

利用扫频光纤激光器实现低频周期振动传感

谢作生 李伟文 林伟鹏 董小鹏

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 针对低频周期振动光纤传感的应用,通过光纤光栅的周期调谐,构建了环形腔结构的低频周期扫频光纤激光器。以光纤光栅法布里-珀罗腔为梳状滤波器,利用光学倍频法设计了光源扫频周期的测量系统。实验产生了 7.2 Hz 的周期扫频激光输出,通过测量系统得到了 14.39 Hz 的倍频电信号。实验结果表明该系统可有效地模拟低频光源周期扫频,并进行扫频频率的准确测量。

关键词 激光器;周期扫频;光学倍频;光纤光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1205006

Implementation of Low-Frequency Periodic Vibration Sensor Based on Frequency-Swept Fiber Laser

Xie Zuosheng Li Weiwen Lin Weipeng Dong Xiaopeng

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract To simulate the periodic and weak vibration in the fiber sensor application, a loop-cavity fiber laser of the periodic frequency sweeping is constructed by tuning the fiber Bragg grating (FBG). To measure the sweeping frequency, the optical frequency multiplication is applied with the help of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity. This fiber laser has experimentally radiated a 7.2 Hz frequency-swept laser and 14.39 Hz electric signal is obtained by the frequency multiplication method. The experimental results show that this system can efficiently simulate the periodic frequency-swept light wave and exactly measure the sweeping frequency.

Key words lasers; periodic frequency sweeping; optical frequency multiplication; fiber grating

OCIS codes 120.5820; 120.2230; 060.3735; 050.2230; 140.3600

1 引言

周期扫频光源可应用于微波信号的光子学产生和光纤传感的伪外差解调,但它们多是利用半导体激光器直接调制,或基于相位调制器的外调制法实现^[1~3]。它们输出的扫频激光光谱较宽、精度不高,而利用光纤激光器能较好地解决这一问题。光纤激光器有线形腔和环形腔等多种结构。环形腔光纤激光器由于谐振腔长较大,能够获得较窄的线宽和较高的输出功率。可在环形腔中插入若干个隔离器,保证激光的单向运行,以避免空间烧孔效应^[4]。

周期扫频光源的扫频频率必须在时域进行测量,但由于各波长下恒定的光强值,使其无法直接经

光电转换由光强变化得到扫频频率。另外,在振动、声波以及水听器的光纤传感中,往往由于周期性振动产生低频周期扫频光波,也需要对其扫频周期进行测量和解调^[5,6]。

本文利用光纤光栅,通过机械振动,构造环形腔结构的低频周期扫频光纤激光器;以光纤布拉格光栅(FBG)法布里-珀罗(FP)腔作为周期梳状滤波器,通过光学倍频法,实现对低频周期扫频光源扫频频率的测量。

2 光纤激光器调谐结构分析

采用掺铒光纤构造环形腔光纤激光器,如图 1

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)资助课题。

作者简介: 谢作生(1977—),男,硕士,工程师,主要从事电子线路实验教学光纤传感技术和嵌入式系统应用技术研究。

E-mail: zshxie@xmu.edu.cn

所示。将光纤光栅用非应力胶固定在等强度悬臂梁中线上,通过拉伸悬臂梁的方式控制 FBG 的中心波长 λ_B ,作为激光器的选频调谐机制。

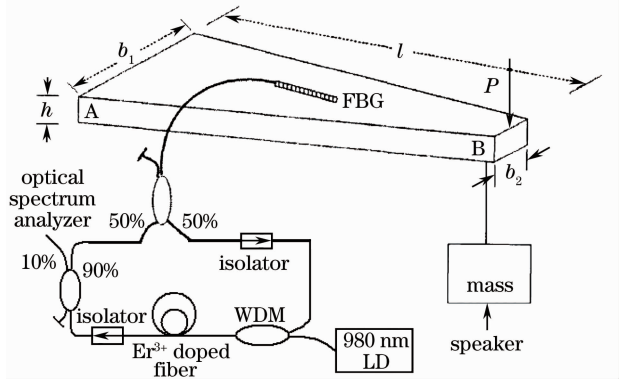


图 1 可调谐光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of tunable fiber laser

