

高速双边缘光纤光栅波长解调技术*

范 典 姜德生 梅加纯

(武汉理工大学光纤传感技术研究中心光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 武汉 430070)

摘 要 提出一种双边缘结构对光纤光栅传感进行波长解调的方案, 利用被测光谱通过不同光谱特性的滤波器时输出不同光强的比值确定被测光的波长. 该系统在解调时不存在任何机械移动部分, 比扫描式的解调方法测量速度更快, 运行时更稳定、更精确.

关键词 光纤布喇格光栅; 波长解调; 双边缘滤波

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

0 引言

光纤布喇格光栅是一种能反射特定波长光的光学器件, 当光栅发生形变栅距改变时, 反射的中心波长也随之发生改变, 通过测量波长变化量可获得诸如应力、温度、振动、加速度等外部参量^[1]. 由于光纤布喇格光栅的传感机理是将传感的信息加载到波长的变化量上, 所以波长变化量的探测成为光纤光栅传感器应用于实际工程中的关键技术. 现有的波长解调技术按照解调原理大体可以分为三类: 窄带激光光源扫描法^[2], 宽带光源窄带滤波扫描法^[3], 还有将波长转化为其它参量的解调方法^[4~10]. 本文所提出的双边缘解调方案属于将波长转化为强度解调的方法, 通过测量光栅反射谱通过两个光谱特性不同的滤波器透射光强比值, 该比值的对数和波长成线性关系, 可间接获知波长值. 该方案避免了扫描法中机械移动部分, 比扫描式的解调方法测量速度更快, 运行时更稳定、更精确.

1 双边缘滤波解调的原理

边缘滤波是一种结构和原理十分简单的波长解调方式, 如图 1(a), 它利用滤波器件的线性关系, 通过光强值测量波长. 但是, 由于: 1) 光的强度不稳定, 受到光源、传输距离、光纤接头衰减等多方面的影响, 所测得的波长值准确度不高; 2) 对滤波器件的要求太高, 要求滤波器的光谱中分布有 1 nm~2 nm 的线性特性, 这对于一般的光学器件是不太可能, 所以一般不被应用.

双边缘滤波法使用两个滤波器, 对于它的光谱特性没有严格要求, 可使用诸如: 法布里腔、宽带光栅或滤光片等传输谱近似符合高斯型的光学器件. 当然两个滤波器的传输谱应该是相交迭的, 交迭的部分就是测量波长的有效范围, 所以选用宽带的滤

波器器件交迭部分大, 就可以获得较大的测量范围. 如图 1(b), 由 FBG 传感器反射的窄带光可以同时通过两个滤波器, 并得到两个光强值.

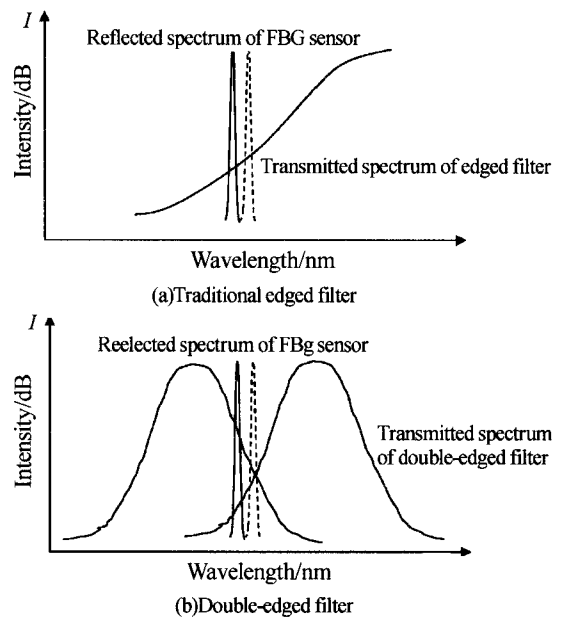


图 1 波长解调原理
Fig. 1 Spectrum of wavelength demodulation principle

系统装置如图 2, 当载有传感信息的 FBG 反射光波长 λ_i 通过光分路器 2 进入两个滤波器时, 由于信道的传输特性不同, 输出的光特征也不同, 理论上输出光谱等于输入光谱和所通过信道特征的卷积. 用光电二极管检测输出光强, 并用预放大器放大初

