

基于偏芯结构的光纤传感器的振动传感特性研究

马 林 郭新春 齐艳辉 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 提出了一种基于偏芯熔接结构的光纤振动传感器, 该传感器具有较好的梳状滤波特性和较高的消光比。通过对该结构的传感器的弯曲响应特性进行分析, 实验结果表明该传感器对弯曲变化表现出了近似线性响应的特性。在此基础上进一步研究了传感器的振动响应特性, 对传感器工作在线性响应区域和非线性响应区域的振动响应特性进行了分析和对比。实验结果表明, 该传感器在线性工作区域表现出了极好的振动响应特性, 其振动响应谱线与马赫-曾德尔型光纤干涉仪相类似。此外, 该传感器在无振动情况下的噪声极低, 具有较好的实际应用价值。

关键词 光纤光学; 偏芯熔接结构; 振动传感器; 包层模; 模式干涉

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1206007

Investigation on the Vibration Characteristic of Fiber Vibration Sensor Based on a Core-Offset Structure

Ma Lin Guo Xinchun Qi Yanhui Jian Shuisheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract An optical fiber vibration sensor based on a core-offset structure is proposed and demonstrated. This kind of fiber sensor shows a nice comb filter property and has a high extinction ratio. The curvature sensing characteristic of the core-offset structure is analyzed. The experiment results show that this kind of sensor exhibits a linear response to bending curvature. The vibration characteristic of the sensor is studied at this basic. And the vibration responses of the sensor with the input laser wavelengths located in the linear responding area and in the transmission peaks or dips are analyzed. The results show that this kind of vibration sensor exhibits a fine vibration response with the input laser wavelength located in the linear responding area, just like Mach-Zehnder fiber interferometer. In addition, the sensor shows a nice noise characteristic when there is no vibration, which means good application prospects.

Key words fiber optics; core-offset structure; vibration sensor; cladding modes; modal interference

OCIS codes 060.2300; 060.2310; 060.2370

1 引 言

振动传感器在现代社会拥有非常广泛的应用领域, 它可用于围栏的周界防护、干扰预警等防护系统; 也可用于桥梁的振动形变监测, 以检测桥梁的安全性; 还可用于高精度机械结构的稳定性测量等领

域, 有着极大的应用价值^[1-2]。基于光纤结构的振动传感器作为一种新型的振动传感器在近些年得到了广泛的重视与发展。相比于传统的振动传感器, 基于光纤结构的传感器具有重量小, 抗电磁干扰, 抗腐蚀, 不需要电信号, 易于远程监测等优点, 是未来

收稿日期: 2014-07-01; **收到修改稿日期:** 2014-08-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60837002)、国家 973 计划(2010CB328206)

作者简介: 马林(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感、可调谐光纤激光器等方面的研究。

E-mail: 11111027@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信、光交换、光纤传感以及光电子器件等方面的研究。

E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

传感器的一个非常重要的研究方向^[3-10]。目前,已经报道和实际应用的基于光纤结构的振动传感器主要包括基于光纤布拉格光栅结构、长周期光纤光栅结构和迈克耳孙干涉结构的传感器,这些类型的传感器具有光纤型传感器的优点,已在围栏周界防护、光缆预警、列车运行定位等领域发挥了极其重要的作用^[11-13]。

本文提出了一种基于光纤偏芯熔接结构的振动传感器,该传感器的结构非常简单,仅包含两个偏芯熔接点,且所用光纤全部为普通单模光纤。对该传感器的弯曲响应特性进行分析,并将该传感器应用于振动传感领域,对该传感器的振动响应特性进行了重点研究。当入射光的波长落在传感器透射光谱的线性响应区时,该传感器表现出了极好的振动响应特性,且该传感器对入射光的波长没有过多要求,因此比光纤光栅型传感器更为实用。

2 偏芯熔接光传输理论

图1为基于偏芯熔接结构的光纤振动传感器的结构示意图,该结构的光纤传感器有两个偏芯熔接点,光在第一个偏芯熔接点(COJ_1)处分为两束,一束在包层中传输,即包层模,另一束在纤芯中传输,即纤芯模。在第二个偏芯熔接点(COJ_2)处,包层模和纤芯模发生干涉^[14-15],并重新耦合回纤芯。

