

文章编号: 0253-2239(2004)02-199-4

# 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法\*

刘 波 童峥嵘 陈少华 曾 剑 开桂云 董孝义 袁树忠 赵启大

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 光纤光栅作为一种新型的传感器件,有着巨大的应用价值。利用长周期光纤光栅的滤波特性,提出了一种可应用于光纤光栅传感解调的新方法。即利用长周期光纤光栅作为边沿滤波器的基本器件,可完成一路或者多路光纤光栅的传感波长解调。该解调方案基于光强度测量,适用于动态和静态测量。而且由于采用全光结构设计,无须机械部件调谐,因此,可大大提高解调速度。具有系统反映迅速,性能价格比高等优点。经实验,实现了在 5 nm 范围内的波长线性解调。测量波长分辨极限为 0.002 nm,解调速度数十 kHz。

**关键词:** 导波与纤维光学; 边沿滤波; 线性解调; 长周期光纤光栅; 波长解码

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## A Novel Method of Edge Filter Linear Demodulation Using Long-Period Grating in Fiber Sensor System

Liu Bo Tong Zhengrong Chen Shaohua Zeng Jian Kai Guiyun

Dong Xiaoyi Yuan Shuzhong Zhao Qida

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract:** A novel demodulation method of fiber Bragg grating sensor is presented. Based on the filter characteristics of long-period grating, it is used as the filter component of the demodulation system. An experimental system is built up to achieve one or multi channels of sensor demodulation. Using this method based on intensity, it can achieve linear demodulation with a bandwidth of 5 nm. And the resolving wavelength is 0.002 nm, with the demodulation speed up to 10 kHz. The experimental results were analyzed in detail. The advantages of this system are an all-fiber design, quasistatic and dynamic operation, and potential high-speed demodulation.

**Key words:** guided wave and fiber optics; edge filtering; linear demodulation; long-period fiber grating; wavelength decoding

## 1 引 言

光纤光栅作为传感元件具有其它传感器无可比拟的优点,近年来国内外对光纤光栅的应变、应力和温度等物理量的传感特性进行了多方面的研究<sup>[1,2]</sup>。与此同时,光纤光栅传感解调技术也得到了不断发展,人们相继提出了多种传感解调方案,如调谐滤波方案<sup>[3]</sup>、傅里叶变换法<sup>[4]</sup>和可调光源法<sup>[5]</sup>、

非平衡马赫-曾德尔干涉仪解调法<sup>[6]</sup>等。这些解调方案各有优缺点,如非平衡马赫-曾德尔干涉仪具有响应速度快、分辨率高的优点,但它极易受环境干扰,因此只适用于检测动态应变。边沿滤波解调方案,基于输出光强与波长存在的函数关系,通过测量输出光强,即可获得波长信息,适用于动态、静态测量,具有较好的线性输出。其测量范围与探测器的分辨率成反比。且系统反应迅速,成本较低,使用方便。

自从 1995 年 Vengsarkar 等<sup>[7]</sup>在光纤中成功地写入长周期光栅以来,有关长周期光栅的研究工作引起了广泛的关注,长周期光纤光栅在带阻滤波器、宽带掺铒光纤放大器的增益平坦、高灵敏度传感

\* 国家自然科学基金(60077012)、天津市科委重点基金(013800511)、国家 863 计划基金(2002A313110)资助课题。

E-mail: trueepipi@163.com

收稿日期:2002-11-27;收到修改稿日期:2003-05-14

器<sup>[7]</sup>等方面有重要的应用前景。Fallon, Zhang等<sup>[8]</sup>将长周期光栅应用于应变测量中,获得了较好的实验结果。

本文介绍了边沿滤波解调的原理,并依据此原理,利用长周期光栅作为边沿滤波器完成了实验,并取得较好的实验结果。本方案是一种基于光强检测的全光纤解调技术,可对传感布拉格光栅的反射谱进行波长相码。与其他方法相比,具有更高的测量精度与响应速度,因而具有更广泛的应用价值。

### 2 边沿滤波线性解调原理

图 1 为基于边沿滤波器的线性解调原理示意图。图中,虚线为边沿滤波器的传递函数曲线。在光纤光栅系统中,可以用归一化的光谱透射率曲线  $H(\lambda)$  表示,实线为窄线宽布拉格光栅的反射光功率谱密度  $R(\lambda)$ 。因此,布拉格光栅反射光谱透过该滤波器后的光功率信号  $I(\lambda)$  为

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda') d\lambda' \quad (1)$$

若在一定的波长范围内  $H(\lambda)$  近似为线性函数,且  $R(\lambda)$  的光谱线宽远小于该波长范围,则  $I(\lambda)$  也可以近似为线性函数,即

$$I(\lambda) = H(\lambda) \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda' \quad (2)$$