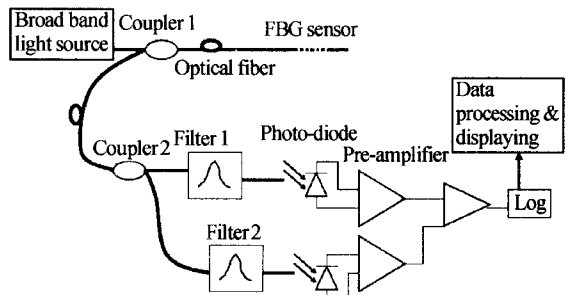


图 2 双边缘滤波波长解调装置结构
Fig. 2 Diagram of double-edged filter wavelength demodulation equipment

* 国家自然科学基金(60477028)资助项目
Tel: 027-87651850-8305 Email: bestfun@126.com
收稿日期: 2004-10-11

始信号,定义通过滤波器1的光电检测电压为 $V_1(\lambda_i)$,通过滤波器2的光电检测到的电压为 $V_2(\lambda_i)$,经过除法器和对数器得到一个比值的对数函数

$$\rho(\lambda_i) = \log \frac{V_2(\lambda_i)}{V_1(\lambda_i)} \quad (1)$$

根据理论分析可以确定测量值 $\rho(\lambda_i)$ 和 λ_i 的线性关系,通过后期的数据处理可以得到波长值。

2 原理分析

2.1 光纤布喇格光栅(FBG)反射谱函数

作为传感器的FBG的反射谱可以很好地近似为高斯型,由式(2)表示

$$B(\lambda) = b \exp \left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_b)^2}{\Delta\lambda_b^2} \right] \quad (2)$$

式中 λ_b 为FBG的布喇格中心波长,即被测波长, b 和 $\Delta\lambda_b$ 分别是FBG高斯型的反射峰值和衰减达到峰值一半时的谱宽(FWHM)。

2.2 滤波器(Filter)传输谱函数

滤波器可由多种光学器件组成,如:宽带光栅、法布里腔或滤光片等,它们一般都可以很好地近似为高斯型,可表示为式(3)

$$F_1(\lambda) = f_1 \exp \left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{f_1})^2}{\Delta\lambda_{f_1}^2} \right] \quad (3)$$

$$F_2(\lambda) = f_2 \exp \left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{f_2})^2}{\Delta\lambda_{f_2}^2} \right]$$

式中 λ_{f_1} 和 λ_{f_2} 分别为滤波器的中心波长, f_1 、 f_2 和 $\Delta\lambda_{f_1}$ 、 $\Delta\lambda_{f_2}$ 分别为两个滤波器的传输峰值和光衰减达到峰值一半时的谱宽FWHM。为满足双边缘滤波的要求,两个滤波器的传输谱应相交且相交的谱宽应满足传感用光栅的波长变化范围。

2.3 波长解调原理

理论上输出光谱等于输入光谱和所通过信道特征的卷积,用光电二极管检测输出光强,则通过滤波器1的光电检测电压 $V_1(\lambda_b)$ 为

$$V_1(\lambda_b) = d_1 S(\lambda) \int_0^\infty B(\lambda) F_1(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

这里 $S(\lambda)$ [Watt/nm]是光源的发射谱, d_1 是光电二极管的响应率。理想情况下认为和滤波器的带宽相比光源谱密度的变化是缓慢的,即 $S(\lambda) \equiv S(\lambda_f)$,假设此时FBG传感器反射的光波长为 x ,将式(2)和式(3)代入式(4),可得

$$V_1 \approx d_1 S(\lambda_{f_1}) f_1 b \Delta\lambda_{f_1} \Delta\lambda_b \times \sqrt{\frac{\pi}{(\Delta\lambda_{f_1}^2 + \Delta\lambda_b^2) 4 \ln 2}} \times \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{f_1} - x)^2}{\Delta\lambda_{f_1}^2 + \Delta\lambda_b^2} \right] \equiv Z_1 \quad (5.1)$$

同理可得

$$V_2 \approx d_2 S(\lambda_{f_2}) f_2 b \Delta\lambda_{f_2} \Delta\lambda_b \times \sqrt{\frac{\pi}{(\Delta\lambda_{f_1}^2 + \Delta\lambda_b^2) 4 \ln 2}} \times \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{f_2} - x)^2}{\Delta\lambda_{f_2}^2 + \Delta\lambda_b^2} \right] \equiv Z_2 \quad (5.2)$$

