

强度解调型光纤布拉格光栅传感器的研究及进展

李 岚 董新永 赵春柳 孙一翎 金尚忠 张在宣

(中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 对国内外已报道的强度解调型光纤布拉格光栅(FBG)传感器进行了综述,按解调方法将其归类为光栅匹配法、边缘滤波法、光栅啁啾法、激光匹配法和射频探测法。对各种方法的原理进行了介绍,对各自的优缺点等进行了评述,并对强度解调型FBG传感器的发展进行了展望。

关键词 传感器;光纤传感;光纤布拉格光栅;强度解调

中图分类号 TN25

OCIS 060.060 060.3735

文献标识码 A

Research and Development of Intensity-Modulated Fiber Bragg Grating Sensors

Li Lan Dong Xinyong Zhao Chunliu Sun Yiling Jin Shangzhong Zhang Zaixuan

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The reported intensity-demodulated fiber Bragg grating (FBG) sensors are reviewed and classified into four types including the matched FBG method, filtering method, chirped-FBG method, laser matched method and radio frequency (RF) signal measurement method. The principles of these methods are introduced. Both the advantages and disadvantages of these methods are also discussed. And the development of intensity-demodulated FBG is forecasted.

Key words sensors; fiber sensing; fiber Bragg grating; intensity-demodulated

1 引 言

近年来光纤布拉格光栅(FBG)传感器逐渐成为传感领域的研究热点,除了具有结构简单、成本低且功能优异等优点外,还具有编码方式可靠、可波分复用(WDM)和易于组网等独特优点^[1]。传统的波长解调型FBG传感器利用其布拉格波长随温度^[2,3]、应变^[4,5]、压力^[6~8]等物理量变化的原理,通过检测反射波长的漂移来获悉被测物理参数的变化^[9],测量时需要进行波长扫描,因此反应时间相对较长、测量速度较慢。另外,其必需的波长测量系统结构复杂、价格昂贵,不利于大规模推广应用。而强度解调型FBG传感器测量的是传感光信号的强度,通常只需要简单的光电转换,因此具有成本低、解调速度快、使用方便等优点,适用于动态的高速测量,如实时监控系统等。

目前已经发展了多种技术,将FBG传感器解调时的波长编码转化为强度编码,取得了很多重要的研究成果。本文将这些强度解调方案分类进行了介绍,并对每种解调方法的原理、优缺点及应用等进行了评述。

2 强度解调型光纤布拉格光栅传感器的原理、特点与分类

强度解调型FBG传感器是通过测量传感FBG的光强或光功率来解调被测参数的传感器,其传感系统通常由光源、传感头、光信号传输器件和解调模块四部分组成,而解调模块中方案的选择直接决定了系统成

收稿日期: 2010-04-12; 收到修改稿日期: 2010-04-18

基金项目: 国家973计划(2010CB327800)、国家自然科学基金(60807021)和浙江省自然科学基金(R1080087)资助课题。

作者简介: 李 岚(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅方面的研究。E-mail: lilan_0510@163.com

导师简介: 董新永(1975—),男,博士,研究员,主要从事光纤传感、光纤通信和光纤光栅等方面的研究。

E-mail: xydong@cjlu.edu.cn(通信联系人)

本的高低和系统的精度,是传感系统的关键部分。波长解调型 FBG 传感系统中,大多使用的是光谱仪、波长计等波长解调仪器,然而此类仪器价格高、体积大、扫描速度较慢、携带不方便,不适合用于现场监测和实时性要求较高的场合。强度解调型 FBG 传感器测量的是传感光信号的强度或光功率,避免了波长解调型 FBG 传感器的缺点,达到了降低系统成本和增强实用性的效果。从解调方法考虑,本文将强度解调型 FBG 传感器的解调方案归类为光栅匹配法、边缘滤波法、光栅啁啾法、激光匹配法和射频探测法进行了综述。

2.1 光栅匹配法

光栅匹配法是利用参考 FBG 的波长选择反射(或透射)功能来解调传感 FBG 的反射光信号的方法。图 1 所示为实验结构与原理图,FBG1 为传感 FBG,FBG2 为参考 FBG,二者的反射波长接近,反射带部分重合,因此称为匹配 FBG。宽带光源(BBS)发出的光经耦合器(或环形器)1 进入 FBG1,FBG1 的反射光经过耦合器(或环形器)1 和 2 后成为 FBG2 的入射光。当被测量的是 FBG2 反射回来的光强(两 FBG 反射谱的重叠部分)时,称为反射型光栅匹配法;当被测量的是透过 FBG2 的光强(两 FBG 反射谱的未重叠部分)时,称为透射型光栅匹配法。由于 FBG2 的反射谱不受被测参量影响,相对固定,而 FBG1 的反射谱受被测参量作用,中心反射波长会发生变化,导致两个 FBG 反射谱的重叠程度变化,FBG2 的反射光或透射光的功率变化,由探测器 1 或 2 监测光功率。通过监测探测器的输出信号,便可解调出被测参量的变化。下面以反射型为例进行理论分析,可采用高斯函数来近似描述 FBG 的反射谱^[10]

