

文章编号:1004-4213(2010)02-0243-4

压电陶瓷驱动的动态匹配光栅滤波解调法优化

潘子军,赵建林[†],李恩普,周王民,姜碧强,吕全超,成振龙

(西北工业大学 理学院 光信息科学与技术研究所 陕西省光信息技术重点实验室 西安 710072)

摘要:提出并实验验证了一种动态匹配光栅滤波系统的优化解调方法.在压电陶瓷驱动的动态匹配(光纤)光栅滤波解调系统中,一方面采用上升高压锯齿波,以消除压电陶瓷滞回效应;另一方面将压电陶瓷电压与伸长量关系的反函数作为锯齿波上升电压,以校正压电陶瓷的非线性;进而,为实现解调系统的温度补偿,引入一根中心波长保持不变的参考(光纤)光栅.在锯齿波上升过程中,匹配光栅与参考光栅和传感(光纤)光栅在不同时刻匹配,匹配时间差仅与传感光栅有关,而与解调系统温度无关.实验结果表明,优化后系统的线性度可提高 2%,灵敏度与理论值的相对误差小于 0.6%;在 10~60℃ 范围内,该解调系统温度变化引起的相对误差小于 1%.

关键词:光纤光栅(FBG);压电陶瓷(PZT);匹配光栅;温度补偿

中图分类号:TP212

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103902.0243

0 引言

以光纤光栅为核心传感单元的传感器具有结构小巧、不受电磁干扰、灵敏度高、易于分布式测量等优点,已成为传感器应用领域的研究热点^[1-2].光纤光栅将传感量采用波长编码,其特点是不受光源功率稳定性的影响,但却存在波长解调的困难.传统的光谱仪波长解调法因其成本较高、体积较大而不便于实际应用.为此,研究者提出了边缘滤波法、可调谐滤波法、干涉扫描法、三角型滤波器法等各种新的解调方法^[3-8].在这些解调方法中,动态匹配(光纤)光栅滤波法因其性价比高,易于构成全光纤网络,被认为具有很好的应用前景.

动态匹配光栅滤波法的解调原理是,在外界应变驱动下,匹配光栅的中心反射波长发生变化,当传感(光纤)光栅与匹配光栅完全匹配时,获得传感光栅的中心反射波长.然而,当采用压电陶瓷(PZT)驱动匹配光栅时,PZT 自身的滞回和非线性效应,以及 PZT 和匹配光栅的温度响应等问题,均会给测量结果带来误差.为此,翟玉峰等^[9]首先采用微测力传感器对匹配光栅的伸长情况进行监测,以此来修正 PZT 滞回和非线性效应;然后引入新的温度传感器,将传感光栅的温度反馈到 PZT 和匹配光栅所处环境中,以消除温度影响.以上方法虽然效果较好,但引入了新的结构,使系统结构复杂化,实际应用较为困难.

本文提出通过对动态匹配光栅滤波法的一种新的优化方案来解决上述问题.首先,采用上升锯齿波作为 PZT 驱动电压,避免 PZT 滞回效应;其次,将 PZT 电压一位移关系的反函数作为上升电压,确保在单位时间上升的电压值能够使 PZT 伸长相同的位移,从而校正了 PZT 非线性;最后,引入一根光纤光栅作为解调系统的参考光栅,将其置于恒温装置中以保持中心波长恒定,信号解调过程中,该参考光栅与传感光栅反射信号光强最大值出现的时间差不受解调系统温度影响,从而实现温度补偿.实验结果表明,该系统线性度优化后可提升到 0.999,经线性拟合后的灵敏度与理论值之间相对误差小于 0.6%,在 10~60℃ 温度范围内,温度变化引起的测量时间相对误差小于 1%.

1 原理

利用动态匹配光栅滤波法解调光纤光栅传感器波长信号的实验系统如图 1. 光纤布拉格光栅 FBG_S 、 FBG_D 及 FBG_T 分别作为传感、匹配和参考光栅. FBG_T 置于恒温装置中,保持中心波长不变.在 PZT 的两端分别粘接一金属块,将 FBG_D 的两端分别固定在两金属块上,用以检测自耦合器端口 4 出射的光信号. PZT 在周期性锯齿波电压驱动下,带动 FBG_D 周期性伸缩,当其中心反射波长与 FBG_S 和 FBG_T 匹配时,光电探测器 PD 探测到的光强信号周期性地出现两个最大值,且两个最大值出现的时间差与温度无关,但与 FBG_S 和 FBG_T 的中心波长差值成正比,而 FBG_T 的中心波长已知,故