式中,  $I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda'$  为布拉格光栅的反射总功率。因此通过测量  $I(\lambda)/I_1(\lambda)$ ,即可获得波长信息,这就完成了对波长的检测。

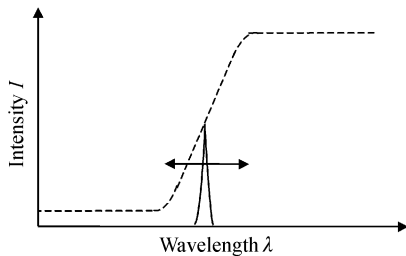


Fig. 1 The principle of linear demodulation based on edge filter

### 3 实验系统

用边沿滤波特性实现光纤光栅传感器波长解调的基本原理如图 2 所示。其中,BBS 为自行研制的宽带光源。宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器进入

传感光栅。由传感布拉格光栅反射后形成窄带光谱,再经耦合器均分成两路光束。其中一束经线性滤波器到达光电检测器。另一束直接检测,以补偿由于光源强度波动对实验造成的影响。由于光纤的端面反射,使得光源的光谱对后端光电检测器件造成很大的影响。因此,需要将不用的光纤端面浸入折射率匹配液(IMG)中,用于减少端面反射。

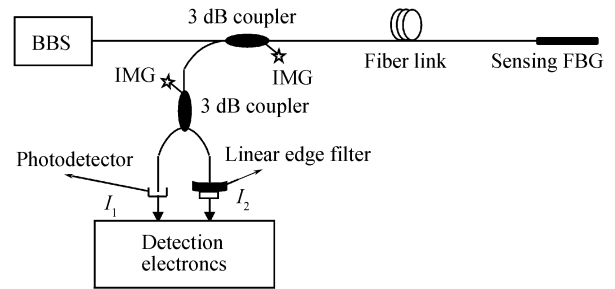


Fig. 2 Scheme of edge filter linear demodulation system

对于该系统,可以认为

$$H(\lambda) = I_2(\lambda)/I_1(\lambda),$$

式中  $I_2$ 、 $I_1$  分别是载场光强(光功率)和参考光强(光功率)。

因此,通过测量  $I_2/I_1$ ,可直接得到  $\lambda$  的动态值  $\Delta\lambda$ 。

### 4 基于长周期光纤光栅的边沿滤波解调系统

实验采用的长周期光纤光栅的透射谱如图 3 所示。它是用自制的幅度掩模板和在 248 nm 的准分子激光器写入而成的,其中心波长为 1558 nm。

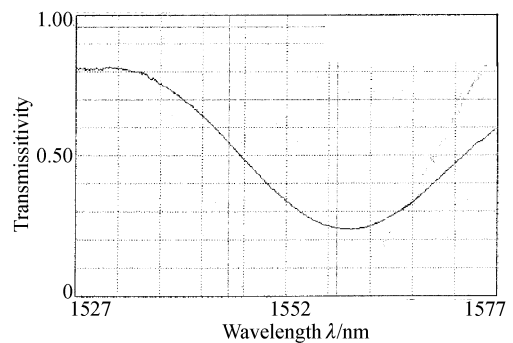


Fig. 3 Transmission spectrum of long period grating

由图 3 可知,长周期光纤光栅透射谱在其透射峰两侧各有一段近似线性范围,在这段区域内,长周期光纤光栅透射率  $H$  与波长位置  $\lambda$  成近似的线性关系,可用公式表示为  $H=k \cdot \lambda + \text{const}$ 。式中,  $k$  为仅与长周期光纤光栅特性有关的常量。因此,基于这一

特性,我们用长周期光纤光栅作为边沿滤波器件,通过测量透射光强,推知传感光栅波长的变化。

## 5 实验结果与分析

我们采用如图 2 所示的实验系统,并利用图 3 所示的长周期光纤光栅作为边沿滤波器件。由图 3 可知,所用长周期光纤光栅的线性范围约为 1542~1554 nm。因此,我们使传感布拉格光栅的波长调谐范围为 1549~1554 nm 左右,以保证传感布拉格光栅的波长始终处于长周期光纤光栅透射谱的线性区域。

实验时,采用平坦度较高的宽带光源,使布拉格光栅反射光功率保持相对稳定。因此,测量参考光功率  $I_1$  与长周期光纤光栅透射的光功率  $I_2$  之比,即可获得线性关系的函数形式。图 4 是传感布拉格光栅在不同波长处测量得到的透射光功率  $I_2$ 。