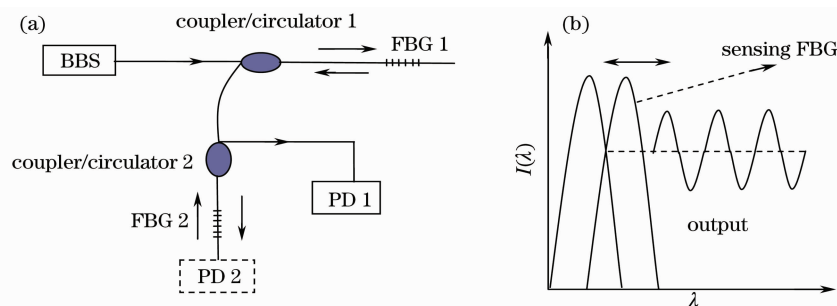


图 1 光栅匹配法的实验结构(a)与原理示意图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup (a) and principle (b) of the matched FBG method

$$R_i(\lambda) = R'_i \exp\left[-4 \ln \frac{2(\lambda - \lambda_c)^2}{\Delta\lambda_i^2}\right], \quad (1)$$

式中 R'_i 为 FBG i 的峰值反射率($i=1,2$ 分别代表 FBG1 和 FBG2), λ_c 为中心反射波长, $\Delta\lambda_i$ 为 3 dB 带宽。设两个 FBG 反射谱重叠部分的光功率为 P , 进行积分运算可求得

$$P = \eta I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} R_1(\lambda) R_2(\lambda) d\lambda = \alpha I_0 R'_1 R'_2 \times \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \Delta\lambda_1 \frac{\Delta\lambda_2}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2)^{1/2}} \exp\left[-4 \ln \frac{2(\lambda_2 - \lambda_1)^2}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2)}\right], \quad (2)$$

式中 I_0 为 FBG1 反射中心波长处的光强, η 为由耦合器分光比和光纤传输损耗决定的传递系数。由(2)可见, P 仅是两个 FBG 波长差的指数函数, 最大值对应于两个 FBG 波长相同的情况。在波长差随被测参量变化的情况下, 探测 P 值的变化即可获得被测参量的信息。

但在(2)式中, 两个 FBG 波长差的符号并不影响 P 值的大小, 对应两种情况, 传感 FBG 的反射谱与参考 FBG 反射谱的重叠面积, 在完全重叠点的两侧各有一次相同的情况, 而探测器只能得到一个绝对数值, 不能区分这两种情况。针对光栅匹配法的这个双值问题, 可采用并联两个或多个参考 FBG 来解决, 通过巧妙地选取各参考 FBG 之间的中心波长间隔, 使传感 FBG 的反射谱在与前一个参考 FBG 的重叠面积达到最大后, 即与下一个参考 FBG 重叠, 从而避免双值问题^[11]。另外, 通过选择反射带宽较宽的 FBG 作为参考 FBG 可以提高传感器的测量范围^[12], 通过使传感 FBG 和参考 FBG 产生相反的波长变化(如分别粘贴在悬摆的两边测量倾斜角), 可将传感器的灵敏度提高 1 倍^[13]。

1997 年 Lobo Ribeiro 等^[10]应用光栅匹配法设计了 FBG 传感器, 并且对振动进行了理论分析和实验研究。此后, 科研人员利用该法进行了大量研究工作, 按被测量不同归类如表 1 所示。

表 1 基于光栅匹配强度解调法的研究工作

Table 1 Research work on intensity-modulated sensors based on the matched FBG method

Measurand	Feature	Measurement range	Accuracy	Sensitivity
Strain	Several reference FBGs in parallel to solve the double-value problem	522 $\mu\epsilon$	2.6 $\mu\epsilon$ ^[11]	
	Reference FBG has broader bandwidth	1100 $\mu\epsilon$	5 $\mu\epsilon$ ^[12]	
Pressure	Reference FBG has opposite wavelength variation	100 MPa		8.5 pm/MPa ^[14]
Vibration	Reference FBG has opposite wavelength variation	1~200 Hz ^[15]		
Underwater acoustic signal	Measurement transmission power of the reference FBG	100~160 dB $\cdot\mu$ Pa		3000 mV/nm ^[16]
	Reference FBG has opposite wavelength variation	100~200 dB		0.78 nm/MPa ^[17]
Current	Reference FBG has opposite wavelength variation	0~400 mA ^[18]		
Temperature	For on-line monitoring in civil engineering	150 $^{\circ}\text{C}$ ^[19]		

光栅匹配法结构简单、成本低,如果将传感 FBG 与参考 FBG 放置于相同环境下,可以实现温度的自动补偿效应。但该方法只允许在有限的波长范围内进行测量,如果测量范围超出了参考 FBG 反射带宽的 2 倍,则探测器的输出信号为零。