假定 $|\Delta\lambda_{f_2} - \Delta\lambda_{f_1}| \ll \Delta\lambda_b$,将式(5)带入式(1)得

$$\rho(x) \approx \frac{4(\log 2)(\Delta\lambda_{f_2} - \Delta\lambda_{f_1})[2x - (\lambda_{f_2} + \lambda_{f_1})]}{\left[\frac{(\Delta\lambda_{f_2} + \Delta\lambda_{f_1})}{2} \right]^2 + \Delta\lambda_b^2} + \log \frac{d_2 a_2 S(\lambda_{f_2}) \Delta\lambda_{f_2}}{d_1 a_1 S(\lambda_{f_1}) \Delta\lambda_{f_1}} + \frac{1}{2} \log \frac{\Delta\lambda_{f_1}^2 + \Delta\lambda_b^2}{\Delta\lambda_{f_2}^2 + \Delta\lambda_b^2} \quad (6)$$

显然,当 $x = (\lambda_{f_2} + \lambda_{f_1})/2$ 时,即当两滤波器的波导特性曲线相交时, $\rho(x)$ 值为零。FBG的中心波长 x 和 $\rho(x)$ 呈线性关系,从而 x 值可由测量 $\rho(x)$ 的值得到,这就是本文波长检测的原理。波长测量的灵敏度,即波长 λ 和 ρ 的斜率关系,是由FBG和滤波器的带宽决定的,它和 $D = [(\Delta\lambda_{f_2} + \Delta\lambda_{f_1})/2]^2 + \Delta\lambda_b^2$ 成反比关系,FBG和滤波器的带宽越大则 D 也越大。另一方面,波长测量的变化范围和成正比,需要权衡动态范围和灵敏度的关系。

3 实验系统及实验结果

按照图2的结构搭建实验装置。实验用的滤波器是自制的宽带光栅,中心波长分别为1301 nm和1302 nm,带宽1 nm,光谱的交迭部分约为700 pm。传感用FBG的中心波长可选用动态范围在1301 nm~1302 nm,在常态下波长靠近1301 nm。实验中选用的是中心波长为1301.400 nm的布喇格光栅。由于除法器和对数器的性能对最后结果的计算准确度有很大的影响,所以测量了两个光电转换模块中放大器输出电压值作为计算波长的参考。实验中还用光纤光栅实验温控器控制传感用FBG的波长,用光谱分析仪检测此时FBG的实际波长。得到的实验数据如表1。

表1 双边缘滤波波长解调实验值及其误差分析

V_1/V	V_2/V	$\log(V_1/V_2)$	光谱仪测量 波长值/nm	线性拟合 波长值/nm	误差/nm
1.50	4.90	-0.5141	1301.400	1301.417	0.017
1.94	4.09	-0.3239	1301.450	1301.453	0.003
2.10	4.00	-0.2798	1301.470	1301.461	(0.009)
2.33	2.74	-0.0704	1301.500	1301.500	0.000
2.80	2.90	-0.0152	1301.520	1301.511	(0.009)
3.40	1.84	0.2667	1301.560	1301.563	0.003
3.50	1.70	0.3136	1301.580	1301.572	(0.008)
3.48	1.41	0.3924	1301.600	1301.587	(0.013)
3.90	1.10	0.5497	1301.620	1301.616	(0.004)
4.30	0.70	0.7884	1301.650	1301.661	0.011
4.80	0.50	0.9823	1301.690	1301.697	0.007

表中 V_1 、 V_2 是放大器输出的电压值,根据计算

值 $\log(V_1/V_2)$ 和光谱仪测量波长值所绘制的位置关系图如图 3. 可以看出两者基本成线性关系, $y = 0.1871x + 1301.5136$, 如果下一步的数据处理根据该式计算所测波长值, 如表 1, 用 $\log(V_1/V_2)$ 值线性拟合的波长值和光谱仪所测的波长值比较, 它们的均方差为 9 pm, 证明这种波长解调的方法有良好的线性度和准确度. 双边缘解调方法的分辨率在很大程度上由 AD 转换电路或逻辑计算电路的位数决定, 位数越高波长测量的分辨率就越高.

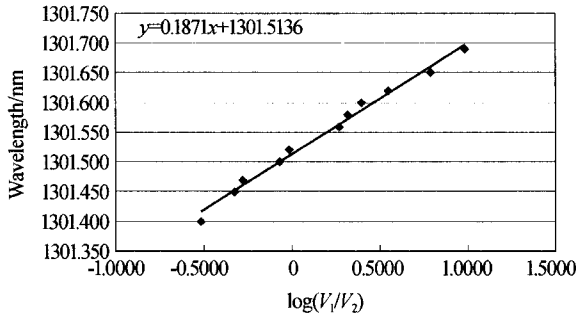


图 3 光谱仪测量波长值和双边缘滤波波长解调值的曲线
Fig. 3 Relationship between measurement wavelength from OSA and double-edged filter wavelength demodulator

本实验由于选用的是用准分子激光器和掩膜板自制的宽带光栅, 所以带宽受到一定的限制, 影响了实验的测量范围. 在实际应用中可选用带宽更大的长周期光栅或其它特征光谱符合高斯型的滤光器件. 另一种解决方案是利用一系列特征光谱连续交迭的滤波器件, 在测量时根据被测波长选用不同的档位, 即相匹配的两个相邻滤波器件, 进行测量.

