

基于表贴式应变传递的光纤光栅匹配解调研究

黄南 贾书海 王龙宁 杨泽航 李宇杰

Matched filtering demodulation of fiber Bragg grating based on surface attached strain transfer

HUANG Nan, JIA Shuhai, WANG Longning, YANG Zehang, LI Yujie

引用本文:

黄南, 贾书海, 王龙宁, 等. 基于表贴式应变传递的光纤光栅匹配解调研究[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 530–537. DOI: 10.5768/JAO202546.0311007

HUANG Nan, JIA Shuhai, WANG Longning, et al. Matched filtering demodulation of fiber Bragg grating based on surface attached strain transfer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 530–537. DOI: 10.5768/JAO202546.0311007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型化光纤光栅解调系统设计及寻峰算法的模拟评测

Design of miniaturized fiber grating demodulation system and simulation evaluation of peak-detection algorithm

应用光学. 2020, 41(3): 618–625 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308001>

基于长周期光纤光栅的FBG解调方法

FBG demodulation method based on long-period fiber gratings

应用光学. 2022, 43(1): 160–166 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108002>

基于光子集成芯片的可穿戴光纤光栅解调研究

Wearable fiber grating demodulation based on photonic integrated chip

应用光学. 2023, 44(1): 219–225 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108001>

基片式光纤光栅传感器加速度试验研究

Acceleration test of substrate-packaged fiber Bragg grating sensor

应用光学. 2022, 43(1): 152–159 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108001>

基于阵列波导光栅的边缘滤波温度解调系统

Edge filter temperature demodulation system based on arrayed wave-guide grating

应用光学. 2021, 42(5): 898–905 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503004>

基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0530-08

引用格式: 黄南, 贾书海, 王龙宁, 等. 基于表贴式应变传递的光纤光栅匹配解调研究[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 530-537.

HUANG Nan, JIA Shuhai, WANG Longning, et al. Matched filtering demodulation of fiber Bragg grating based on surface attached strain transfer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 530-537.



在线阅读

基于表贴式应变传递的光纤光栅匹配解调研究

黄南, 贾书海, 王龙宁, 杨泽航, 李宇杰

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 光纤布拉格光栅传感器应用前景广阔, 限制其大量实际应用的主要障碍是传感信号的高速高精度解调。介绍了一种匹配光栅滤波解调的方法及系统: 数值模拟了反射式匹配滤波解调法, 并对表贴式应变传递模型进行了改进, 建立了光纤-胶体-压电堆叠三层模型, 通过仿真确定了光纤光栅黏接在压电堆叠上的具体参数; 搭建了匹配解调系统, 探究了在压电堆叠上黏接多根光纤光栅来扩宽解调范围的方法, 并以希尔伯特变换寻峰算法实现了光纤光栅中心波长的解调。黏接两根光纤光栅时系统的解调范围为 1 540.121 nm~1 541.474 nm, 最大偏差为 8.6 pm, 波动均值为 5.4 pm, 解调范围、精度、稳定性等性能指标良好, 能够满足某些场景波长解调的需求。该解调系统具备一定的参考意义和实用价值。

关键词: 光纤光栅; 匹配滤波; 应变传递; 信号解调; 寻峰算法

中图分类号: TN212

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0311007

Matched filtering demodulation of fiber Bragg grating based on surface attached strain transfer

HUANG Nan, JIA Shuhai, WANG Longning, YANG Zehang, LI Yujie

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The fiber Bragg grating sensor has a broad application prospect, and the main obstacle limiting its practical application is the high speed and high precision demodulation of the sensing signal. A matching grating filtering demodulation method and system were introduced. The reflectance matching filtering demodulation method was numerically simulated, and the strain transfer model was improved to establish a three-layer model of fiber-adhesive-piezoelectric stack. The specific parameters of fiber Bragg grating bonding on the piezoelectric stack were determined by simulation. Finally, the matching demodulation system was constructed. The method of expanding the demodulation range by bonding multiple fiber Bragg gratings on the piezoelectric stack was explored, and the center wavelength demodulation of fiber Bragg grating was realized by Hilbert transform peak-finding algorithm. The demodulation range of the system is 1 540.121 nm~1 541.474 nm, the maximum deviation is 8.6 pm, and the mean fluctuation is 5.4 pm, whose demodulation range, precision and stability are good, which can meet the wavelength demodulation requirements in specific applications. The demodulation system has certain reference significance and practical values.

