

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0847-05

光纤光栅振动传感匹配检测方法的研究^{*}

盛秋琴 施可彬 高立模 贾宝华 冯丹琴

(南开大学物理学院, 天津 300071)

摘要: 介绍了用匹配光纤布拉格光栅 (FBG) 对振动传感进行直接的光强调制, 从而完成传感及解调过程的方法。首先从理论上推导了光纤光栅的反射、透射谱的表达式, 对光纤光栅的传感机制给出了定性的解释, 并建立了数学模型进行模拟。进而报道了利用匹配光纤光栅进行单点解调, 将振动传感信号变为解调光栅的输出光强信号, 从而进行检测的方法。实验结果与理论吻合得很好, 证明该方法是可行的。

关键词: 光纤光栅振动传感; 匹配检测; 强度解调

中图分类号: TN121.14 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅在传感领域的应用引起了人们极大的兴趣^[1-4]。对振动传感研究的文献报道却不多见。振动传感无论对民用声波探测技术还是在军用水听、反潜水听、窃听技术领域都有重要应用。在光纤光栅传感系统中, 由光纤光栅探测得到的信号实际上是一个以其峰值反射波长为中心波长的光谱信号, 这个信号被所探测的物理量调制, 如何检测、处理传感光栅中心波长的微小调制量, 是这类传感器的关键技术。

光纤光栅传感器探测信号的解调实际上就是一个把波长编码信息转化为相位编码信息或者是强度编码信息的过程。相位型光纤传感器以光纤中光的相位变化来表示被测物理量, 通常使用单模光纤, 需要相干解调, 即要一个参考光路与传感光路相干。由于光纤中光的相位对环境很敏感, 这类光纤传感器虽具有很高的灵敏度, 但易受多种环境因素的干扰, 同时也有串音的缺点^[1, 2, 5-7]。

相对来说, 对于测量振动信号的光纤光栅传感系统, 我们认为采用强度调制型解调系统更为合理^[8]。

2 原 理

匹配光纤光栅检测信号的基本原理如图 1 所

示, 其中图 1(a) 为传感光栅与解调光栅的配置, 图 1(b) 为两光栅的反射谱及检测到的振动信号。

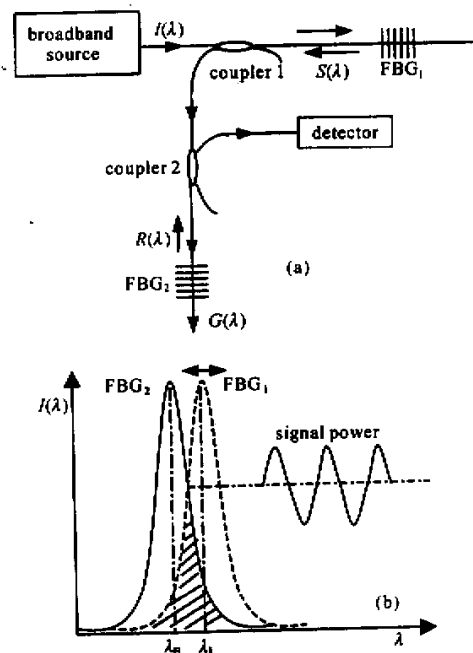


Fig. 1 Principle of demodulation with matched fiber grating

选用一个与传感光纤光栅 FBG_1 参数相近的光纤光栅 (即匹配光栅) FBG_2 作为检测光栅, 使两个光栅的反射谱部分重叠, 也即设置合适的静态工作点。 FBG_1 的反射输出信号为检测光纤光栅 FBG_2 的输入信号。传感信号隐含在光纤光栅的反射谱和透射谱中。当传感光纤光栅受到振动的微扰时, 其输出的反射谱在一定波长范围内漂移, 如图 1(b) 中虚线所示, 解调光栅的反射谱是相对固定的, 如图 1