4 结论

本文所提出的双边缘滤波波长解调技术, 利用两个滤波器输出光强比值的对数和被测波长的线性关系解调波长. 拥有结构简单、速度快、稳定性好等优点. 由于解调系统中用到的元器件的价格较低, 在光电子实验室可以方便的得到, 所以该方法适用于实验室研究用. 图 2 的解调系统中不存在机械移动部分, 所以稳定性好, 它没有复杂的辅助电路, 很适于做成便携式的波长解调仪, 用于工程现场的校准和调试. 其次这种结构的响应速度较波长的扫描的解调要快, 适合于动态测量以及作为车载或机载 FBG 传感器的解调方案.

另外, 现有的宽带光源窄带滤波扫描法是利用窄带滤波器件的传输谱和 FBG 传感器的反射谱的

重合程度测量波长的. 系统设置一个门槛值, 当窄带滤波器件的传输谱扫描过 FBG 传感器的反射谱和这个门槛值相同时, 记录下电压值, 不同的电压值对应不同的波长. 测量的准确度和这个门槛值的设置关系很大, 如果结合以上两种方法, 用两个滤波器件同时扫描则可以大大提高测量的精确度, 同时也保证了测量的范围, 是一种值得探讨的方案.

参考书目

- 1 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors. *J of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 2 Kersey A D, Morey W. Multi-element Bragg grating based fiber laser strain-sensor. *Electronics Letters*, 1993, **29**(1):112~114
- 3 Davis M A. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg gating array. *Electronics Letters*, 1995, **31**(10):822~823
- 4 Kersey A D, Berkoff T A, Morie W. High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detectoin. *Electronic Letters*, 1992, **28**(3):236~238
- 5 Yasukazu Sano, Toshihiko Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing array waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors. *J of Lightwave Technology*, 2003, **21**(1):132~139
- 6 Zhang Po, Cerecedo H H, Qi B, et al. Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg grating-based sensor ssystem. *SPIE Optical Engineering*, 2003, **42**(6):1597~1603
- 7 Abad S, Araujo F M, Ferreira L A, et al. Interrogation of wavelength multiplexed fiber Bragg grating using spectral filtering and amplitude-to-phase optical conversion. *J of Lightwave Technology*, 2003, **21**(1):127~131
- 8 詹亚歌, 陆青, 向世清, 等. 优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究. *光子学报*, 2004, **33**(6):711~715
Zhang Y G, Lu Q, Xiang S Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):711~715
- 9 刘波, 童峥嵘, 曾剑, 等. 一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅传感解调方法. *光子学报*, 2004, **33**(1):57~60
Liu B, Tong Z R, Zeng J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):57~60
- 10 鲁怀伟, 蒲会兰, 马莉, 等. 一种非对称结构光纤梳状滤波器的分析. *光子学报*, 2004, **32**(3):314~317
Lu H W, Pu H L, Ma L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **32**(3):314~317

High-Speed Double-edged Wavelength Interrogation Technology for Fiber Bragg Grating

Fan Dian, Jiang Desheng, Mei Jiachun

Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and information Processing, Ministry of Education, Fiber Optic Sensing Technology of Research Centre, WHUT, Wuhan 430070

Received date: 2004-10-11

Abstract High-Speed double-edged Wavelength Interrogation Technology for fiber Bragg grating sensor array was proposed, which employed the logarithm of the output ratio between the adjacent two channel of arrayed waveguide grating to determine the measured wavelength. This system permitted a fast and simultaneous interrogation of multiple wavelengths without any mechanically moving parts. The thesis mainly demonstrated the feasibility of this interrogation project in theory and experiment.

Keywords Fiber Bragg Grating(FBG); Wavelength interrogation; Double-edged filter



Fan Dian was born in 1979 in Hubei Province. She received B. S. degree of automatic engineering in 2001 and will receive M. S. degree of communication engineering from fiber optic sensing research center, WHUT, in 2005, respectively. Her research interests are fiber sensors, FBG sensing system and optic signal processing.