[†] Tel: 029-88431663

Email: jlzha@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2009-03-26

修回日期: 2009-06-30

时间差只与 FBG_S 的中心波长有关。

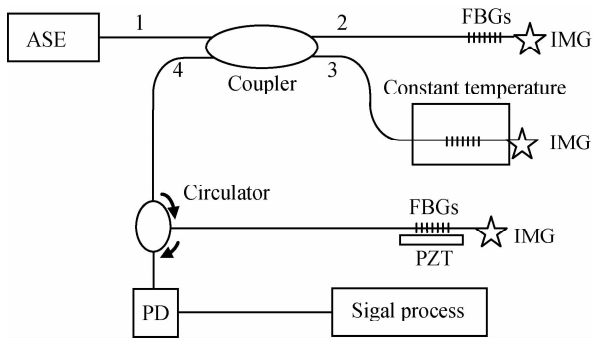


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment setup

1.1 压电陶瓷驱动电压的优化原理

由于 PZT 具有滞回效应,导致升压和降压曲线不同,如图 2 所示.为避免滞回效应,采用上升锯齿波电压驱动 PZT.为便于分辨出所需的两个波峰,在两个锯齿波之间加入一段零值电压,连续两个波峰出现的时间差小于锯齿波的上升时间即为所需的两个波峰.这样做的特点是,只需要光电探测器的电压输出就可以获得传感光栅的中心反射波长,实现单通道测量,降低信号处理的难度.如果锯齿波之间没有零值电压,则为获得所需两个波峰,必须先由光电探测器的输出电压得到波峰出现的时间,然后根据 PZT 驱动电压波形得到所需的两个波峰,这样,就必须测量光电探测器和 PZT 驱动两路电压信号。

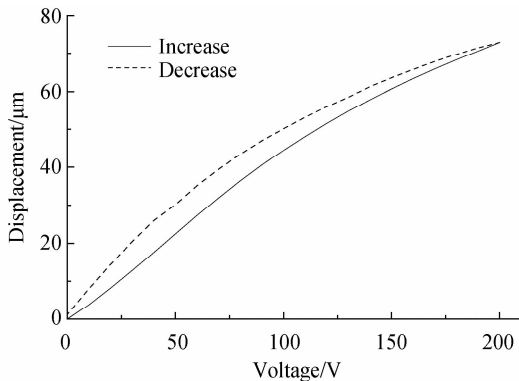


图2 PZT 伸长量对电压的响应曲线

Fig.2 Response curve of the PZT's displacement vs Voltage

由图 2 可看出, PZT 的电压与位移关系并非完全线性,而是随着电压的增大,伸长量的斜率减小.为了使单位时间内 PZT 的伸长量一致,可设 PZT 的升压电压 $V = f_V(t)$ 与伸长量 D 的函数关系为

$$D = f_D(V) = f_D[f_V(t)] \quad (1)$$

对于标准锯齿波, f_V 是线性的,而函数 f_D 是非线性的,故导致伸长量 D 和时间 t 为非线性关系.若令 f_V 是 f_D 的反函数,则伸长量与时间关系变为线性关系,即

$$D = kt \quad (2)$$

式中 k 为伸长量和时间的比例系数.对 PZT 电压响

应特性进行曲线拟合,再取其反函数得函数 f_V .

1.2 温度补偿原理

根据耦合模理论,当用锯齿波驱动 PZT 时,若应变和温度同时变化,在不考虑交叉敏感情况下, FBG_D 的中心反射波长可表示为

$$\lambda_D = K_{DT} \Delta T_D + K_{De} \Delta \epsilon_D + \lambda_{D0} \quad (3)$$

式中 λ_{D0} 、 λ_D 分别表示 FBG_D 变化前后的中心波长, K_{DT} 、 K_{De} 分别表示 FBG_D 的温度与应变灵敏度, ΔT_D 、 $\Delta \epsilon_D$ 分别表示 FBG_D 的温度变化量和应变变化量.由于 FBG_D 没有直接固定在 PZT 上,故 $\Delta \epsilon_D$ 与 PZT 的应变变量 $\Delta \epsilon_{PZT}$ 成正比,即

$$\Delta \epsilon_D = \alpha \Delta \epsilon_{PZT} = \alpha (D + \gamma L_{PZT} \Delta T_D) / L_{PZT} \quad (4)$$

式中 α 为 PZT 长度与 FBG_D 两固定点之间长度的比值, γ 为 PZT 的热膨胀系数, L_{PZT} 为 PZT 长度.