^{*} 光电技术及系统教育部重点实验室 (CETD00-01) 资助课题。

E-mail: shengqq@eyou.com

收稿日期: 2001-07-09; 收到修改稿日期: 2001-09-21

(b)中实线所示。传感光栅的输出反射谱输入给解调光栅时,只有与两光栅的反射谱重叠部分相对应的范围内的光波才可能被反射,而重叠部分的面积与反射谱的光强度成正比。当两光栅反射谱重叠面积较大时,探测器探测到的光信号较大,反之则较小。即探测器检测到的光强是 FBG₁ 和 FBG₂ 两个光谱函数的卷积。随着 FBG₁ 上的微扰,在 FBG₂ 的反射谱中可检测到相对应的光信号。

下面建立匹配光纤光栅解调系统的数学模型并进行计算、分析。如图 1(a)所示,宽带光源的输出为 $I(\lambda)$,经耦合器 1 输入给传感光纤光栅 FBG₁,FBG₁ 的反射输出经耦合器 2 输入给匹配光纤光栅 FBG₂,FBG₂ 的输出又经耦合器 2 输入给光探测器。我们要研究分析的是,当 FBG₁ 谱移动时,经 FBG₂ 的反射进入光探测器的信号变化。设 FBG₁ 的反射光谱为 $S(\lambda)$,FBG₂ 的反射谱分布为 $R(\lambda)$,则其进入光探测器的信号谱函数为

$$\alpha S(\lambda)R(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

式中 α 为耦合器分束比等因素造成的总衰减。进入光探测器的信号光功率为对上式在频域的积分,即

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha S(\lambda)R(\lambda)d\lambda. \quad (2)$$

当有扰动作用到传感光纤光栅 FBG₁ 上时,FBG₁ 的光栅常数将发生变化,其反射光随光栅常数的变化在一定频域内扫描,此时 FBG₂ 的反射光强度发生相应变化,即输入给光探测器的光功率发生相应变化。如图 1(b)中带斜线的面积表示。这种光功率随波长变化的信号,反映了传感光纤光栅 FBG₁ 上受扰动的信息。

为研究该系统的输出谱特性,同时简化问题的复杂性,我们假设光纤光栅反射谱的线型为高斯分布^[9],即

$$S(\lambda) = I_0 \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{\Delta\lambda_1^2}\right], \quad (3)$$

这里 λ_1 为 FBG₁ 的中心波长, $\Delta\lambda_1$ 为半高带宽, I_0 为中心波长处的光强,它与光源的光强度、光栅的反射率有关,FBG₂ 的反射谱、透射谱分别为

$$R(\lambda) = R_B \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2}\right], \quad (4)$$

$$G(\lambda) = (1 - R_B) \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2}\right], \quad (5)$$

其中, R_B 为中心波长的反射率, λ_B 为 FBG₂ 的中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为半高带宽。在将衰减 α 近似为与波长无

关的条件下,将(3)式、(4)式代入(2)式,即光电探测器接收到的光功率 P 为

$$P = \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda)R(\lambda)d\lambda = \alpha I_0 R_B \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{\Delta\lambda_1^2}\right] \times \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2}\right] d\lambda, \quad (6)$$

上式中两个 e 指数相加并进行多项式合并化为 $(\lambda - C)^2$ 形式,利用其对称性改变积分限,再利用定积分公式 $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-a^2 x^2) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a}$ (a 为积分常数)化简后,可得

$$P = \alpha I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \times \left\{ \frac{\Delta\lambda_1 \Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_B^2)^{1/2}} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda_1 - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_1^2}\right] \right\}, \quad (7)$$

上式即为线性探测器接收到的光功率表示式。令调谐 FBG₁ 时,其反射光波形保持不变,将 λ_1 换成变量 λ ,则上式可改写为

$$P = \alpha I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \times \left\{ \frac{\Delta\lambda_1 \Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_B^2)^{1/2}} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_1^2}\right] \right\}, \quad (8)$$

