

# 一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅 传感解调方法\*

刘波 童嵘嵘 曾剑 董孝义 开桂云

(南开大学现代光学所,天津 300071)

**摘要** 利用啁啾光纤光栅结合长周期光纤光栅边沿线性滤波技术,提出了一种新颖的光纤光栅传感解调方法,并实现了在传感波长变化 5 nm 范围内的波长解调. 采用了全光纤结构,无需机械部件调谐,可大大提高光纤传感系统的解调速度及稳定性.

**关键词** 传感解调;啁啾光栅;边沿滤波

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

## 0 引言

近年来,布喇格光纤光栅(FBG: fiber Bragg grating)作为一种新型的光无源器件,在传感领域和通信领域中的应用引起人们极大的兴趣<sup>[1,2]</sup>. 利用光纤光栅良好的复用特性,研究对温度、压力、应变等诸多参量敏感的分布式传感器,是光纤光栅技术发展的重要趋势之一. 光纤光栅的传感信息采用波长编码,如何辨别分布式传感器中光栅的位置和检测布喇格波长的移动,即研究实用的复用查询技术及信号解调技术是实现复用传感的关键技术之一. 为解决这些问题,人们已提出了一些方案,将阵列中传感的波长编码转化为强度编码或相位编码,如可调 F-P 滤波器法、PZT 匹配光栅滤波法、非平衡 M-Z 干涉仪检测法等.

人们已利用长周期光纤光栅作为边沿滤波器,完成对单点传感光栅波长的解调,取得很好的实验结果. 本文利用啁啾光栅反射滤波,进行传感阵列中的地址查询. 结合长周期光纤光栅(LPG)线性边沿滤波,提出一种新型的光纤光栅复用波长解调方法. 该方法与其他解调方法相比,省去了复杂的机械调谐部件,可大大提高系统的稳定性及扫描速度. 该解调方案可适用于波分复用的多个光栅的静态和动态的测量,具有结构简单、操作方便和性能价格比高的优点,有很好的应用前景.

## 1 基本原理

采用啁啾光栅反射单点解调系统如图 1. 宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器 1 进入传感光栅阵列,

从传感阵列反射后形成的窄带光源又经 3 dB 耦合器 2 到达啁啾光纤光栅,其反射光再经 3 dB 耦合器 3 分为两路光束,一束光  $I_1$  直接检测,以补偿由于光源强度波动对实验造成的影响. 另一束光经线性滤波器后,再经 3 dB 耦合器 4 分为两路,一路接光谱分析仪(OSA)进行监测,另一路光进行光电检测. 另外,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较大的影响. 因此,需要将不用的光纤端面浸入 IMG(折射率匹配液)中,用于减少端面反射.

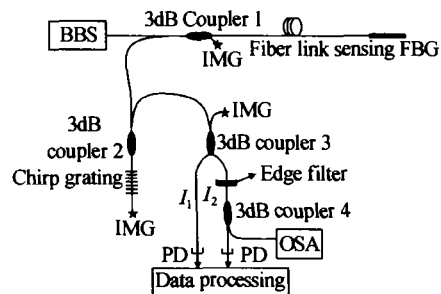


图 1 解调方案原理图  
Fig. 1 Demodulation scheme

## 2 原理分析

### 2.1 啁啾光栅反射滤波原理

由于宽带光源的带宽远远大于 FBG 的带宽,因此在光纤光栅传感阵列内将入射光视为恒定. 研究系统的输出谱特性,同时减小问题的复杂性,将传感阵列中的光纤光栅的反射谱取高斯分布<sup>[4]</sup>,并取啁啾光纤光栅反射谱近似为矩形,如图 2 所示.

则

$$S(\lambda) = R_s \text{rect}(\lambda_s, \Delta\lambda_s) \quad (1)$$

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

式中,  $R_s$  为啁啾光纤光栅峰值反射率,  $R_B$  为传感光纤光栅的峰值反射率,  $\lambda_B$  为峰值波长,半强度带宽为  $\Delta\lambda_B$ .

\*国家自然科学基金(60077012)、天津市科委重点基金(013800511)和国家 863 计划基金(2002AA313110)项目  
Tel: 022-23509849 Email: trueepipi@163.com  
收稿日期: 2003-02-24

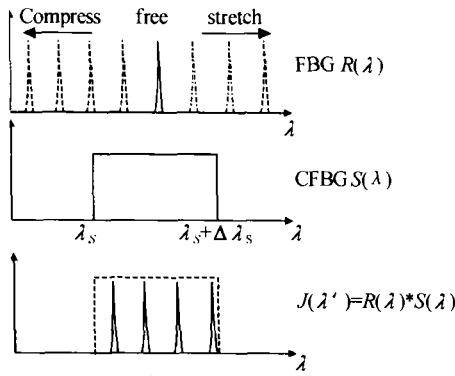


图2 啁啾光栅反射谱图

Fig. 2 Spectrum of Chirp grating reflection

在忽略连接损耗时,到达边沿滤波器 (Edge Filter) 的光功率  $P_D$  为

$$P_D = \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 S(\lambda) R(\lambda) d\lambda = \alpha I_0 S(\lambda) \int_{\lambda_s}^{\lambda_s + \Delta\lambda_s} R(\lambda) d\lambda = \begin{cases} \alpha I_0 R_s R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \Delta\lambda_B & \lambda_s < \lambda_B < \lambda_s + \Delta\lambda_s \\ 0 & \lambda_B < \lambda_s, \lambda_B > \lambda_s + \Delta\lambda_s \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为耦合器分光比造成的总的衰减. 由于光源发出的光, 先后 5 次经 3 个 3 dB 耦合器到达检测器, 因此,  $\alpha = 1/32$ ,  $I_0$  为入射光的光强.