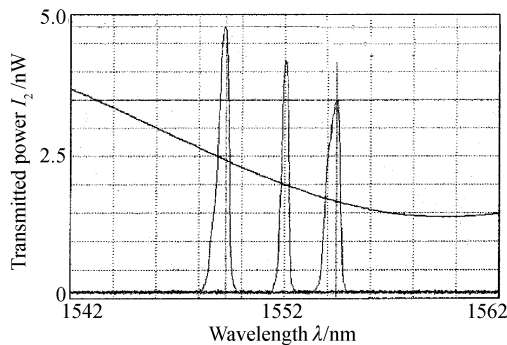


Fig. 4 Transmitted power of long period grating at different wavelengths

我们采用自制的高精度光电二极管(PIN)光电转换电路监测  $I_1$  与  $I_2$  的光功率,并用光谱分析仪监测布拉格光栅的反射波长。实验结果如图 5 所示。

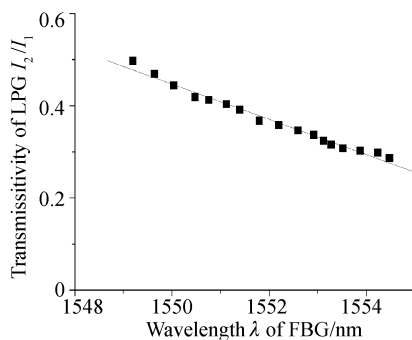


Fig. 5 Transmissivity of long period grating at different sensing wavelengths

由图 5 可以看出,测量得出的长周期光纤光栅

的透射率与传感布拉格光栅的波长成良好的线性关系,拟合度达 0.9914。由数据拟合的结果我们可以得知,我们所用的长周期光纤光栅的透射率的波长灵敏度约为  $0.038 \text{ nm}^{-1}$ 。对于我们所使用的光电探测器而言,光强测量的分辨力为 0.01 nW,因此,这种边沿滤波的方案测量波长分辨极限可达 0.002 nm,性能优于光谱仪。选择反射率更高的布拉格光栅和更好的探测器还可以达到更高的精度。

由于本方案采用全光纤设计,因此,其解调速度仅取决于光电探测器的带宽以及后端数据处理器如模/数转换器的转换速度等。我们所使用的光电二极管的带宽为 1 GHz,模/数转换芯片的转换速率为 200 kHz,所以,综合考虑各种因素,本方案可以达到数十 kHz 的解调速度,远高于目前所采用的基于机械调节原理的系统的解调速度。而且,还避免了由于机械部件等带来的稳定性及重复性不高的缺点。

在实验过程中,由于长周期光纤光栅对温度及弯曲比较敏感,因此,必须采取去敏措施,如采用新工艺制备长周期光纤光栅<sup>[9]</sup>,或采用控温措施等,使其达到较高的稳定度。但也可以利用长周期光纤光栅对弯曲敏感的特性,在实验过程中调整长周期光纤光栅的弯曲程度,使布拉格光栅的工作波长落在长周期光纤光栅的线性区域内。当然,在调整的过程中,会引起长周期光纤光栅透射率的下降,可以根据需要加以控制。

**结论** 本文以长周期光纤光栅作为边沿滤波解调方案的基本器件,实现了在 5 nm 范围内的线性解调。线性拟合度达 0.9914。测得长周期光纤光栅的透射率的波长灵敏度约为  $0.038 \text{ nm}^{-1}$ ,测量波长分辨极限可达 0.002 nm。由于采用全光纤设计,使得系统的解调速度可达数十 kHz。如果选用边沿更陡的长周期光纤光栅,还可以获得更好的实验结果。另外,由于长周期光纤光栅一般都具有两个近似线性的区域,因此,可以充分加以利用,以获得更宽的解调波长范围。

## 参 考 文 献

- 1 Volanthen M, Geiger H, Cole M J *et al.*. Measurement of arbitrary strain profile within fiber gratings. *Electron. Lett.*, 1996, **23**(11):1028~1029
- 2 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463

- 3 Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):822~825
- 4 Ohn M M, Huang S Y, Measures R M *et al.*. Arbitrary strain profile measurement within fiber gratings using interferometric Fourier transform technique. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(14):1242~1243
- 5 Brady G, Kalli K, Webb D J *et al.*. Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11):1340~1342
- 6 Kersey A D, Ribeiro A B L, Morey W W. Fiber optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength shift detection. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10):972~974
- 7 Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- 8 Fallon R W, Zhang L, Everall L A *et al.*. All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(12):1969~1973
- 9 Gao Kan, Cai Haiwen. A novel method of improving the thermal stability of LPFG. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9):1076~1080 (in Chinese)