Key words: fiber Bragg grating; matched filtering; strain transfer; signal demodulation; peak-finding algorithm

收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“储能锂离子电池智能监测技术研究”资助 (5500-202255364A-2-0-ZN)

作者简介: 黄南 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感解调技术研究。E-mail: 317852hn@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 贾书海 (1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事光学精密测量技术研究。E-mail: shjia@xjtu.edu.cn

引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 是一种光无源器件,其本质是光纤纤芯内折射率呈周期分布的光栅。与传统的电学传感器相比,FBG 具有体积小、稳定性好、精度高、抗电磁干扰能力强、耐高温耐腐蚀、成本低、无源本质安全、串联复用等优点。埋入式 FBG 传感器与表面黏贴式 FBG 被广泛应用在矿山、桥梁、大坝及复合结构的健康监测中^[1-6]。国内外学者对这两类 FBG 的应变传递机制做了大量的研究。邱野^[7]利用 Cox 剪滞理论,推导了检测应变与基体实际应变之间的应变传递公式,并通过有限元仿真验证了所提应变传递模型,但是模型引入了底部黏接层和基片层,不适用于研究匹配光栅黏接于压电堆叠表面的情况。张桂花等人^[8]考虑了传感器对基体的影响,重新推导了表贴式 FBG 的应变传递模型,并通过实验测定了 FBG 传感器的应变传递系数,系数误差仅为 1.296%,但是模型假定各层都是长方体,不完全符合 FBG 实际黏接情况。FBG 传感器黏贴于薄板时,光纤应变与薄板应变并不相等,吴入军等人^[9]通过理论建模、仿真研究和实验验证了 FBG 传感器与薄板之间的相互作用,分析了薄板参数对应变传递率的影响。此外,FBG 传感器主要是通过中心波长漂移来检测待测量的变化,因此光谱中心波长的快速准确解调是实现光纤光栅监测系统高精度测量的重要保障^[10-11]。针对双光栅匹配解调技术,杨熙春等人^[12]提出了一种分区查表法,该方法先确定待处理的电压商值在 3 段近似线性曲线上的所属区域,再执行查表法将其和微应变变量一一对应。何彦霄^[13]建立了基于逆压电效应和光纤光栅的轴向应力敏感特性的电压测量方法,利用双光栅匹配解调方法实现传感器的自解调和温度补偿功能,并提出了通过优化光纤光栅和压电陶瓷参数提升传感器特性的方法。

针对匹配光栅直接黏接于压电堆叠表面的应变传递研究,前人虽然做了许多相关工作,但是建立的应变传递模型往往引入底部黏接层和基片层,并且假定各层都是长方体,这使得求解模型过于复杂且精度较低,不符合匹配光栅的实际黏接情况。在现有研究基础上,本文基于匹配滤波法解调光纤传感信号,建立了光纤-胶体-压电堆叠三层应变传递模型,并将胶体横截面形状建模为抛物线形,这种建模更符合匹配光栅黏接于压电堆

叠表面的实际情况。同时设计 Butterworth 低通滤波器去除高频噪声,结合希尔伯特变换寻峰算法实现光谱中心波长的快速准确解调,并探究了在压电堆叠上黏接多根 FBG 来拓宽解调范围的方法,最终设计的解调系统具备一定的参考意义和实用价值。

1 匹配滤波解调原理

如图 1 所示,匹配滤波解调法分为透射式匹配解调法和反射式匹配解调法,两种方法工作方式基本相同,只是光路上有细微差别。

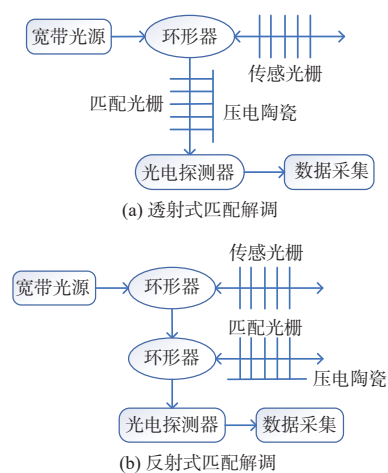


图 1 匹配滤波解调法原理图

Fig. 1 Schematic of matched filtering demodulation method

由图 1 可知,宽带光经过环形器被传感光栅调制,反射的窄带光经环形器中转后进入匹配光栅。匹配光栅通常由压电陶瓷控制,通过给压电陶瓷施加周期性驱动电压,使匹配光栅中心波长周期性变化,当匹配光栅中心波长同传感光栅一致时,匹配光栅可将入射的窄带光几乎全部反射。采用透射式匹配解调时,匹配光栅透射的光进入光电探测器完成光电转换;采用反射式匹配解调时,匹配光栅反射的光经环形器进入光电探测器完成光电转换。通常需要另接跨阻放大器,放大光电探测器感知到的微弱光信号。恰好匹配时,透射式的探测器探测到的光强最小,反射式的探测器探测到的光强最大,且此时匹配光栅的中心波长就是传感光栅的中心波长。而匹配光栅由压电堆叠控制,通过标定好的压电堆叠驱动电压和匹配光栅中心波长之间的关系,可以求得此时匹配光栅的中心波长值,即传感光栅的中心波长。考虑到实验过程中电子器件、环境波动等各

种噪声的影响,同时为避免测量微弱的光强信号,本文采用反射式匹配滤波法。

2 匹配滤波解调仿真

2.1 反射式匹配滤波仿真

根据高斯公式,宽带光源输出频谱、传感光栅反射谱和匹配光栅反射谱的近似表达式^[14]分别为

$$S(\lambda) = I_{\text{peak}} \exp \left[-4(\ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$F_S(\lambda) = R_{\text{max}} \exp \left[-4(\ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_S}{\Delta\lambda_S} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$F_M(\lambda) = R_{\text{max}} \exp \left[-4(\ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_M}{\Delta\lambda_M} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$I_{\text{peak}} = \frac{P_0}{\Delta\lambda_0} \left[\left(\frac{4 \ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