由式(3)及图 2 可知, 当传感光栅的中心波长  $\lambda_B$  处于啁啾光栅的反射带宽 ( $\lambda_s \sim \lambda_s + \Delta\lambda_s$ ) 范围内时, 传感光栅反射光到达边沿滤波器时, 其谱形保持不变, 只是在幅度上有一定的压缩, 且光功率  $P_D$  为一不为零的常量. 而当  $\lambda_B$  在啁啾光栅反射带宽之外时,  $P_D$  为 0. 因此, 啁啾光栅在这里起到了带通滤波器的作用.

### 2.2 边沿滤波线性解调原理

图3为基于边沿滤波器的线性解调原理示意图.

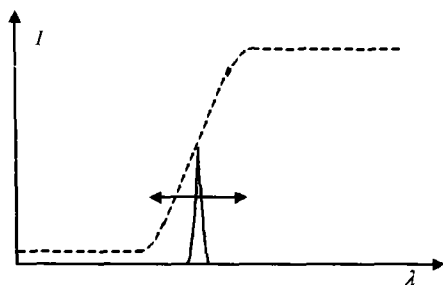


图3 边沿滤波线性解调原理图

Fig. 3 Scheme of edge filter linear demodulation

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, 实线为窄线宽布喇格光栅 (FBG) 的反射光功率谱密度  $R(\lambda)$ . 因此, FBG 反射光谱透过该滤波器后的光功率信号  $I_2(\lambda)$  为

$$I_2(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda) H(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

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

$$I_2(\lambda) = H(\lambda) \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda) d\lambda = H(\lambda) I_1 \quad (5)$$

式中,  $I_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda) d\lambda$  为 FBC 的反射总功率. 因此, 通过测量  $I_2(\lambda)/I_1$ , 即可求得该波长  $\lambda$  处的实际透射率. 通过与事先测量得出的  $H(\lambda)$  函数值进行对比, 运用插值等数值分析方法, 即可得到该波长  $\lambda$  的实际值.

### 3 实验系统及实验结果

实验中, 利用布喇格光栅, 采用带宽调谐的方法<sup>[5]</sup>产生的啁啾光栅反射谱如图 4 所示, 其中心波长为 1551.60 nm, 带宽约为 7 nm. 采用长周期光纤光栅作为边沿滤波器件. LPG 的透射谱如图 5 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, 下降沿从 1540 nm 到 1555 nm.

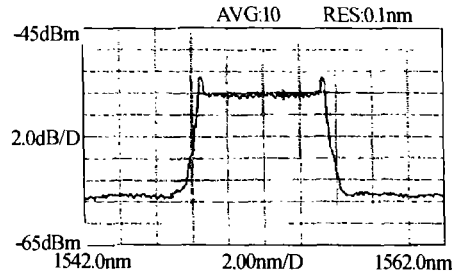


图4 啁啾光纤光栅反射谱

Fig. 4 Reflective spectrum of chirp grating

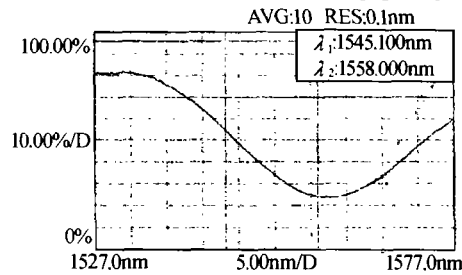


图5 长周期光纤光栅透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of LPG

采用如图 1 所示的实验结构, 将用于传感的 FBG 粘贴于等强度悬臂梁上. 通过调节等强度悬臂梁的弯曲程度, 可以在一定范围内改变传感 FBG 的中心波长, 用于模拟实际传感过程. 在调节过程中, 使传感 FBG 的调谐范围限制在啁啾光纤光栅的通带和 LPG 的下降沿内. 实验中, 采用平坦度较高的 BBS 光源, 使反射波光功率  $I_1$  保持相对稳定. 因此, 测量长周期光纤光栅透射的光功率  $I_2$  与  $I_1$  之比, 即可获得线性关系的函数形式. 图 6 是不同波长处测量得到的透射光功率  $I_2$ .