联立式(2)、(3)和(4),可得

$$\lambda_D = (K_{DT} + \alpha \gamma L_{PZT} K_{De}) \Delta T_D + \alpha k K_{De} t / L_{PZT} + \lambda_{D0} \quad (5)$$

由式(5)可知, FBG_D 中心波长和温度变化与 PZT 两端的电压值有关.若温度变化 ΔT_D , 设 FBG_D 与 FBG_S、FBG_T 匹配时的时间分别为 t_S 、 t_T , 在一个锯齿波周期内, FBG_D 和 PZT 所处环境温度可视为不变, FBG_S 和 FBG_T 的中心波长可分别表示为

$$\lambda_{DS} = (K_{DT} + \alpha \gamma L_{PZT} K_{De}) \Delta T_D + \alpha k K_{De} t_S / L_{PZT} + \lambda_{D0} \quad (6)$$

$$\lambda_{DT} = (K_{DT} + \alpha \gamma L_{PZT} K_{De}) \Delta T_D + \alpha k K_{De} t_T / L_{PZT} + \lambda_{D0} \quad (7)$$

将式(6)与(7)相减,可得 FBG_S 和 FBG_T 的中心反射波长差

$$\Delta \lambda = \lambda_{DS} - \lambda_{DT} = \alpha k K_{De} (t_S - t_T) / L_{PZT} \quad (8)$$

由式(8)可知,由光电探测器探测到的 FBG_S 和 FBG_T 波长差与温度无关.由于 FBG_T 的中心反射波长固定不变,因此, $\Delta \lambda + \lambda_{DT}$ 即为传感光栅 FBG_S 的中心反射波长 λ_{DS} .显然,由此得出的 λ_{DS} 与 PZT 和 FBG_D 所处环境温度无关。

2 实验结果与分析

采用图 1 所示实验系统.其中光源 ASE 为 EXFO-FLS2300B 型宽带光源; PZT 尺寸为 $8 \times 8 \times 60 \text{ mm}^3$, 驱动电压为 $0 \sim 200 \text{ V}$ (由 $0 \sim 10 \text{ V}$ 电压经放大得到), 在 200 V 最大额定电压驱动下的伸长为 $73 \mu\text{m}$; 光纤光栅的 3 dB 带宽均为 0.2 nm ($\pm 0.01 \text{ nm}$), FBG_D 的两粘贴点间距为 43.2 mm , 应变灵敏度为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 在 PZT 驱动下中心反射波长的变化范围为 $1548.096 \sim 1550.123 \text{ nm}$.任意情况下, FBG_S 与 FBG_T 中心反射波长的差值大于 0.4 nm , 以免因差值过小而无法分辨。

对 PZT 的电压 V 与伸长量 D 的关系曲线进行

三阶多项式拟合,拟合相关度为 0.999 6,拟合结果为

$$D = F_D(V) = -0.0099\ 66 + 0.491\ 68V - 0.00021V^2 - 0.000\ 002V^3 \quad (9)$$

将 PZT 在 200 V 下的伸长量均分为 4 000 ($<2^{12}$) 份,求出各伸长量对应的电压值,再转化为 0~10 V 的控制电压,该电压可由 12 位数模转化芯片依次输出,每个电压值持续时间相同.系统采用的电压上升时间为 200 ms,锯齿波周期之间的零值时间为 300 ms.处理前后的锯齿波波形与光电探测器的输出信号波形分别如图 3 和图 4 所示.可以看出,PZT 驱动电压加入零值电压后,易于分辨输出出的两个波峰.锯齿波的上升电压由线性关系转换为函数 f_D 的反函数关系后,随着时间的变化,电压的斜率越来越大,与 PZT 的位移和电压关系相反.