2.2 边缘滤波法

边缘滤波法是一种利用 FBG 反射光功率谱和滤波器的反射(或透射)光谱透射率特定部分呈线性关系的功能来解调 FBG 传感器的方法。通常利用某些滤波器在一定波长范围内线性(或接近线性)的滤波特性将 FBG 反射信号的波长变化转化为光功率变化实现对 FBG 传感器的强度解调。已经报道过的滤波器包括三角函数滤波器、WDM 耦合器、长周期光纤光栅(LPG)、高双折射光纤环境(HiBi-FLM)等。图 2(a)为边缘滤波器法强度解调 FBG 传感器的一种分比探测系统结构图,其原理如图 2(b)所示,FBG 的反射波长落在滤波器的线性边缘的中间,波长变化时,对应的透过率发生变化,即可将 FBG 的波长变化转化为强度变化。假设线性边缘滤波器的滤波函数 $F(\lambda)$ 为^[20]

$$F(\lambda) = A(\lambda - \lambda_0), \quad (3)$$

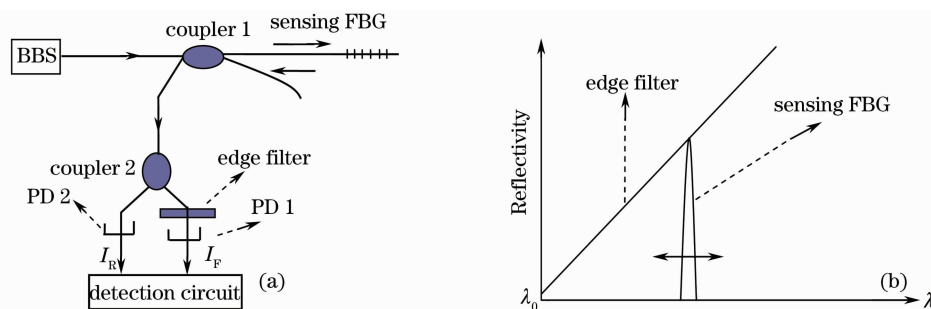


图 2 边缘滤波法系统结构(a)与原理图(b)

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup (a) and principle (b) of the linear edge detection filter

式中 A 为滤波函数的斜率, λ_0 为边缘滤波器的初始值,即 $F(\lambda_0) = 0$ 。FBG 的反射光经 3 dB 耦合器后分为两路,一路经边缘滤波器后作为信号光 I_F 被光电探测器 1 接收;另一路作为参考光 I_R 直接被探测器 2 接收。假设 FBG 的反射光强度是与光谱带宽 $\Delta\lambda$ 和布拉格波长 λ_B 有关的高斯函数,则 I_F 和 I_R 可以被表示为

$$I_F = I_0 R A \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\lambda_B - \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi}} \right) \Delta\lambda, \quad (4)$$

$$I_R = I_0 R \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Delta\lambda, \quad (5)$$

式中 I_0 为入射光强, R 为 FBG 的反射率。为了降低光源波动和光纤链路对光强的影响, 将两路信号经放大后相除得到信号的变化量输出为

$$I_F/I_R = A \left(\lambda_B - \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi}} \right). \quad (6)$$

1992 年 Melle 等^[20] 提出了基于线性波片边缘滤波法的应变传感器。实验表明, 该传感系统在测量范围为几个 $m\epsilon$ 时, 其分辨率为几十个 $m\epsilon$ 。该探测系统已被加拿大 Electrophotonics 公司商用化^[9]。此后各种改进结构和其他滤波器, 如 WDM 光纤耦合器、LPG、阵列波导光栅 (AWG) 和 HiBi-FLM 等也被用作边缘滤波器。表 2 列出了近年利用边缘滤波法进行强度解调 FBG 传感器的一些研究结果。

表 2 基于边缘滤波法的强度解调型 FBG 传感器的研究工作

Table 2 Research work on intensity-modulated FBG sensors based on the edge filtering method

Filter	Measurand	Measurement range	Accuracy	Sensitivity	Resolution
FP filter	Strain		$\pm 3 \mu\epsilon$ ^[21] 2 pm		5 pm ^[22]
LPG	Strain	3336 $\mu\epsilon$		1.94 dB/nm	0.1 dB ^[23]
	Displacement	3.6 mm		9.24 pW/mm	0.01 mm ^[24]
AWG	Strain	0.75 nm 4500 $\mu\epsilon$	0.5 pm ^[25] $\sim 1.2 \text{ pm}$ ^[26]		
	Strain & temperature				0.1 $^\circ\text{C}$, 1 $\mu\epsilon$ ^[27]
Triangular spectrum FBG	Pressure	200 $\mu\epsilon$	1.5 $\mu\epsilon$		0.7 $\mu\epsilon$ ^[28]
Optical filter	Vibration	1.5 kHz			1 $\mu\epsilon$ ^[29]
WDM coupler	Strain	630 $\mu\epsilon$	$\sim \pm 3 \mu\epsilon$ (static), $< 1 \mu\epsilon$ (dynamic) ^[30]		
	Strain & temperature	1120 $\mu\epsilon$, 52.5 $^\circ\text{C}$		0.25 dB/nm	10 $\mu\epsilon$, 0.2 $^\circ\text{C}$ ^[31]
HiBi-FLM	Strain	100 $\mu\epsilon$	2.12 $\mu\epsilon$ ^[32]		
		6 nm ^[33] 900 $\mu\epsilon$	1.54 $\mu\epsilon$	0.0011 / $\mu\epsilon$ ^[34]	