由耦合模理论可知, λ_B 满足相位匹配条件: $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, 其中 n_{eff} 为光纤传播模式的有效折射率, Λ 为光栅周期。在温度和应变作用下,会导致 FBG 中心反射波长的变化^[7,8]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (1)$$

式中右侧第一项表示温度引起的波长漂移, α_f 表示光纤热膨胀系数, ξ 为光纤材料热光系数, ΔT 表示温度变化量;第二项表示轴向应变引起的波长漂移, P_e 为光纤材料的弹光系数,对于通常的掺锗光纤约为 0.21, $\Delta\epsilon$ 为应变变化量。

按等强度悬臂梁调谐装置模型,设 d 为悬臂梁的扰度,表示悬臂梁在加力点竖直方向上的位移,由弹性力学可得沿悬臂梁方向应变 $\Delta\epsilon$ 与扰度 d 的关系为^[7,8]

$$\Delta\epsilon = -\frac{h}{l^2}d, \quad (2)$$

式中 l 表示悬臂梁固定端到加力点的距离, h 为悬臂梁厚度。

对于等强度悬臂梁,沿悬臂梁方向各点处的应变均相等,可认为粘贴在悬臂梁表面的光栅应变等于悬臂梁表面的应变,则在恒温条件下,由(1)式可得光栅中心波长随应变的变化关系为 $\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\epsilon$ 。将(2)式代入,可得光栅中心波长漂移量与扰度的关系

$$\Delta\lambda_B = -\frac{\lambda_B(1 - P_e)h}{l^2}d. \quad (3)$$

可以看出,波长漂移量与扰度具有线性关系,随着扰度的增加,光栅的中心波长减小。图 2 为忽略温度影响,加载不同质量块时,悬臂梁上光纤光栅的反

射谱。

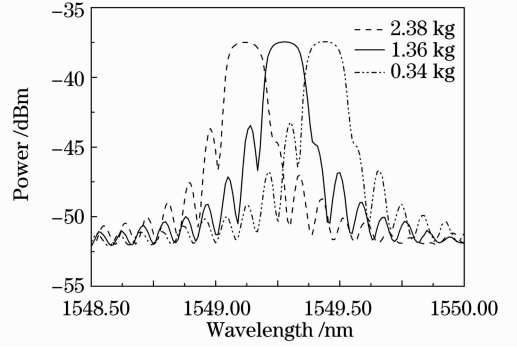


图 2 不同质量块作用时 FBG 反射谱

Fig. 2 Reflection spectra of FBG at different masses

由于把该光纤光栅作为激光器的选频结构,激光器输出的激光波长将等于光栅的中心波长,因此激光波长 $\lambda(d)$ 也将随扰度的增大而线性减小:

$$\lambda(d) = \lambda_B - \frac{\lambda_B(1 - P_e)h}{l^2} \cdot d. \quad (4)$$

实验中,选取 λ_B 为 1549.49 nm 的光栅,其 P_e 约为 0.21,悬臂梁参数 $h=0.4$ cm, $l=37.3$ cm。取扰度 d 单位为厘米,此时(4)式可以写为

$$\lambda = 1549.49 - 0.357d. \quad (5)$$

在 19 °C 恒温下,通过加载不同质量块来测量扰度与输出激光波长的关系。图 3 为测得的实验数据及据此绘制的拟合曲线。可以看出,光纤激光器输出激光波长与悬臂梁受到的扰度值基本呈线性关系。拟合曲线斜率为 0.360,这表示每厘米的扰度将使激光波长向短波长方向漂移 0.360 nm,与(5)式的理论值基本一致,相对误差约为 0.83%。

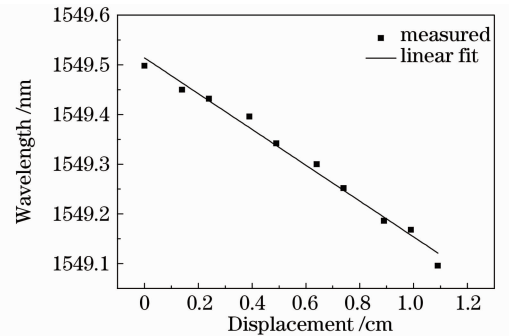


图 3 扰度与激光波长关系

Fig. 3 Wavelength variation with displacement

图 4 为不同扰度下激光器的输出光谱曲线。可以看出,当悬臂梁扰度在 0~1.09 cm 之间变化时,输出激光波长将在 1549.096~1549.498 nm 之间变化,波长变化范围约为 0.4 nm。在不同扰度下,激光谱线的形状基本不变,平均输出功率约为 -13.12 dBm,测得的激光线宽约为 0.017 nm。