式中: I_{peak} 表示峰值功率; P_0 表示宽带光源的入射功率; λ_0 、 λ_S 、 λ_M 分别表示宽带光源、传感光栅和匹配光栅的中心波长; R_{max} 表示光栅的最大反射率; $\Delta\lambda_0$ 、 $\Delta\lambda_S$ 、 $\Delta\lambda_M$ 分别表示宽带光源、传感光栅和匹配光栅的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM)。光电探测器内的光强表达式^[14]为

$$M_{\text{PD}}(\lambda) = (1 - \alpha) \int_a^b S(\lambda) F_S(\lambda) F_M(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

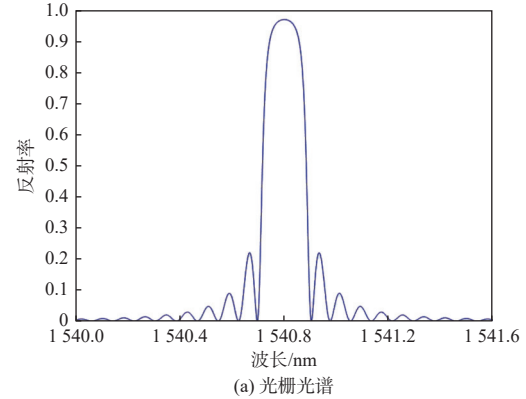
式中: α 为整个通路的光强损耗,包括光学器件对光强的削弱等;积分上下限 a 、 b 主要取决于宽度光源的带宽。根据 FBG 反射率和光谱仿真结果,选定传感光栅和匹配光栅的中心波长为 1540.8 nm,最大反射率为 97.15%,栅区长度为 10 mm,折射率调制深度为 1.2×10^{-4} ,由耦合模式理论^[15]得到光栅光谱如图 2(a) 所示。保证器件参数或材料参数不变,给压电陶瓷通正弦驱动电压能使匹配光栅中心波长周期性变化,仿真时以 1540 nm 为起点,1.6 nm 为变化范围,0.001 nm 为变化步长,基于式(5)进行反射式传感匹配滤波模拟,结果如图 2(b) 所示。

由图 2(b) 可知,传感光经过匹配光栅后,光功率比随匹配光栅中心波长的变化类似高斯线型,恰好匹配时,光功率有最大值。对其进行高斯拟合,则有:

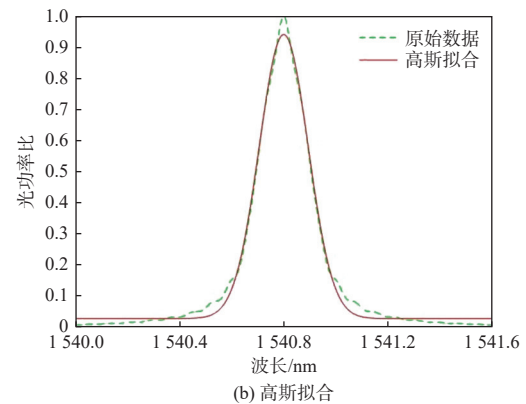
$$P = 0.92 \cdot e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - 1540.8}{0.22} \right)^2} + 0.03 \quad (6)$$

由反射式传感匹配滤波仿真结果可知,当传感光栅中心波长在匹配光栅中心波长变化区间内漂移时,对原始光功率曲线进行高斯拟合能够得到

恰好匹配时的匹配光栅中心波长值,该值即为传感光栅的中心波长。即通过数值仿真验证了匹配滤波解调方法的可行性。



(a) 光栅光谱



(b) 高斯拟合

图2 反射式匹配滤波模拟

Fig. 2 Reflection-type matching filtering simulation

2.2 应变传递仿真

如图 3 所示,根据表贴式光纤布设形式,考虑到其对称性,建立了 FBG(光纤)-353ND(胶结层)-PZT(基体)3 层结构模型,并对半应变传递模型展开研究。建模时需做以下假设:1) 界面处的光纤与胶结层、胶结层与基体黏结完好,不存在相对滑移;2) 光纤与胶结层之间只有轴向位移,没有径向位移;3) 所有材料均为线弹性体,基体沿轴向受到均匀应变,通过胶结层的剪切传递至光纤,光纤不直接受力;4) 黏贴光纤后对基体结构没有影响^[15]。

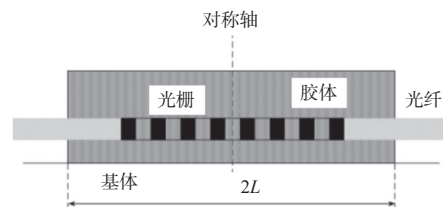


图3 表面黏贴裸光纤纵向截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of longitudinal section of bare optical fiber affixed to surface