当扰动为周期信号时,在最简单的情况下,设信号为正弦形,即为

$$y = A \sin(\omega t). \quad (9)$$

设信号引起的 FBG₁ 的波长变化为

$$\Delta\lambda = \lambda_{rc} \sin(\omega t) \quad (10)$$

的形式, λ_{rc} 为中心反射波长。将这个微扰加在光纤光栅上,则光探测器接收到的光信号功率为

$$P = A\alpha I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \left\{ \frac{\Delta\lambda_1 \Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_B^2)^{1/2}} \times \exp\left[-4\ln 2 \frac{[(\lambda_1 - \lambda_B) + \lambda_{rc} \sin(\omega t)]^2}{\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_1^2}\right] \right\}. \quad (11)$$

根据实验条件取 FBG₁ 和 FBG₂ 的谱宽为 0.2 nm、 $\alpha = 0.0625$ 、 $I_0 = 1 \mu\text{W}$ 、 $R_B = 90\%$,FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长分别为 1546.96 nm 和 1547.16 nm,由(11)式经计算机模拟得到输出光强的波形如图 2 所示。我们关心的是图中的横坐标的周期值,因此该图的纵坐标与功率 P 成一定比例,但是并不是实际的功率值。

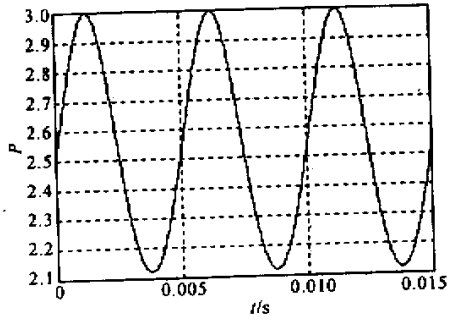


Fig.2 Wave pattern of the output of FBG_2 (according to mathematical model)

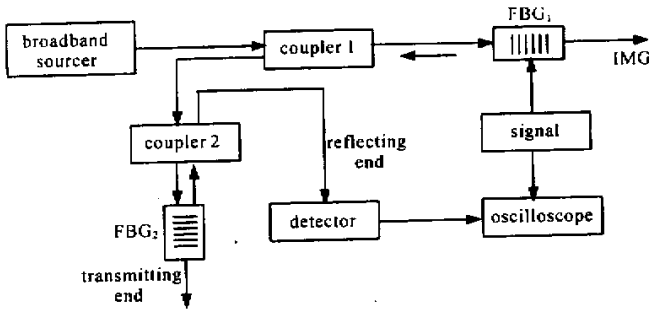


Fig.3 Scheme of experimental setup

其中宽带光源和光纤光栅均由南开大学研制。宽带光源的谱宽为 22 nm,波长范围 1536 nm ~ 1558 nm,两个耦合器的耦合比均为 1:1; FBG_1 为传感光栅,其中心波长为 1546.96 nm; FBG_2 为匹配检测光栅,其中心波长为 1547.16 nm;匹配液功能为防止光纤端面的反射,信号源为声频信号发生器,提供声频波段信号,并通过一定的方式施加在传感光栅上,检测器完成光电探测和电信号的放大功能,信

该图中取输入正弦信号的 $\omega = 400 \pi$,即周期为 5 ms,可看出图中被调制的光强的波形为准正弦函数,周期也为 5 ms。对于准线性光检测器,其输出信号与输入信号成正比关系。由此可知,可通过匹配光纤光栅解调的方法检测振动传感信号。至于振动信号的幅度,可通过微扰量对应变的关系,再根据应变对光纤光栅栅距的影响而导致反射谱的变化推导出来。这部分的工作在文献 [10] 中已有报道。

3 实验装置和结果

实验装置如图 3 所示。

号源所加信号与探测而得的信号同时输出给示波器进行检测和比较。

由图 3 的实验装置,分别用 7 Hz、90 Hz、200 Hz、300 Hz 等不同频率的振动信号进行传感实验,分别得到图 4 中的结果,其中每幅图中的上方为经探测解调后的结果,下方为信号源所加信号。