除了表 2 归纳的方法外, 还有一些新颖的边缘滤波法解调 FBG 传感器, 如文献[35]中使用放大自发辐射 ASE 光源功率谱密度的线性变化段对 FBG 传感器进行解调。实验中对应变进行了测量, 得到在 3 nm 范围内的线性解调, 应变测量范围可达 2500 $\mu\epsilon$ 。

需要提出说明的是, 在利用光纤 WDM 耦合器、阵列波导光栅和高双折射光纤环境的传感解调系统中, 由于滤波器对两路输出信号具有相反的滤波函数, 可以利用两路输出光信号的差值与和值的比值作为输出量, 达到消除光源噪声和增大灵敏度的效果。图 3 所示为使用 WDM 耦合器作为边缘滤波器的 FBG 传感系统的示意图。耦合器 2 的两路输出光信号经光电探测器转化为电压信号, 经过模拟信号运算输出, 其输出量正比于 FBG 的波长变化^[33]。图 4 为文献[34]中使用 WDM 光纤耦合器作为边缘滤波器的 FBG 应变传感器的光功率随应变变化测量曲线, 从图中可以看出应变-光功率曲线在一定范围内的线性度很好。

边缘滤波法解调 FBG 传感器系统结构简单、性价比较高, 能有效抑制光源输出功率波动或变化的干扰, 系统

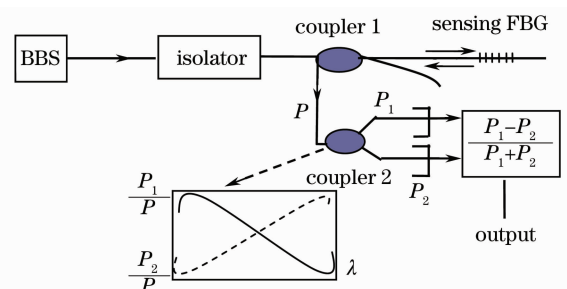


图 3 波分复用耦合器滤波器法原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of WDM coupler filter method

的分辨率由滤波器的滤波曲线斜率决定。但是 FBG 传感器的温度效应需要额外的方法补偿,而且对滤波曲线的线性近似也造成一定的误差,因此该方法适用于一些对测量精度要求不高的场合。

2.3 光栅啁啾法

光栅啁啾法是将被测参数的变化与 FBG 的啁啾效应联系起来,通过测量 FBG 的反射带宽或反射光功率,来测量被测参数信息的方法,其原理如图 5 所示。宽带光源发出的光经过耦合器后进入啁啾率可变的 FBG,反射回来的窄带光谱成分经耦合器后到达光电探测器,探测到的光功率可以表示为^[36]

$$P = \eta \int_{\lambda} \rho(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

式中 η 为光功率传递系数,描述了从光源到探测器的传输损耗,如光纤熔接和连接损耗、耦合器的插入损耗等,但不包括 FBG 反射引起的损耗; $\rho(\lambda)$ 为宽带光源的功率谱密度,在检测过程中不随被测参数变化; $R(\lambda)$ 为 FBG 的反射率,随着 FBG 的反射谱被展宽或变窄而变化。为了实现线性响应和温度不敏感性的测量,可使用一个输出功率密度谱平坦的宽带光源,如超发光二极管或平坦化的掺铒光纤自发辐射光源,此时 $\rho(\lambda)$ 是常数,意味着它不随波长而改变。一般情况下,啁啾 FBG 反射谱近似为矩形,此时(7)式可改写成

$$P = \eta \rho R \Delta\lambda_{\text{bw}}, \quad (8)$$

式中 ρ 是宽带光源的功率谱密度, R 是 FBG 的平均反射率, $\Delta\lambda_{\text{bw}}$ 是 FBG 的 3 dB 带宽。

2005 年 Dong 等^[37] 提出将 FBG 斜向粘贴于直角三角形悬臂梁侧面的 FBG 位移传感器。当悬臂梁在位移作用下弯曲时,FBG 产生啁啾效应,导致其反射带宽变化,进而改变输出信号的光功率。图 6 是该传感器在 0,6,13 mm 位移下的 FBG 反射谱,可明显看到 FBG 的反射带宽随着位移的增大而展宽。图 7 所示是当位移从 0~13 mm 变化时探测器检测的输出信号,可以看到位移-光功率曲线在位移小于 9 mm 的范围内线性度很好,但是当位移大于 9 mm 时,传感 FBG 的反射率下降,导致曲线线性度下降。他们还报道了基于光栅啁啾法的倾斜传感器^[38]。在该项工作中,三根参数相近的 FBG 分别粘贴在三个梯形悬臂梁上,悬臂梁的弯曲可导致 FBG 的带宽或反射光功率变化,通过自由端与感测倾斜变化的悬摆相连,即可实现对二维倾斜大小和方向的测量。另外,将 FBG 嵌入由聚合物组成的锥形结构中,也可使 FBG 产生啁啾效应以获得应变和温度的同时测量^[39]。文献[40]利用具有非均匀应变场效应的双孔梁结构,也成功实现了啁啾 FBG 应用于压力测量的强度解调。文献[41]将 FBG 的前段封装于套管中并对尾段进行锥形蚀刻,同样通过 FBG

