光谱仪测量精度提高  $10^4$  倍。实验中,腔长变化量为 6.2 cm,相对腔长变化占总腔长的 2.55%,而光纤的拉伸强度约为 0.5%<sup>[21]</sup>,比拉伸光纤普通的多纵模测量方法提高 5 倍左右。如果频谱分辨率更高或者谐振腔更短,还可以进一步提高测量精度。同时,在保证测量精度的前提下,为了提供拍频稳定性,使用并没有完全被抽运的掺铒光纤,因为未抽运的掺铒光纤作为饱和吸收体<sup>[22]</sup>可进一步实现锁模,稳定拍频。

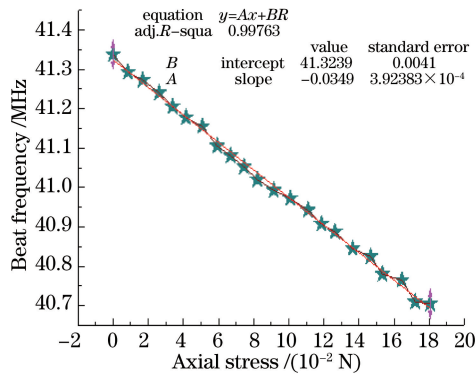


图 6 不同应力下拍频频率的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of beat frequency under different stresses

## 4 结 论

设计了一种基于啁啾光纤光栅实现 DBR 激光拍频的测量装置,利用激光拍频解调光纤光栅波长,不受系统损耗和光源波动的影响,系统更稳定、准确。利用 CFBG 的时延来改变谐振腔的腔长,不同于以往改变腔长的方法,大大提高了相对腔长的变化量,相对腔长变化量占总腔长的 2.55%;CFBG 大的色散率也大大提高了测量精度,并且波长变化具有连续性,可以实现连续测量。在频谱分析仪分辨率为 2.5 kHz 情况下,应力测量精度就可达到  $10^{-7}$  N,如果频谱仪分辨率更高或者腔长更短,测量精度会进一步得到提高,而且把光信号测量转化为电信号测量,为数据处理提供了方便。

## 参 考 文 献

- 1 Zeng X, Rao Y. Simultaneous static strain, temperature and vibration measurement using an integrated FBG/EFPI sensor [J]. Chin Phys Lett, 2001, 18(12): 1617-1619.
- 2 Carr J J, Saikkonen S L, Williams D H. Refractive index measurements on single-mode fiber as functions of product parameters, tensile stress and temperature[J]. Fiber Integrated Opt, 1990, 9(4): 393-396.
- 3 Guan B O, Jin L, Zhang Y, *et al.* Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors[J]. IEEE J Lightwave Technol, 2011, 30(8): 1097-1112.
- 4 Guan B, Tam H Y, Lau S T, *et al.* Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(1): 169-171.
- 5 Haderl O, Rnnkleiv E, Ibsen M, *et al.* Polarimetric distributed feedback fiber laser sensor for simultaneous strain and temperature measurements[J]. Appl Opt, 1999, 38(10): 1953-1958.
- 6 Zhang Y, Guan B O, Tam H Y. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement[J]. Opt Commun, 2008, 281(18): 4619-4622.
- 7 Lu Wengao, Sun Qizhen, Wo Jianghai, *et al.* High sensitivity micro vibration sensor based on distributed Bragg reflection fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0728006.  
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728006.
- 8 Shao L Y, Dong X, Zhang P, *et al.* High-resolution strain and temperature sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(20): 1598-1600.
- 9 Gao L, Huang L, Chen L, *et al.* Study on fiber ring laser in sensing application with beat frequency demodulation[J]. Opt Laser Technol, 2013, 45(1): 137-141.
- 10 Li Zhengying, Sun Wenfeng, Wang Honghai. Ultra weak reflective fiber Bragg grating sensing technology research based on optical frequency reflection technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806003.  
李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806003.
- 11 Sun Q, Liu D, Xia L, *et al.* Experimental demonstration of multipoint temperature warning sensor using a multichannel matched fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(11): 933-935.

- 12 Monzón-Hernández D, Mora J, Pérez-Millán P, *et al.* Temperature sensor based on the power reflected by a Bragg grating in a tapered fiber[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(12): 2393-2396.
- 13 Chan P K C, Jin W, Lau K T, *et al.* Multi-point strain measurement of composite-bonded concrete materials with a RF-band FMCW multiplexed FBG sensor array[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2000, 87(1-2): 19-25.
- 14 Liu L, Zhang H, Zhao Q, *et al.* Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity[J]. *Opt Fiber Technol*, 2007, 13(1): 78-80.
- 15 Zhang W T, Li F, Liu Y L, *et al.* Ultrathin FBG pressure sensor with enhanced responsivity[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(19): 1553-1555.
- 16 Yong J C, Yun S H, Lee M L, *et al.* Frequency-division-multiplexed polarimetric fiber laser current-sensorarray[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(16): 1097-1099.
- 17 Bohnert K, Frank A, Rochat E, *et al.* Polarimetric fiber laser sensor for hydrostatic pressure[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(1): 41-48.
- 18 Zhang W, Zhao Q. Analyses and measurement of strain and deflection of standard beam based on fiber grating[C]. *SPIE*, 2001, 4579: 269-273.
- 19 Hartog A H, Conduit A J, Payne D N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibres[J]. *Opt Quantum Electron*, 1979, 11(3): 265-273.
- 20 Méndez-Zepeda O, Muñoz-Aguirre S, Beltrán-Pérez G, *et al.* Alternative interrogation method for a dual laser sensor based on fiber Bragg gratings to measure temperature using the fundamental beating frequency intensity[J]. *Opt Laser Technol*, 2015, 67(9): 159-163.
- 21 Li Ranshan, Lu Chengbao. Tensile strain properties of optical fiber based on ME99A[J]. *Modern Cable Transmission*, 1996, 12(1): 1-8.  
李然山, 卢成宝. 用 ME99A 测试光纤拉伸应变特性[J]. *现代有线传输*, 1996, 12(1): 1-8.
- 22 Xu Ou. Research progress of all single longitudinal fiber mode laser based on fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030010.  
许 鸥. 基于光纤光栅技术的全光纤单纵模激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030010.