我们采用自制的高精度 PIN 光电转换电路监测  $I_1$  与  $I_2$  的功率, 并用光谱分析仪 (OSA, Anritsu MS9710B 型) 监测 FBG 的反射波长. 测得的波长与

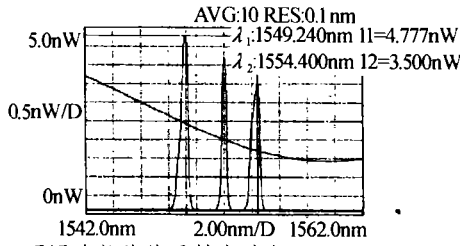


图6 不同波长处的透射光功率  $I_2$

Fig. 6 Transmission power of LPG at different wavelength  $I_2/I_1$  曲线如图 7 所示. 由图可知,其下降趋势与长周期透射谱的趋势相同. 由数据分析的结果可知,曲线的线性拟合度为 0.9918.

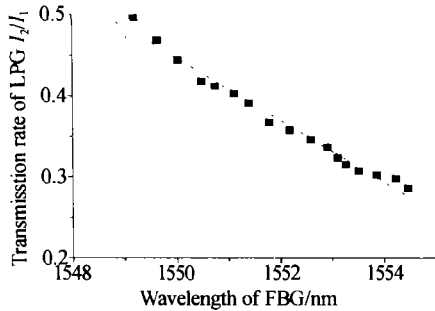


图7 不同波长处的透射率曲线

Fig. 7 Transmission rate at different wavelength

当采用如图 8 所示的实验系统结构时,可以实现传感光纤光栅网络的多路复用解调. 在实际应用中,可以利用这一解调方案代替光谱分析仪或其它价格昂贵的波长检测仪器,对光纤光栅传感信息进行现场测量.

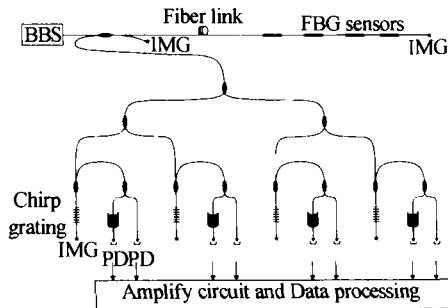


图8 复用解调方案原理图

Fig. 8 Multiplex demodulation scheme

### 4 结论

利用啁啾光纤光栅的类矩形反射谱特性,选择

其作为波长选择器件,同时结合长周期光纤光栅边缘线性滤波技术,提出了一种新型的光纤光栅传感解调方案,可以在指定波长范围内的传感波长解调. 经过实验,实现了在传感波长变化 5 nm 范围内的波长解调. 通过选择不同通带波长范围的啁啾光栅,就可以达到多路传感波长解调的目的. 该方案采用的是全光纤结构,无需机械部件调谐,因此,其传感解调的速度仅受限于所选用电子器件,如 AD 转换器件的转换时间等. 因此,在对于解调速度要求较高的场合,如振动信号的测量等,本方案具有很广泛的应用价值.

### 参考文献

- 1 Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed Fiber Bragg grating strain sensor system with fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt Lett*, 1993, **18**(16): 1370 ~ 1372
- 2 Davis M A, Bellemore D G, Putnam M A, et al. Interrogation of 60 fiber Bragg grating sensors with microstrain resolution capability. *Electron Lett*, 1996, **32**(15): 1393 ~ 1394
- 3 Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays. *Electron Lett*, 1995, **31**(10): 822 ~ 823
- 4 Coroy T, Ellerbrock P J, Measures R M, et al. Active wavelength demodulation of Bragg fiber-optic strain sensor using acousto-optic tunable filter. *Electron Lett*, 1995, **31**(18): 602 ~ 1603
- 5 董新永,刘志国,开桂云,等. 一种新颖的光纤光栅带宽调谐方法. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1275 ~ 1277  
Dong X Y, Liu Z G, Kai G Y, et al. *Chinese Optical Transaction*, 2001, **21**(10): 1275 ~ 1277
- 6 Iocco A, Limberger H G, Salathe R P. Bragg grating fast tunable filter. *Electron Lett*, 1997, **33**(25): 2147 ~ 2148
- 7 刘云启,刘志国,郭转运,等. 利用调谐滤波技术的光纤光栅复用传感器. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1084 ~ 1088  
Liu Y Q, Liu Z G, Guo Z Y, et al. *Chinese Optical Transaction*, 2001, **20**(8): 1084 ~ 1088

## A Demodulation Method Based on Chirp Grating Reflective Filter in Fiber Bragg Grating Sensing System

Liu Bo, Tong Zhengrong, Zeng Jian, Dong Xiaoyi, Kai Guiyun

*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*

Received date: 2003-02-24

**Abstract** A novel method of the demodulation of fiber Bragg grating sensing system based on chirp grating and LPG edge filter linear demodulation technique is presented. Using this method based intensity, the demodulation of fiber sensing system with a bandwidth of 5 nm is achieved. It is an all-fiber design, quasistatic and dynamic operation, and potential high-speed demodulation system.

**Keywords** Wavelength demodulation; Chirp grating; Edge filter



**Liu Bo** was born in 1975 in Shandong Province. He received M. S. degree from Nankai University in 2001. Now he is a doctor of the Institute of Modern Optics, Nankai University and his research interests are fiber sensors, fiber Bragg grating sensing system and fiber communication.