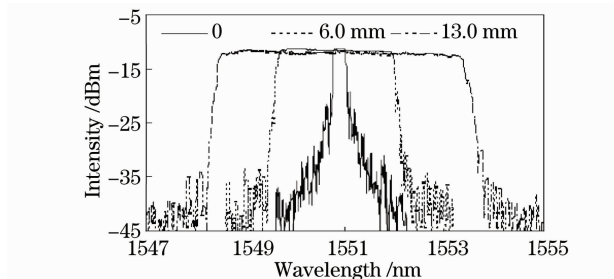


图 6 FBG 传感器在 0,6.0,13.0 mm 位移的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra of the FBG sensor for different displacements of 0, 6.0, 13.0 mm

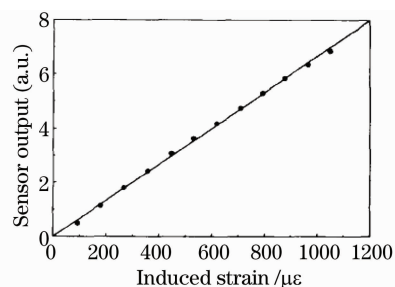


图 4 输出信号随应变变化的关系图

Fig. 4 Measured output signal versus strain of FBG sensor

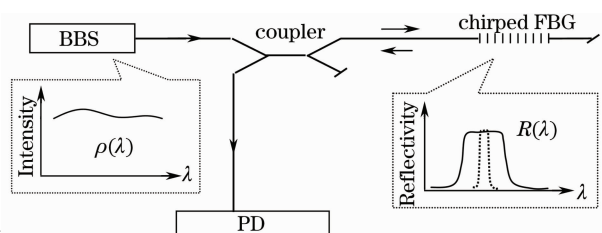


图 5 光栅啁啾法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of chirped FBG method

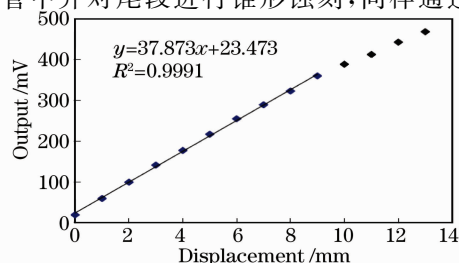


图 7 当位移从 0~13.0 mm 变化时探测器探测到的输出信号

Fig. 7 Measured PD output signal for displacements varying from 0 to 13.0 mm

的啁啾效应实现了对应变的测量^[42]。

光栅啁啾法解调 FBG 传感器可直接将被测参数的变化转换为 FBG 光功率的变化,由于温度变化只改变 FBG 的中心波长,不改变 FBG 的反射带宽和光功率,因此该法的优点是不受环境温度变化的影响。但该方法只适用于可以与 FBG 的啁啾率相关联的被测参量,而且光源功率的波动也会影响系统的测量精度。另外,随着 FBG 带宽的展宽反射率会下降,导致灵敏度的降低。

2.4 激光匹配法

激光匹配法的原理如图 8 所示,光源为窄线宽激光器,经光纤耦合器照射 FBG,反射回来的光用光电探测器测量。该方法的关键是窄线宽激光器的波长要定位于 FBG 反射峰边缘的中部。当传感 FBG 的波长改变时,FBG 的反射谱发生移动,而激光器的波长不动,则 FBG 反射回来的光功率发生变化,如此获得被测参量的信息。

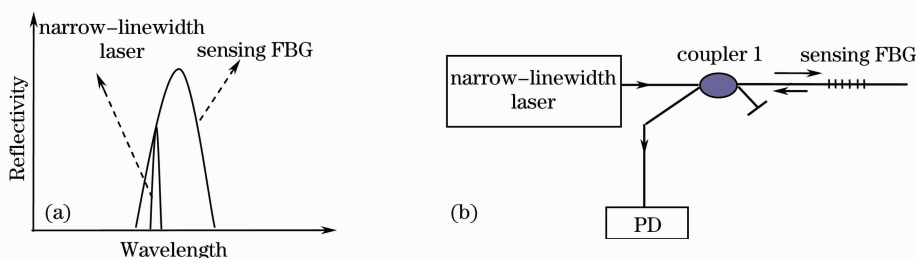


图 8 激光匹配法原理示意图(a)与系统结构(b)

Fig. 8 Schematic diagram of principle (a) and system setup (b) of laser matched method

1998 年 Lissak 等^[43]用该方法设计了 FBG 压力传感器,进行了高灵敏度的动态压力测量。之后使用激光匹配法解调的 FBG 水听器被设计出来^[44]。