分析图3对称轴左侧一半, 以对称轴为 r 轴, 光纤中心轴线为 x 轴建立坐标系, 分析微元段 dx 受力, 结果如图4所示。 σ 为微元段 dx 各层受到的正应力。

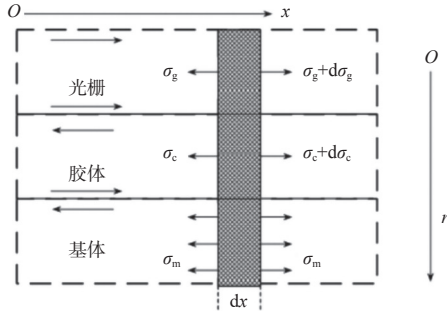


图4 各层微元段剪切力传递示意图

Fig. 4 Shear force transfer diagram of each layer micro-element segment

经分析, 光纤层受力平衡表达式^[16]为

$$\pi r_g^2 \sigma_g = \pi r_g^2 (\sigma_g + d\sigma_g) + 2\pi r_g dx \tau(x, r_g) \quad (7)$$

式中: τ 为微元段 dx 各层之间的剪切应力; m 、 c 、 g 分别表示基体、胶体、光纤; r_g 为光纤光栅的半径。

合理简化计算, 建立如图5所示 y - z 坐标系。

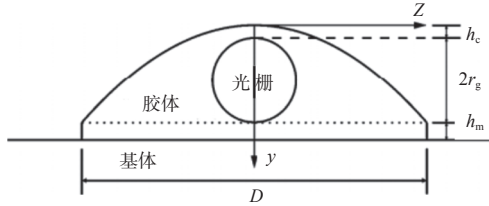


图5 表面黏贴裸光纤横截面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cross section of bare optical fiber affixed to surface

结合抛物线顶点 $(0, 0)$ 和另外两点坐标, 可得其表达式:

$$y(z) = \frac{4H}{D^2} z^2 \quad (8)$$

$$H = 2r_g + h_c \quad (9)$$

式中: D 为胶体的黏接宽度; h_c 为上部胶结层的厚度; H 为上部胶结层厚度与光纤直径之和。 h_m 为下部胶结层的厚度。该3层应变传递模型关于 y 轴对称, 故对其一半建立受力平衡方程。经分析, 胶结层受力平衡表达式^[16]为

$$\left[\frac{D}{2} (H + h_m) - \frac{1}{2} \pi r_g^2 - \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{4H}{D^2} z^2 dz \right] d\sigma_c + \tau(x, r) \cdot \frac{D}{2} dx = \pi r_g \tau(x, r_g) dx \quad (10)$$

再次推导并简化, 可得应变传递率表达式为

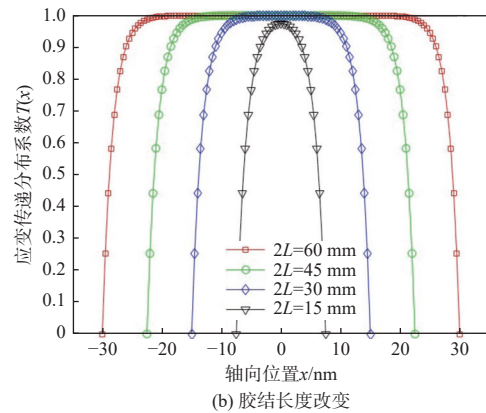
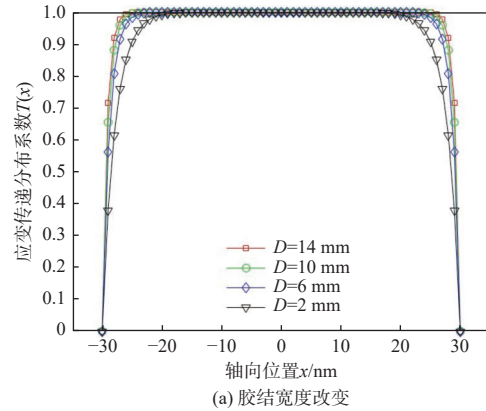
$$T(x) = \frac{\varepsilon_g(x)}{\varepsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \quad (11)$$

式中: ε 为应变; k 为应变传递系数。实际情况下, 黏接的光纤光栅传感器具有一定的长度 $2L$, 表贴式 FBG 所测得的应变为黏贴长度范围内的平均应变^[16], 因此所得到的应变传递率为平均应变传递率, 即:

$$T = \frac{\int_{-L}^L \varepsilon_g(x) dx}{\varepsilon_m} = 1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)}, k^2 = \frac{DG_c}{\pi r_g^2 E_g h_m} \quad (12)$$