由图 4 中的实验结果表明,检测到的信号与信号源输出信号的频率特性吻合得很好(两者之间的

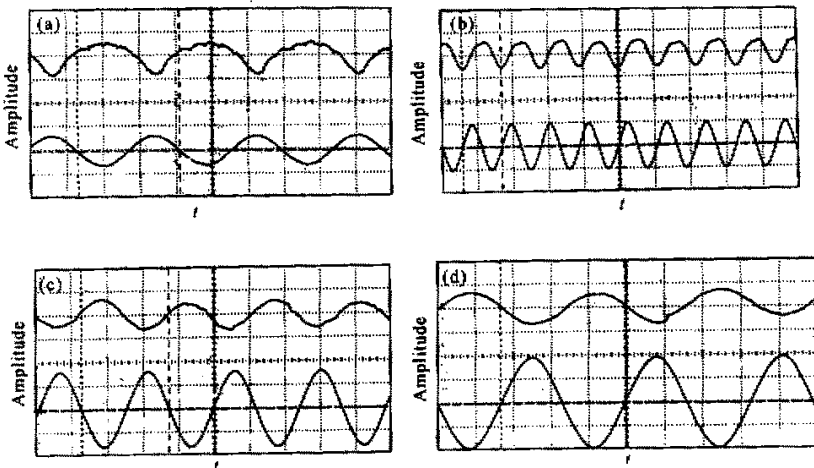


Fig.4 Experimental results under different vibrating frequency. (a) 7 Hz ;(b) 90 Hz ;(c) 200 Hz ;(d) 300 Hz

相位不一致和光纤光栅传感头工艺及检测电路有关^[8]),说明用匹配光纤光栅对光纤光栅振动传感进行解调检测的方法是可行的。

4 讨 论

匹配光纤光栅中心波长的初始状态(静态工作点)和外加传感光纤光栅 FBG₁ 上的信号幅度,都会影响到解调系统的输出特性。FBG₁ 的动态反射光谱为 FBG₂ 的输入信号,由于 FBG₂ 的解调特性有一定的线性范围,当输入信号的动态范围超越线性区范围时,输出信号就可能出现部分倍频或者完全倍频的现象,此时输出信号的频率将不是输入信号的线性反映。我们在实验中已观察到这一现象。通过数学计算也可以模拟出这一物理现象,如图 5 所示。

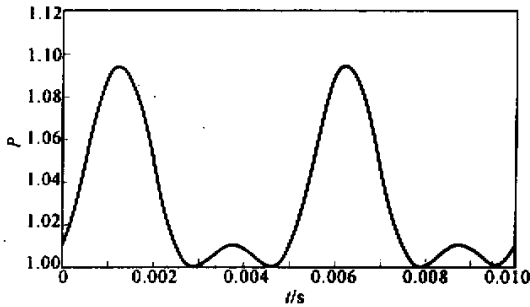


Fig.5 Output intensity of FBG₂ under nonlinear demodulation

FBG₁ 初始状态的选择可以通过下面分析得到。设在某个时刻的中心反射波长为 λ , 此时在反射端系统的输出可由(7)式得到

$$R(\lambda) = \alpha I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \times \left\{ \frac{\Delta\lambda_1 \Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_B^2)^{1/2}} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_1^2} \right] \right\} \quad (12)$$

因为 FBG₁ 与 FBG₂ 的参数相近,可认为 $\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_1$, 上式可化为

$$R(\lambda) = \alpha I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2\ln 2}} \times \left\{ \Delta\lambda_1 \exp \left[-2 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_1^2} \right] \right\} \quad (13)$$