由于激光器的光功率较高,激光匹配法解调系统的信噪比和分辨率较高,可实现高精度的动态信号检测,但对光源的波长和功率稳定性要求高,测量范围小。当 FBG 的波长漂移超出其带宽的 2 倍时便无法测量。另外,该方法无法消除温度的交叉敏感效应。

2.5 射频探测法

射频探测法是将传感 FBG 反射回来的射频调制信号与参考 FBG 反射回来的射频调制信号叠加进行光电转换,通过监测获得的射频信号的强度进行传感测量的方法。2008 年 Dong 等^[45]首次用该法设计了 FBG 传感系统,其原理如图 9 所示。宽带光源发出的光通过电光调制器(EOM)被一定频率的射频(RF)信号调制,进入同一根光纤上间隔一定距离(~ 20 cm)的两个 FBG 后的反射光由环形器进入一段长的单模光纤(SMF),由于光纤色散的原因使两个不同波长的调制信号光之间引入一定的相位差,经由探测器送入频谱分析仪(RF Spectrum Analyzer)检测^[41]。假设宽带光源受到频率为 f 的正弦信号的调制,且调制系数为 m ($0 < m < 1$),两个 FBG 的反射光功率可以表示为

$$P_{r,s} = P_{r,s}^c [1 + m \sin(2\pi ft + \varphi_{r,s})], \quad (9)$$

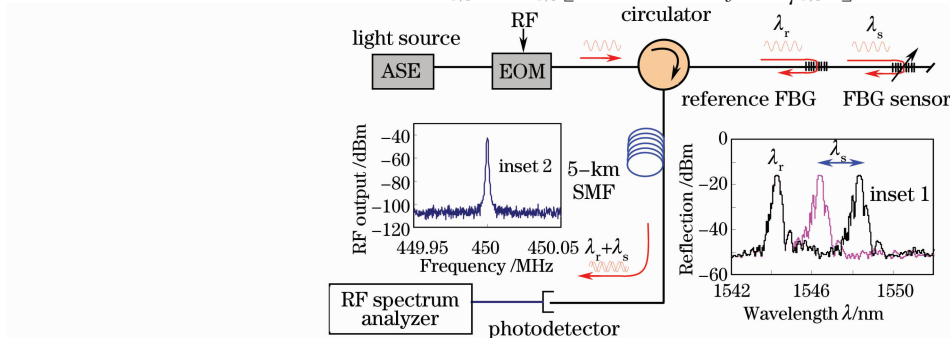


图 9 射频探测法解调 FBG 传感器原理图

Fig. 9 Schematic diagram of double-grating radio signal FBG sensor

式中 P_r 和 P_s 分别为由参考 FBG 和传感 FBG 发射的光功率, P_r^c 和 P_s^c 分别为相应的载波光功率, φ_r 和 φ_s 分别为两个调制信号的相位。如忽略光源输出功率的波长差异, 则两个 FBG 调制光信号的载波光功率相等, 即 $P_r^c = P_s^c = P_c$ 。则探测器的输出光功率可表示为

$$P_{out} = P_r + P_s = 2P_c + P_0 \sin(2\pi ft + \varphi_0), \quad (10)$$

式中 $P_0 = \sqrt{2mP_c} [1 + \cos(\Delta\varphi)]^{1/2}$, 为输出信号的交流分量, 可由频谱分析仪测量出来; $2P_c$ 为直流输出分量, 不能被测量出来, P_0 和 φ_0 分别为射频信号输出的强度和相位。 $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_r$ 为两调制光信号的相位差, 表示为

$$\Delta\varphi = 2\pi f(2n\Delta L/c + DL\Delta\lambda), \quad (11)$$

式中 n 为光纤的折射率, c 为光速, ΔL 为两个 FBG 间的距离, D 和 L 分别为长单模光纤的色散系数和长度。由于射频信号 P_0 与 $\Delta\varphi$ 相关, 而 $\Delta\varphi$ 又与传感 FBG 的波长漂移 $\Delta\lambda$ 有关(见 11 式), 因此通过监测输出的光功率变化就能得到被测量的信息。

图 10 为 FBG 传感系统在 275~575 MHz 频率范围内的射频信号输出随着 FBG 波长间隔变化的理论值曲线^[45], 从图中可以看出, 不同调制频率对应着不同的输出曲线, 灵敏度的符号也可以改变。图 11 为该 FBG 传感器在 325, 550, 575 和 600 MHz 四个不同调制频率下, FBG 波长漂移和射频输出光功率随着应变从 0~2200 $\mu\epsilon$ 范围内变化的关系曲线, 从图中可以看出测量结果与理论值符合。

射频探测法的优点是可以通过改变调制频率来改变传感系统的动态灵敏度和测量范围, 并且可以消除温度的交叉敏感效应, 因为传感 FBG 和参考 FBG 离得很近, 对温度的响应相同。但是该方法需要调制器等较昂贵的器件, 系统成本较高。