式中: G_c 为胶体剪切模量; E_g 为光纤光栅弹性模量。

由式(11)、式(12)可知, 影响应变传递率 T 的因素有: 胶体的黏贴宽度 D , 黏贴长度 $2L$, 胶体剪切模量 G_c , 光纤光栅半径 r_g , 光纤光栅弹性模量 E_g 及下部胶结层的厚度 h_m 。推导简化时 H 被略去, 因而公式中不存在 H , 而 $H = 2r_g + h_c$, 故可忽略上部胶层厚度 h_c 对应变传递率的影响。通常各种光纤光栅传感器的纤芯物理参数几乎不变, 半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 弹性模量 E_g 一般为 $7.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。因此本文中影响应变传递率的因素有 D , $2L$, G_c 及 h_m 。采用单因素变量法研究这4个参数对应变传递的影响, 数值模拟结果如图6所示。4个参数初始设定值为 $D = 3 \text{ mm}$, $2L = 40 \text{ mm}$, $G_c = 0.01 \text{ GPa}$ 及 $h_m = 0.1 \text{ mm}$ 。每次仿真只改变其中某个参数, 而其他参数保持不变。



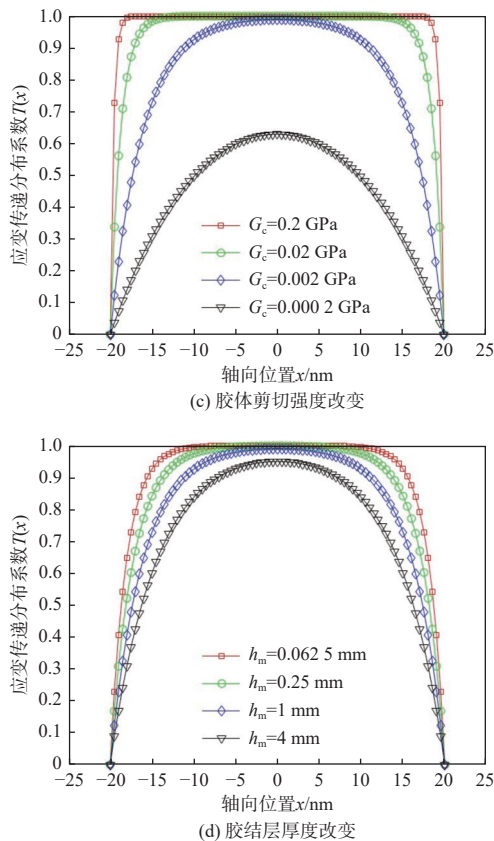


图6 应变传递率与影响因素间的关系

Fig.6 Relation between strain transfer rate and various influencing factors

由图6可知,应变传递系数随着胶结宽度的增大而增大,但胶结宽度在2 mm~14 mm 的范围内,应变传递系数变化并不大,可见胶结宽度对应变传递的影响不大;应变传递系数随着胶结长度的增大而增大,即胶结长度越大,应变传递越充分;应变传递系数随着胶体剪切强度的增大而增大,即胶体剪切强度越大,应变传递越充分;应变传递系数随着胶结层厚度的增大而减小,即胶结层厚度越大,应变传递越不充分。

各点应变传递率随胶结宽度、胶结长度、胶体剪切强度的增大而增大,随胶结层厚度的增大而减小。而压电堆叠在正弦驱动电压的作用下产生形变,想要将这一形变尽可能地传递到黏接的FBG上,获得较好的应变传递效果与较宽的FBG中心波长漂移范围,黏接时必须增大胶结宽度、胶结长度、胶体剪切强度,减小胶结层厚度。

3 实验与分析

3.1 匹配滤波实验

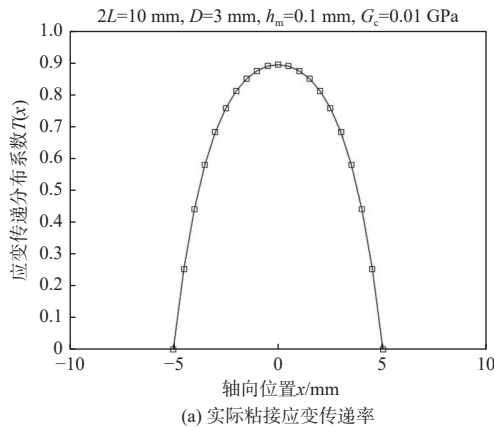
本文所使用的压电陶瓷为芯明天的方形低压

压电堆叠陶瓷 PSt150/2×3/10L,长度方向10 mm 用于黏接FBG。为了提高应变传递率,胶结宽度选择最大宽度3 mm。胶水选用专为光纤黏接而设计的双组分环氧树脂胶水353ND,其完全固化后的剪切强度为0.01 GPa。考虑到实际操作可行性,胶结厚度通常可以控制为0.1 mm左右。实际黏接参数如表1所示。在这些黏接参数下,由式(12)可得平均应变传递率 $T=0.76$,各点应变传递率如图7(a)所示。