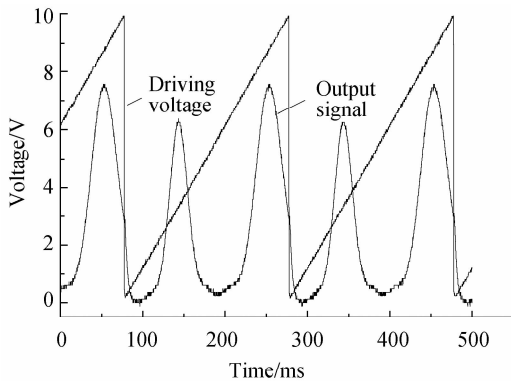


图 3 优化前的驱动电压及输出信号

Fig. 3 Driving voltage and output signal before optimization

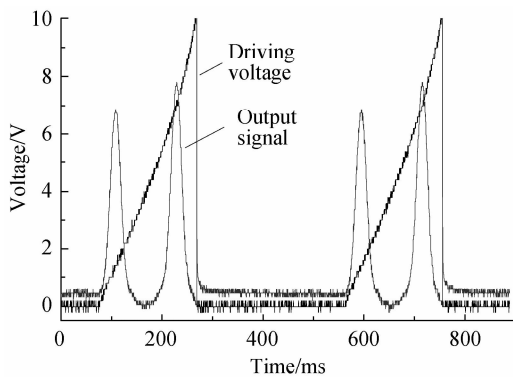


图 4 优化后的驱动电压及输出信号

Fig. 4 Driving Voltage and output signal after optimization

光电探测器的输出电压经 A/D(NI-USB6009 型数据采集卡)转换输入到计算机中,运用 LabVIEW 软件对数据进行滤波处理,拾取其峰值出现的时间,将连续的两个波峰出现时间相减,差值小于 200 ms 为所需波峰.采用优化前后的锯齿波驱动 PZT,分别进行实验.改变 FBG_s 的中心反射波长,测量对应的时间差,其中 FBG_s 的中心反射波长由 AQ-6317c 型光谱分析仪测出.实验结果如图 5 所示.

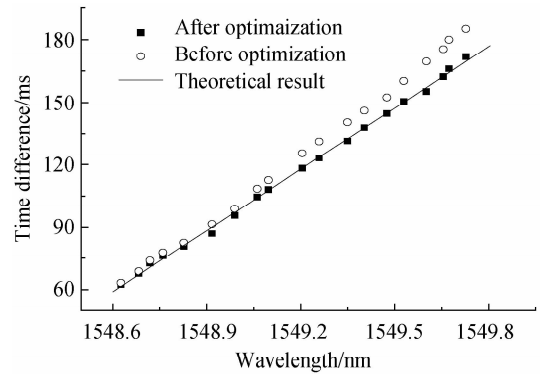


图 5 时间差与波长的关系

Fig. 5 Dependence of the time difference on wavelength

由图 5 可看出,随着传感光栅中心反射波长的增加,优化前的时间差逐渐偏离理论值,其原因来自 PZT 的电压响应特性.由于在电压升高的过程中,伸长相同的位移需要的电压越来越大,而单位时间上升的电压值不变,故会偏离理论值;优化后的时间差与理论值符合很好,线性度由优化前的 0.976 提升到 0.999,线性拟合后的斜率即灵敏度在优化前后分别为 110.32 ms/nm 和 98.11 ms/nm.利用式 (8) 可得理论灵敏度为 98.63 ms/nm,可见优化后的灵敏度值与理论值基本一致,相对误差小于 0.6%.

为了验证本系统的温度不敏感特性,将 PZT 置于不同温度条件下,测量恒定波长下时间差随温度的变化情况.测试结果如图 6 所示,系统在 10~60℃ 的温度变化范围内,测量时间差的相对误差不大于 1%,表明该系统具有较好的温度不敏感性.

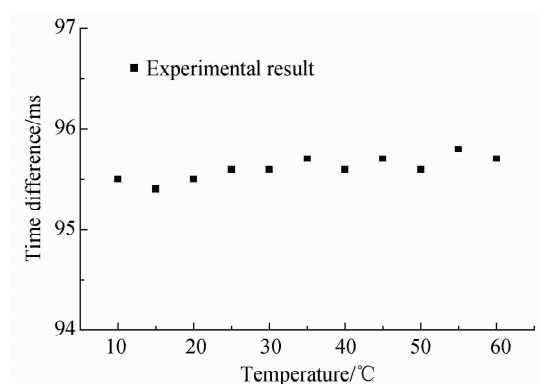


图 6 时间差与温度的关系

Fig. 6 Dependence of the time difference on temperature

3 结论

提出并实验验证了一种动态匹配光栅滤波系统的优化解调方法.该方法的特点及效果是:1)压电陶瓷驱动电压只用升压式锯齿波,升值由压电陶瓷电压与伸长量特性的反函数得到,消除了压电陶瓷的滞回效应和非线性效应的影响,同时实现了信号的单通道解调.实验得到优化前后的线性度由