3 结 论

本文将强度解调型 FBG 传感器的解调方案归类为光栅匹配法、边缘滤波法、光栅啁啾法、激光匹配法、射频探测法等五种类型, 并对每种解调方法的原理、优缺点及应用等进行了评述。强度解调型 FBG 传感器已经有了初步的应用, 但还有一些问题需要解决, 如强度解调型 FBG 传感器虽然实现了快速的测量, 但是丧失了 FBG 特有的波长编码功能, 使得复用和网络化难度增加, 无法通过多个传感头共用一个解调仪的方式进一步降低系统成本。更多能够在实际测量中应用的强度解调型 FBG 传感器还有待科研人员的研究和开发。

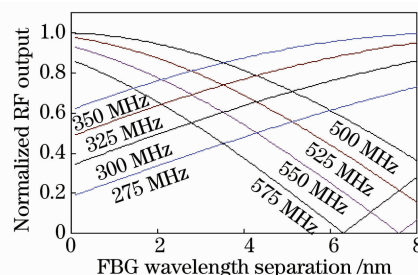


图 10 不同调制频率下, 射频信号的输出随着 FBG 波长间隔的变化

Fig. 10 Calculated RF signal power against FBG wavelength separation for different modulation frequencies

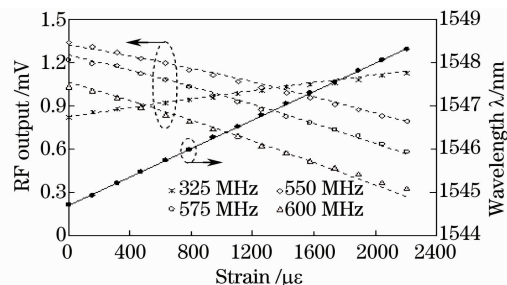


图 11 不同调制频率下, FBG 波长漂移和射频输出功率随应变的变化(点表示测量结果, 虚线是理论值)

Fig. 11 FBG wavelength shift and RF signal power (dotted line for measurement results; dashed lines for theoretical results for strain measurement at different modulation frequencies)

参 考 文 献

- Zhang Weigang, Principle and Application of Fiber Optics[M]. Tianjin: Nankai University Press, 2008. 15
张伟刚. 光纤光学原理及应用[M]. 天津: 南开大学出版社, 2008. 15
- W. Jin, W. C. Michie, G. Thursby *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature; error analysis[J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**: 598~609
- Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86
詹亚歌, 蔡海文, 向世清等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 83~86

- 4 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**: 1442~1463
- 5 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**: 398~399
- 6 W. T. Zhang, L. H. Liu, F. Li *et al.*. Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 507~508
- 7 Liu Haitao, Chen Jianping, Hsu Luke. Study on fibergrating pet roleum pressure sensor and it s reliability[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1243~1246
刘海涛, 陈建平, Hsu Luke. 光纤光栅原油压力传感器实验及其可靠性研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1243~1246
- 8 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity-referred and temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 207~211
郭 团, 赵启大, 刘丽辉 等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 207~211
- 9 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Principle and Application of Fiber Bragg Grating[M]. Beijing: Science Press, 2006. 161
饶云江, 王义平, 朱 涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 161
- 10 A. B. Lobo Ribeiro, L. A. Ferreira, J. L. Santos *et al.*. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4): 934~939
- 11 Lu Qing, Zhan Yage, Xing Shiqing. Two-values question in signal detecting of strain sensor based on fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 988~992
陆 青, 詹亚歌, 向世清. 光纤光栅应力传感器信号检测中双值问题的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 988~992
- 12 Q. Wu, Y. Semenova, A. Sun *et al.*. High resolution temperature insensitive interrogation technique for FBG sensors[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2010, **42**(4): 653~656
- 13 B. J. Peng, Y. Zhao, Y. Zhao *et al.*. Tilt sensor with FBG technology and matched FBG demodulating method[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2006, **6**(1): 63~66
- 14 Peng Baojin, Zhao Yong, Meng Qingyao *et al.*. Fiber Bragg grating high-pressure sensor with temperature compensation[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2006, **46**(4): 484~487
彭保进, 赵 勇, 孟庆尧 等. 具有温度补偿的光纤光栅压力传感器[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(4): 484~487
- 15 Xu Zhaowen, Sheng Qiuqing, Shi kebin *et al.*. The study on fiber grating vibration sensor[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2001, **34**(2): 79~81
许兆文, 盛秋琴, 施可彬 等. 光纤光栅振动传感试验研究[J]. 南开大学学报(自然科学), 2001, **34**(2): 79~81
- 16 Liu Bo, Cao Ye, Luo Jianhua *et al.*. Researching on the experiment of fiber Bragg grating hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 686~689
刘 波, 曹 晔, 罗建花 等. 光纤光栅水听器技术实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(5): 686~689
- 17 X. J. Ni, Y. Zhao, J. Yang. Research of a novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor[J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2007, **138**(1): 76~80
- 18 Y. Zhao, Q. Y. Meng, K. Chen. Novel current measurement method based on fiber Bragg grating sensor technology[J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.* 2006, **126**(1): 112~116
- 19 J. C. C. Silva, C. Martelli, H. J. Kalinowski *et al.*. Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings[J]. *Opt. Laser Eng.*, 2007, **45**(1): 88~92
- 20 S. M. Melle, K. Liu, R. M. Measure. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 1992, **4**(5): 516~518
- 21 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372
- 22 P. Tsai, F. Sun, G. Z. Xiao *et al.*. A new fiber-Bragg-grating sensor interrogation system deploying free-spectral-range-matching scheme with high precision and fast detection rate[J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 2008, **20**(4): 300~302
- 23 Liu Yunqi, Liu Heliang, Liu Zhiguo *et al.*. Research on all-fiber FBG sensor based on long-period fiber grating filter[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2000, **13**(4): 241~245
刘云启, 柳贺良, 刘志国 等. 基于长周期光栅滤波的全光纤光栅传感器研究[J]. 传感技术学报, 2000, **13**(4): 241~245
- 24 Huang Yonglin, Dai Sen . Edge filter demodulation of fiber Bragg grating displacement sensing using long period grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, **22**(9): 1266~1269
黄勇林, 代 森. 基于长周期光栅边缘滤波解调的光纤布喇格光栅位移传感研究[J]. 传感技术学报, 2009, **22**(9): 1266~1269
- 25 Y. Sano, T. Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 132~139
- 26 P. Niewczas, A. J. Willshire, L. Dziuda *et al.*. Performance analysis of the fiber Bragg grating interrogation system based on an arrayed waveguide grating[J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 2003, **53**(4): 1513~1517
- 27 G. Z. Xiao, F. G. Sun, Z. G. Lu *et al.*. Simultaneously interrogation of multi fiber Bragg grating sensors by an AWG based demultiplexer [C]. *IEEE Sensors*, 2005, **30**(3): 1104~1106
- 28 R. Huang , Y. W. Zhou, H. W. Cai *et al.*. A fiber Bragg grating with triangular spectrum as wavelength readout in sensor systems[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1-6): 197~201
- 29 P. Capoluongo, C. Ambrosino, S. Campopiano *et al.*. Modal analysis and damage detection by fiber Bragg grating sensors[J]. *Sensor.*