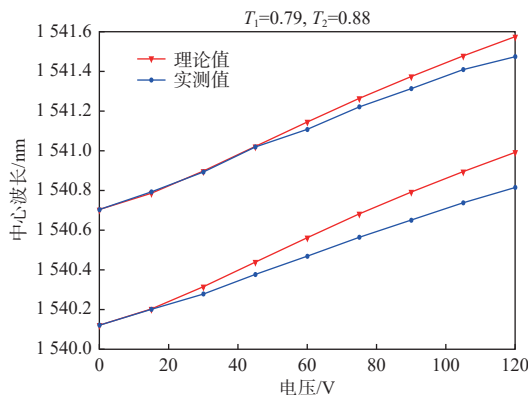
表1 实际黏接参数

Table 1 Actual bonding parameters

胶结宽度 D	胶结厚度 h_m	胶结长度 $2L$	胶体剪切模量 G_c
3 mm	0.1 mm	10 mm	0.01 GPa



(a) 实际粘接应变传递率



(b) FBG 中心波长漂移

图7 实际粘接后的应变传递率和FBG中心波长漂移

Fig.7 Strain transfer rate and FBG central wavelength drift after actual bonding

匹配滤波解调时压电堆叠需要高压驱动,而信号发生器无法产生高压信号,故需要线性放大模块。经调研选择康威科技的堆叠线性130 V 高压微位移致动器YK-HA130D。本文黏接了两根FBG,在0~120 V 电压范围内波长漂移范围分别

为 1 540.121 nm~1 540.815 nm 和 1 540.704 nm~1 541.474 nm, 如图 7(b) 所示。FBG 平均应变传递率实测值分别为 0.79 和 0.88, 与理论值 0.76 有差距, 可能是实际黏接过程中操作导致的误差, 黏接时无法十分准确地将 4 个参数的值控制为设定值。实测值在一定程度上能够说明应变传递模型及仿真的正确性。

为了实现对光谱信号的测量, 需要将光信号转换为电信号。经调研选用的光电探测器为 InGa-As 光电二极管, 所选型号为北京敏光的 LSIPD-L1, 其波长范围为 800 nm~1 700 nm, 可以完全覆盖宽带光源的输出范围。灵敏度为 0.90 mA/mW, 暗电流为 1 nA。光电二极管输出的是非常微弱的电流信号, 要使电信号达到后级采集电路的要求就需要经过电流-电压转换。跨阻放大器放大电阻为 500 kΩ, 光电二极管的微安级电流经过放大后可转为伏级电压。数据采集设备所选用的是 NI6212 数字采集卡, 该型号的数字采集卡具有 16 路模拟输入通道, 采样频率高达 400 kHz。两路光电探测器微弱的电流信号经跨阻放大为电压信号后输入该数字采集卡, 同时信号发生器产生的信号也输入该数字采集卡。数采卡实现信号的采集量化后, 基于 LabVIEW 中的 DAQ 助手编写了三通道信号采集程序, 实现对信号的实时采集及保存, 以便后续进行数据处理。为扩大系统解调范围, 并同时解调多个传感光栅的中心波长, 采用压电堆叠对双匹配光栅进行调谐。实验系统示意图如图 8 所示。

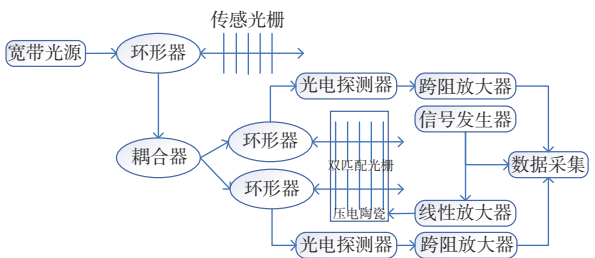


图 8 实验系统示意图

Fig. 8 Experimental system diagram

在关键器件选型和 LabVIEW 三通道信号采集程序设计后, 搭建的实验系统如图 9 所示。

压电堆叠在正弦电压驱动下周期性地伸缩, 导致匹配光栅中心波长产生周期性漂移, 而传感光栅在感知外界温度或应变后中心波长也发生漂移, 但始终位于匹配光栅中心波长漂移区间内, 当两者中心波长相等时恰好匹配, LabVIEW 采集到的传感电压有最大值。由于 LabVIEW 同时采集传

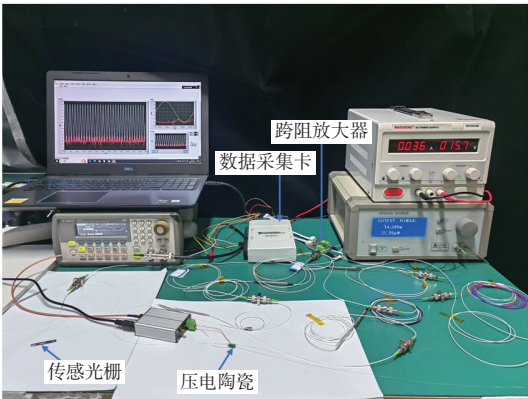


图 9 实验系统搭建

Fig. 9 Experimental system construction

感电压和正弦驱动电压, 可以得到匹配时的正弦驱动电压, 通过标定好的压电堆叠驱动电压和匹配光栅中心波长间的关系, 可以得到传感光栅中心波长。标定时选用 OP-FBG500 解调仪测定光栅中心波长, 参数指标如表 2 所示。