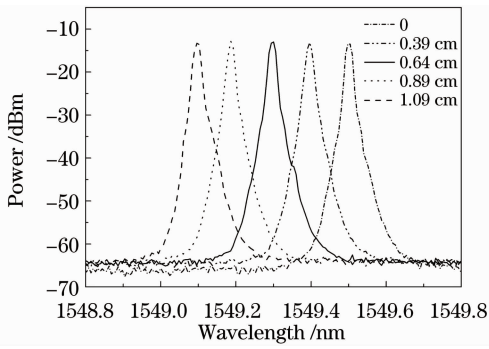


图 4 不同扰度下输出激光谱线

Fig. 4 Laser frequency spectra at different displacements

3 激光器周期扫频的实现与测量

3.1 周期扫频的实现

如图 1 所示,在质量块下方紧贴放置一个扬声器。扬声器是一种电声转换部件,它把置于固定磁场中的通电导体作为音圈。由信号发生器对扬声器输入一个音频电流信号,音圈会受到一个大小与音频电流成正比、方向随音频电流变化而变化的磁场力作用。这样与音圈相连的振膜随之发生振动,扬声器振膜的振动频率与输入交变电信号的频率相等。

扬声器的振动驱使质量块受迫振动,从而带动悬臂梁的上下振动,并使粘贴在悬臂梁上的光栅发生周期性形变。光纤光栅作为光纤激光器的选频调谐结构,其中心波长的周期变化将使光纤激光器输出波长周期变化的扫频激光。此时,激光器输出光波的扫频频率等于输入电信号的频率。

装置中,可通过调节信号发生器输出电信号的振幅来控制悬臂梁的振幅,进而调节输出激光的频率变化范围(扫频范围) Δf ;通过调节电信号的频率来控制悬臂梁的振动频率,进而调节输出激光的扫频频率 f_{sw} ;通过加载不同质量块或者选用不同波长的光栅来调节输出激光的中心频率 f_c 。

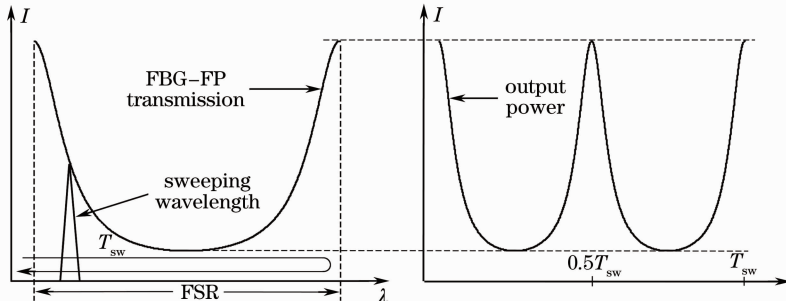


图 6 梳状滤波器倍频原理示意图

Fig. 6 Optical frequency multiplication based on periodic filter

对于相同输入电信号幅值,当扬声器的振动频率接近悬臂梁的固有频率时将发生共振,此时悬臂梁的振幅(扰度)最大,对应有最大的扫频范围。本实验的悬臂梁固有频率约为 7 Hz,故为使激光器输出的扫频光波有较大的扫频范围,信号发生器输出信号频率取在 7 Hz 附近。

3.2 扫频频率的测量方法

扫频激光器虽有输出波长变化,但其强度保持不变,因此光电转换后无法直接利用示波器测量激光器的扫频频率。为验证激光器的周期扫频特性,提出利用扫频倍乘法实现扫频频率的测量。如图 5 所示构建实验测试系统,它由信号发生器、扬声器振动装置、基于 FBG 的可调谐光纤激光器、FBG-FP 腔、光电探测器和示波器组成。激光器产生的扫频光波经过 FBG-FP 梳状滤波器后再进行光强测量。

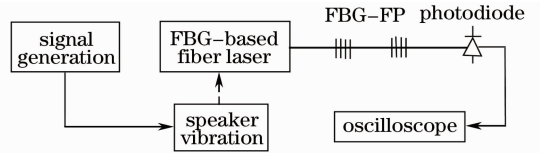


图 5 激光器周期扫频和测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser frequency sweeping and measurement