- Actuat. A-Phys, 2007, **133**(2): 415~424
- 30 M. A. Davis, A. D. Kersey. All-fibre Bragg grating strain-sensor demonstration techniques using a wavelength division coupler[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**: 75~76
- 31 Jiang Yi, Liu Li. Optical fiber Bragg sensors based on ordinary WDC and LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 21~23
江毅, 刘莉. 基于波分耦合器的光纤布拉格光栅传感器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 21~23
- 32 S. Chung, J. Kim, B. Yu *et al.*. A fiber Bragg grating sensor technique using a polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 2001, **13**(12): 1343~1345
- 33 Zhao Yong, Optical Fiber Gratings Sensing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007, 165
赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007, 165
- 34 X. F. Yang, C. L. Zhao, Q. Z. Peng *et al.*. FBG sensor interrogation with high temperature insensitivity by using a HiBi-PCF Sagnac loop filter[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(1-3): 63~68
- 35 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen'an *et al.*. Research on a demodulation technology based on edge of linear filters of ASE light source[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(9): 1170~1173
乔学光, 丁锋, 贾振安等. 一种基于 ASE 光源的边缘滤波解调技术的研究[J]. *光电子激光*, 2009, **20**(9): 1170~1173
- 36 X. Y. Dong, P. Shum, C. C. Chan. Temperature-insensitive Sensors with Chirp-Tuned Fiber Bragg Gratings, in Progress in Smart Materials and Structures Research[M]. Newyork: Nova Science Publishers, 2007, Chapter 7, 203~226
- 37 X. Y. Dong, X. F. Yang, C. L. Zhao *et al.*. A novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2005, **14**(2): N7~N10
- 38 X. Y. Dong, C. L. Zhan, K. Hu *et al.*. Temperature-insensitive tilt sensor with strain-chirped fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 2005, **17**(11): 2394~2396
- 39 L. Jin, W. G. Zhang, H. Zhang *et al.*. An embedded FBG sensor for simultaneous measurement of stress and temperature[J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 2006, **18**(1): 154~156
- 40 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828~834
郭团, 刘波, 张伟刚等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828~834
- 41 Shao Liyang. Fiber Bragg grating devices and sensing application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 107~108
邵理阳. 光纤光栅器件及传感应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 107~108
- 42 Z. C. Zhuo, B. S. Ham. A temperature-insensitive strain sensor using a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(5-6): 442~444
- 43 B. Lissak, A. Arie, M. Tur. Highly sensitive dynamic strain measurements by locking lasers to fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1930~1932
- 44 Li Zhizhong, Cheng Yusheng, Hu Yongming *et al.*. Research on a passive fiber grating hydrophone based on polymer side-hole package structure[J]. *Acta Acustica*, 2008, **33**(5): 469~474
李智忠, 程玉胜, 胡永明等. 聚合物边孔封装无源光纤光栅水听器[J]. *声学学报*, 2008, **33**(5): 469~474
- 45 X. Y. Dong, L. Y. Shao, H. Y. Fu *et al.*. Intensity-modulated fiber Bragg grating sensor system based on radio-frequency signal measurement[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(5): 482~484