表 2 OP-FBG500 参数指标

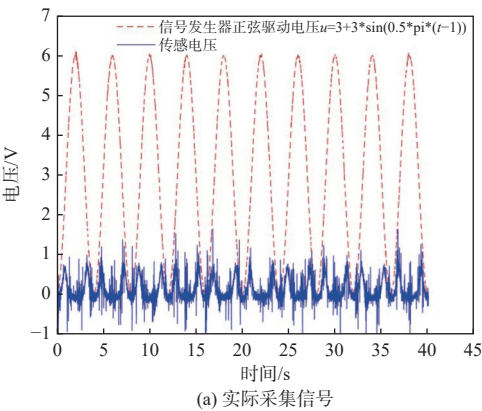
Table 2 OP-FBG500 parameter indexes

波长精度	波长分辨率	动态范围	扫描频率
±1 pm	0.1 pm	50 dB	500 Hz

该四通道解调仪的测量范围为 1 528 nm~1 608 nm, 具有光谱显示、实时波长显示、数据保存等功能, 同时可以根据传感器校准系数, 将波长量转换为温度、位移、应变等物理量。

3.2 实验数据分析

编写 Matlab 程序读取 LabVIEW 保存的 TDMS 格式原始数据, 如图 10(a) 所示。由于光电探测器、数字采集卡等电子仪器设备采集的波动误差, 实际信号中含有高频噪声, 难以从中读取传感电压的最大值, 故设计了一个 6 阶 Butterworth 低通滤波器消除高频噪声, 滤波后信号如图 10(b) 所示。



(a) 实际采集信号

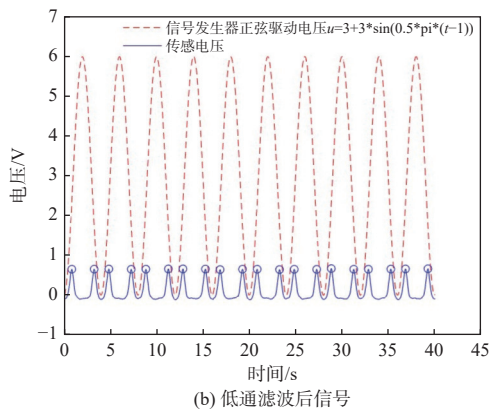
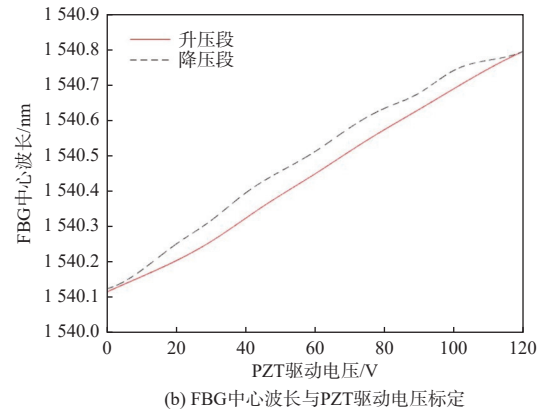


图10 Butterworth低通滤波前后信号对比

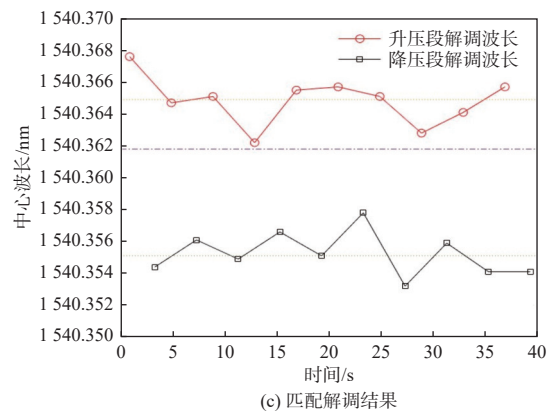
Fig. 10 Signal comparison before and after Butterworth low-pass filtering

使用希尔伯特寻峰算法获取传感电压在一个正弦驱动信号周期内的两个最大值(正弦驱动信号升压段和降压段各有一个传感电压最大值), 希尔伯特变换后的曲线过零点对应峰值, 即传感电压最大值。由于同时采集正弦驱动电压和传感电压, 可以得到传感电压取最大值时对应的正弦驱动电压值, 如图11(a)所示。升压段对应驱动电压的均值比降压段对应驱动电压的均值高0.566 V, 这可能是压电陶瓷的迟滞非线性导致的。升压段和降压段对应的驱动电压极差分别为0.041 V和0.028 V, 可能是系统电路和信号发生器的波动导致的, 该实验一定程度上能够说明反射式匹配滤波解调法的有效性和正确性。FBG中心波长和PZT驱动电压的标定曲线如图11(b)所示, 升压段和降压段对应的驱动电压经线性放大模块放大20倍后, 将电压值代入标定曲线, 即可得匹配滤波法解调出的传感光栅中心波长, 如图11(c)所示。

图11(c)中1540.3618 nm为OP-FBG500解调仪测定的传感光栅中心波长值, 以该值为传感光栅中心波长真实值。升压段和降压段解调波长均值分别为1540.3649 nm和1540.3551 nm, 与该真