通过改变信号发生器输入信号的振幅调节激光器的扫频范围 Δf ,使扫频范围 Δf 与梳状滤波器的自由谱宽(FSR) R_{FS} 具有整数倍关系: $\Delta f/R_{FS} = N$, N 为正整数。这样在一个扫频周期内,激光将扫过 FBG-FP 传递函数上的 $2N$ 个谐振峰。此时由于梳状滤波传递函数的周期起伏特性,波长变化的光波将转化成强度变化的光波,它们的频率将满足

$$f = 2Nf_{sw} = \frac{2\Delta f}{R_{FS}}f_{sw}, \quad (6)$$

式中 f 为由光电探测器得到的光强变化频率。

假设扫频光波的扫频范围 Δf 等于梳状滤波器的频谱宽度 FSR,如图 6 所示,可以看到扫频激光

在一个扫频周期 T_{sw} ($T_{sw} = 1/f_{sw}$) 内扫过 FBG-FP 梳状滤波器的两个谐振峰, 输出光强将出现两个峰值, 即光强变化频率为 $2f_{sw}$, 光电探测器得到频率为 $2f_{sw}$ 的电信号。可见此过程实现了对信号发生器输出信号的二倍频, 或者说, 由探测器测得的电信号频率即可推算出光源的扫频频率为 f_{sw} 。

应当注意的是, 倍频法必须满足 N 为整数的条件, 否则可能引入其他频率分量或者导致倍频信号的功率偏小。在上面的二倍频说明中, 当 $\Delta f < R_{FS}$ 时, 在一个扫频周期内扫频激光在扫过第二个谐振峰时将不会达到其峰值, 导致输出光波在半个扫频周期时刻 ($0.5T_{sw}$) 形成的谐振峰峰值偏小, 尽管此时输出光强随时间的变化频率为 $2f_{sw}$, 但从频谱上看对应 $2f_{sw}$ 频率的功率将会偏小甚至趋于 0。当 $\Delta f > R_{FS}$ 时, 在半个扫频时刻 ($0.5T_{sw}$) 本应产生谐振峰的位置出现了下陷, 这在频谱上相当于产生了其他分量的谐振频率。

4 实验结果与讨论

在室温 19 °C 下, 悬臂梁上加载质量为 2.38 kg 的质量块, 此时悬臂梁上光栅的中心波长为 1549.12 nm。图 7 为此波长附近 FBG-FP 滤波器透射谱的实测值及拟合曲线。可以看出, 在 1549.12 nm 波长附近 FBG-FP 滤波器的自由谱宽为 0.056 nm。

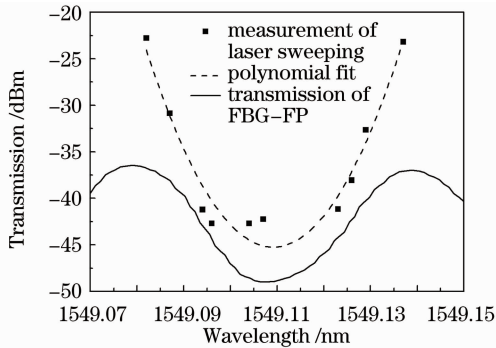


图 7 FBG-FP 腔透射谱与激光器扫频范围

Fig. 7 Transmission spectrum of FBG-FP cavity and laser frequency range

如图 5 所示, 信号发生器输入一个正弦电信号, 由扬声器的振动实现对激光器波长的调制, 产生所需的扫频激光。信号发生器输出正弦信号振幅为 10 V, 频率为 7.2 Hz, 此时悬臂梁最大扰度约为 1.5 mm, 由 (3) 式可得激光波长的扫频范围约为 0.0536 nm, 基本等于 FBG-FP 滤波器的自由谱宽, 因此在一个扫频周期内可两次扫过滤波器的谐振