0.976提升到0.999,且线性拟合后的灵敏度与理论值符合很好;2)引入一根中心波长不变的光纤光栅作为参考光栅,解调出的参考光栅和传感光栅光强最大出现时间差与温度无关,消除了温度对压电陶瓷和匹配光栅的影响,在10~60℃温度范围内,实验测量结果与理论分析一致,相对误差不超过1%。以上结果表明,在利用匹配光栅滤波方法动态解调光纤光栅传感器的波长信号时,所提出的优化方案具有结构简单、成本低、不受温度影响、便于数据处理等优点,适合于实际应用。

参考文献

- [1] KERSEY A D, DAVIS M M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1461.
- [2] GUO T, ZHAO Q D, DOU Q Y, *et al.* Temperature-insensitive fiber bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever Beam[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(11): 2400-2402.
- [3] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection [J]. *Opt Lett*, 1993, **18**(1): 72-74.
- [4] SERGE M M, LIU K X, RAYMOND M M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, **4**(5): 516-518.
- [5] RAO Y J, JACKSON D A, ZHANG L, *et al.* Dual-cavity interferometric wavelength-shift detection for in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1556-1558.
- [6] JAUREGUI C, QUINTELA A, LOPEZ-HIGUERA J M. Interrogation unit for fiber grating sensors that uses a slanted fiber grating[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(2): 676-678.
- [7] FAN Dian, JIANG De-sheng, MEI Jia-chun. High-speed double-edged wavelength interrogation technology for fiber bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 118-121. 范典, 姜德生, 梅加纯. 高速双边缘光纤光栅波长解调技术. 光子学报, 2006, **35**(1): 118-121.
- [8] SONG Jian-fei, SHAO Li-yang, ZHANG A-ping, *et al.* A new FBG based dynamic-strain interrogation system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(08): 924-926. 宋剑飞, 邵理阳, 张阿平, 等. 一种新型FBG动态应变解调系统. 光子学报, 2007, **18**(08): 924-926.
- [9] ZHAI Yu-feng, ZHANG Long, LI Fei, *et al.* Study on temperature compensation for matched grating interrogation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1365-1368. 翟玉峰, 张龙, 李飞, 等. 动态匹配光栅解调传感系统温度补偿研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(7): 1365-1368.

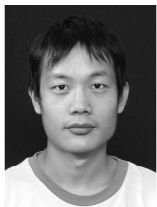
Optimization of Dynamic Matched Grating Filtering Demodulation Driven by Piezoelectric Ceramic

PAN Zi-jun, ZHAO Jian-lin, LI En-pu, ZHOU Wang-min, JIANG Bi-qiang,
LÜ Quan-chao, CHENG Zhen-long

(Institute of Optical Information Science and Technology, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An optimized method of dynamic matched grating filtering demodulation system is proposed and experimentally validated, in which PZT's hysteresis effect is eliminated by use of rising sawtooth wave and inverse function of relationship between PZT's voltage and displacement is adopted as the sawtooth wave to correct the PZT's nonlinear effect. Furthermore, a reference fiber Bragg grating is introduced to realized temperature compensation, of which the center wavelength keeps invariable. In the rising stage of the sawtooth wave, the matched grating will match with the reference grating and the sensing grating at different time. The time difference depends on the center wavelength of the sensing grating, and is insensitive to the temperature of the demodulation system. The experimental results indicate that linearity is improved by 2%, the sensitivity error is less than 0.6% of the theoretical result. The relative error caused by temperature changing from 10℃ to 60℃ is less than 1%.

Key words: Fiber Bragg grating (FBG); Piezoelectric ceramic (PZT); Matched grating; Temperature compensation



PAN Zi-jun was born in 1983. He is pursuing his M. S. degree in Optical Engineering at Northwestern Polytechnical University. His main research focuses on optical fiber grating sensors.



ZHAO Jian-lin was born in 1958 and received his Ph. D. degree in optics from Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, in 1998. Currently, he is a professor at NPU. His main research interests focus on optical information technology and applications.