(b) FBG中心波长与PZT驱动电压标定



(c) 匹配解调结果

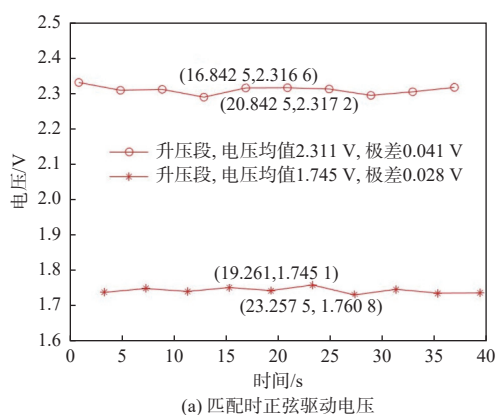
图11 希尔伯特寻峰与中心波长标定

Fig. 11 Hilbert peak-finding and center wavelength calibration

实值的最大偏差分别为5.8 pm和-8.6 pm, 波动均值分别为5.4 pm和4.6 pm。且由3.1节可知, 该系统解调范围为1540.121 nm~1541.474 nm, 综合来看, 该解调系统具备一定的参考意义与实用价值。未来可通过设计更高精度的寻峰算法或在压电堆叠上黏接多根FBG等方式提高解调系统的性能, 并研究解调系统小型化便携式方案。

4 结论

本文数值模拟了反射式匹配滤波解调法, 验证了该方法的可行性。建立了更合理的光纤-胶体-压电堆叠三层应变传递模型, 将胶体横截面形状建模为抛物线形, 理论推导了应变传递率表达式, 并通过仿真发现增大胶结宽度、胶体剪切强度、胶结长度和减小胶结层厚度, 能获得更宽的匹配光栅中心波长漂移范围, 仿真结果与理论推导结果一致。搭建了实验系统进行测试, 以OP-FBG500解调仪解调得到的波长为真实值, 该系统解调出的传感光栅中心波长最大偏差为8.6 pm, 波动均值为5.4 pm, 具备一定的参考意义与实用价值。



(a) 匹配时正弦驱动电压

参考文献:

- [1] LI C, SUN L, XU Z Q, et al. Experimental investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(6): 2040011.
- [2] SUN X, ZENG L, HU Y, et al. Fabrication and sensing application of phase shifted Bragg grating sensors[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(10): 3720.
- [3] LI C L, TANG J G, CHENG C, et al. FBG arrays for quasi-distributed sensing: a review[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 91-108.
- [4] BONOPERA M. Fiber-Bragg-grating-based displacement sensors: review of recent advances[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(16): 5561.
- [5] 张鼎博, 李俊, 张维, 等. 光纤光栅传感技术在异形结构健康监测中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 95-107.
ZHANG Dingbo, LI Jun, ZHANG Wei, et al. Application of fiber Bragg grating sensing technology in the health monitoring of special-shaped structures[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 95-107.
- [6] WANG J, LI Z, FU X, et al. Distributed temperature sensing system based on a densely spaced FBG array for small fire recognition[J]. *Measurement*, 2021, 179: 109406.
- [7] 邱野. 表面粘贴式 FBG 传感器应变传递机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
QIU Ye. Study on strain transfer mechanism of surface-mounted FBG sensor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [8] 张桂花, 柴敬, 李旭娟, 等. 基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 56-61.
ZHANG Guihua, CHAI Jing, LI Xujuan, et al. Research on strain transfer of surface fiber grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 56-61.
- [9] 吴入军, 付昆昆, 郑百林, 等. 粘贴于薄板表面的光纤布拉格光栅应变传感器误差修正[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 747-755.
WU Rujun, FU Kunkun, ZHENG Bailin, et al. Error modification of FBG strain sensors bonded on plates[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 747-755.
- [10] KUMAR S, SENGUPTA S. Efficient detection of multiple FBG wavelength peaks using matched filtering technique[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(2): 1-14.
- [11] GUO Y, YU C, NI Y, et al. Accurate demodulation algorithm for multi-peak FBG sensor based on invariant moments retrieval[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102129.
- [12] 杨熙春, 裴金成, 詹亚歌, 等. 双光栅并联匹配解调技术的工程化研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(1): 42-45.
YANG Xichun, PEI Jincheng, ZHAN Yage, et al. Study on engineering application of dual gratings parallel matched interrogation technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 42-45.
- [13] 何彦霄. 基于逆压电效应的无源光栅电压传感器及其多点传感系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
HE Yanxiao. Research on passive grating voltage sensor based on inverse piezoelectric effect and its multi-point sensing system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [14] 吕昌贵. 光纤布拉格光栅传输特性理论分析及其实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
LYU Changgui. Theoretical analysis and experimental study on transmission characteristics of fiber Bragg grating[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [15] 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1744-1750.
LI Hong, ZHU Lianqing, LIU Feng, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750.
- [16] 曾鹏, 王源, 陈飞琼, 等. 胶粘剂对表贴式聚酰亚胺光纤布拉格光栅应变传递的影响分析[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(1): 43-49.
ZENG Peng, WANG Yuan, CHEN Feiqiong, et al. Analysis of the effect of adhesives on strain transfer for surface bonded polyimide fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(1): 43-49.