对(13)式微分得传感系统的灵敏度公式

$$\frac{dR(\lambda)}{d\lambda} = -\sqrt{2\pi \ln 2} \alpha I_0 R_B \frac{(\lambda - \lambda_B)}{\Delta\lambda_1} \times \exp \left[-2 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_1^2} \right] \quad (14)$$

将有关参数代入(14)式,可以得到系统的灵敏度曲线。若取 FBG₁ 和 FBG₂ 的谱宽为 0.2 nm、 $\alpha = 0.0625$ 、 $I_0 = 1 \mu\text{W}$ 、 $R_B = 90\%$, 得到图 6 中的灵敏度曲线。从图 6 中可以看出,当传感光栅和解调光栅的中心反射波长相同时,解调系统的探测灵敏度为零,在半高谱宽处灵敏度最大,在两者之间的范围内,灵敏度基本呈线性关系。

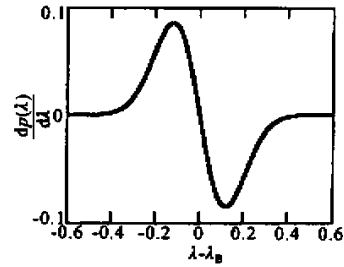


Fig.6 Sensibility curve of demodulation system with matched fiber grating

考虑到系统的倍频效果和灵敏度问题,本文中采取的措施是利用悬臂梁线性调谐的方法对匹配光纤光栅 FBG₂ 进行调谐(确定静态工作点的位置),使两光栅的反射谱的中心波长间隔为 0.2 nm 左右,即谱半峰全宽的位置。

参 考 文 献

- [1] Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(11):1536~1540 (in Chinese)
- [2] Kers A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3) 236~238
- [3] Guan Baiou, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. Fiber Bragg grating displacement sensor based on cantilever beam. *Acta Photonic Sinica*(光子学报), 1999, **28**(11):983~984 (in Chinese)
- [4] Guan Baiou, Liu Zhiguo, Tang Tao *et al.*. Study on multiplexed fiber Bragg grating temperature sensors. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(9):1203~1206 (in Chinese)
- [5] Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating array. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10) 822~823
- [6] Zhang Q, Brown D A, Kung H *et al.*. Use of highly overcoupled couplers to detect shifts in Bragg wavelength. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6) 480~482
- [7] Jia B H, Sheng Q Q, Shi K B *et al.*. Study on demodulation of vibration with fiber Bragg grating sensor. *Photoelectron Laser*(光电子·激光), 2001, **12**(7):758~

761(in Chinese)

[8] Xu Z W , Sheng Q Q , Shi K B *et al.* . The study on fiber grating vibration sensor. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*[南开大学学报(自然科学版)], 2001 , **34**(2):79~81(in Chinese)

[9] Ribeiro A B L , Ferreira L A , Santos J L *et al.* . Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing

interrogation scheme. *Appl. Opt.* , 1997 , **36**(4):934~939

[10] Feng D Q , Sheng Q Q , Zhao Q D. Method for improve measure precision of fiber Bragg grating strain sensor and vibration sensor. *J. Transduction Technology*(传感技术学报), 2001 , **14**(2):115~118(in Chinese)

Study on the Method of Matching Detection of Fiber Grating Vibration Sensor

Sheng Qiuqin Shi Kebin Gao Limo Jia Baohua Feng Danqin

(*Science of Physics Institute , Nankai University , Tianjin 300071*)

(Received 9 July 2001 ; revised 21 September 2001)

Abstract : The methods of sensor and demodulation with matched fiber Bragg gratings (FBG) used as direct light intensity elements in vibration sensor are introduced. The expressions of reflection and transmission spectra of FBG are deduced , which provides a qualitative explanation of sensor mechanism. Then mathematical models are established in order to make simulation. The method can perform single point demodulation with matched FBG and can turn the sensor signals into intensity variation of the output of FBG. The experimental results are in excellent agreement with the theory , which proves the feasibility of this method.

Key words : fiber grating vibration sensor ; matching detection ; intensity demodulation