峰, 产生二倍频电信号。图 8 为示波器中测得的电压随时间变化曲线。

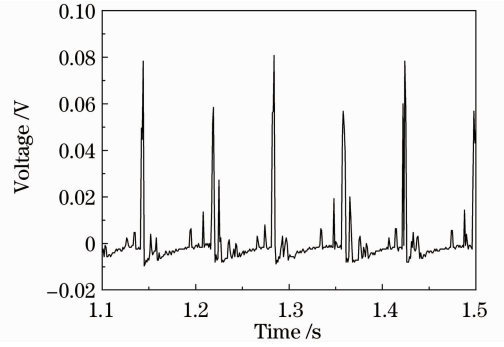


图 8 示波器测得电压信号

Fig. 8 Measured electric signal after frequency multiplication

由图 8 可见, 扫频光源波长的周期性变化, 经 FBG-FP 梳状滤波器, 转换成光强的周期变化, 即经光电探测器得到周期变化的电信号。在示波器中, 电信号以脉冲形式周期出现, 相邻脉冲峰值间隔约为 0.07 s, 对应频率为 14.39 Hz。由此可计算出光源的扫频频率为 7.19 Hz, 与信号发生器输出电信号频率一致。

同时示波器中电信号脉冲峰值并不一致, 有两个不同取值, 分别为 0.08 V 和 0.06 V, 并交替出现。这是由于悬臂梁振动幅度调节装置的精度不够, 没能保证光波的扫频范围完全等于梳状滤波器的自由谱宽。正是由于扫频范围 (0.0536 nm) 小于滤波器的自由谱宽 (0.056 nm), 即前面分析中的 $\Delta f < R_{FS}$, 扫频光波在扫过梳状滤波器第二个谐振峰时, 没能达到谐振峰的峰值, 导致在该时刻输出光波的光强偏低。

FBG-FP 梳状滤波器采用 FBG 作为反射面, 具有很小的反射损耗, 可以产生很窄的谐振峰线宽。其结构紧凑, 制作简单, 通过调节腔长容易实现很窄的自由谱宽^[9,10], 即使激光器扫频范围较小, 也容易实现光学扫频倍频。也正是由于 FBG-FP 滤波器透射谱的线宽极窄, 透过光强的的占空比较小, 因此在图 8 中电信号近似表现为脉冲序列。

此外, 悬臂梁在扬声器作用下作受迫振动的过程中可能存在细微碰撞, 因此电信号中存在着微小的噪声。事实上, 由于光栅是直接粘贴在悬臂梁表面, 外界环境的振动或者风的影响, 都可引起悬臂梁的微小振动从而导致光栅反射波长的漂移。温度的变化也会对光栅的波长产生影响。所以在实验中必须保持周围环境的封闭以及温度稳定。

5 结 论

通过对光纤光栅的周期调谐,实现了基于环形腔结构光纤激光器输出波长的周期扫频。以 FBG-FP 腔作为梳状滤波器,采用光学倍频法实验测量了低频周期扫频光源的扫频频率,验证了基于 FBG-FP 腔光学倍频法测量激光扫频周期的可行性。本实验对于声波、振动以及水听器的光纤传感有实际应用意义。

参 考 文 献

- 1 M. G. Larrodé, A. M. J. Koonen. Theoretical and experimental demonstration of OFM robustness against modal dispersion impairments in radio over multimode fiber links [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(12): 1722~1728
- 2 M. García Larrodé, A. M. J. Koonen, J. J. Vegas Olmos. Fiber-based broadband wireless access employing optical frequency multiplication [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2006, **12**(4): 875~881
- 3 Lo Yulung, Chuang Chinho. New synthetic-heterodyne demodulator for an optical fiber interferometer [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(5): 658~663
- 4 Jianluo Zhang, Chaoyu Yue, Gregory W. Schim *et al.*. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 104~109
- 5 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. New measurement method for dynamic phase changes in fiber interferometer and its applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2121~2125
- 6 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Mingkui *et al.*. Investigation of laser-induced acoustics signal for target detection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1332~1337
- 7 Cheng Zhenlong, Zhao Jianlin, Zhou Wangmin *et al.*. A vibration sensor based on fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 47~52
- 8 Yu Youlong, Geng Shuwei, Tam Hwayaw. A novel active fiber Bragg grating sensor system for monitoring mechanical vibration in real-time[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 293~296
- 9 Guan Bai'ou, Yu Youlong, Ge Chunfeng *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber Grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 34~38
- 10 Ren Wenhua, Wang Yanhua, Feng Suchun *et al.*. A study on the interval between longitudinal modes of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7758~7764

栏目编辑: 宋梅梅