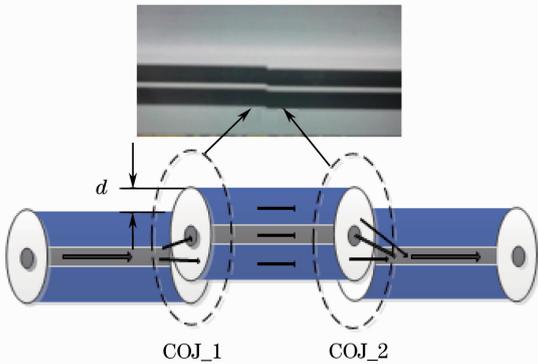


图1 基于偏芯熔接结构的光纤振动传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber vibration sensor based on the core-offset structure

因为纤芯和包层的有效折射率不同,在纤芯和包层中传输的两束光在经过一定距离的传输后会引入光程差,因此在透射光谱中可观察到相应的波峰和波谷。输出端的光功率 I 可表示为^[16-17]

$$I = I_{co} + \sum_i I_{cl}^i + 2 \sum_i \sqrt{I_{co} I_{cl}^i} \cos(2\pi\Delta nL/\lambda), \quad (1)$$

式中 I_{co} 表示芯模的光能量, I_{cl}^i 表示第 i 阶包层模的光能量, $\Delta n = \sum_i (n_{co} - n_{cl}^i)$ 表示芯模与各阶包层模的有效折射率差的叠加, λ 为入射光的波长, L 为传感器的两个偏芯熔接点之间的光纤长度。由(1)式可以看出,当 $\cos(2\pi\Delta nL/\lambda) = -1$ 时,传感器的输出光能量出现一个极小值点,对应波长位置将出现一个下陷峰。此时,纤芯模和包层模的相位差为 $(2k + 1)\pi$, 即

$$2\pi\Delta nL/\lambda = (2k + 1)\pi, \quad (2)$$

从(2)式可得出传感器输出光谱的下陷峰波长为

$$\lambda = 2\Delta nL/(2k + 1), \quad (3)$$

式中 k 为大于等于零的整数。

当传感器的弯曲曲率发生变化或是传感器发生振动时,光纤纤芯和包层的有效折射率会发生相应的变化,进而导致包层模和纤芯模之间光程差的改变,从而引起传感器透射谱的漂移。利用传感器的这个特性即可对弯曲和振动进行测量。由弯曲或振动引起的透射谱波长漂移量 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = 2\delta nL/(2k + 1), \quad (4)$$

式中 δn 表示由光纤弯曲形变或传感器振动引起的纤芯和包层有效折射率差的变化量。通过对传感器的透射光谱或输出光功率进行测量可以实现对光纤的弯曲或振动的探测,进而达到传感的目的。

3 弯曲响应

对偏芯结构传感器的弯曲响应特性进行研究的实验装置如图2所示,实验中,制作的偏芯熔接光纤传感器的两个偏芯熔接点的偏移量约为 $7 \mu\text{m}$, 两偏芯熔接点之间的光纤长度为 63.8 mm 。需要说明的是,偏芯熔接点的制作是通过光纤熔接机调节熔接参数实现的,熔接过程中,为了防止因熔接机放电电流过大对熔接点的光纤波导结构造成破坏,需要调整熔接机的熔接电流。在保证光纤有效熔接的前提下,减小熔接电流,以防止熔接温度过高,对光纤的纤芯结构造成破坏,影响干涉效果。

为了对该传感器的弯曲响应进行测量,将传感器固定于一个一维调节平台上,该平台上有两个微位移调节架(FH_1 和 FH_2),可在横向上对传感器的弯曲曲率进行精确调节。入射端为一宽带光源(BBS),输出端与光谱仪(OSA)相连,来对传感器的输出光谱进行测量。实验中,所用的传感器的长度为 63.8 mm , 对应的输出光谱如图3所示。

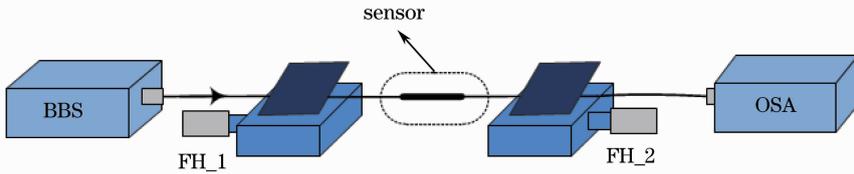


图 2 偏芯熔接光纤传感器的弯曲响应实验装置图

Fig. 2 Experiment setup for curvature measurement by fiber sensor based on the core-offset structure

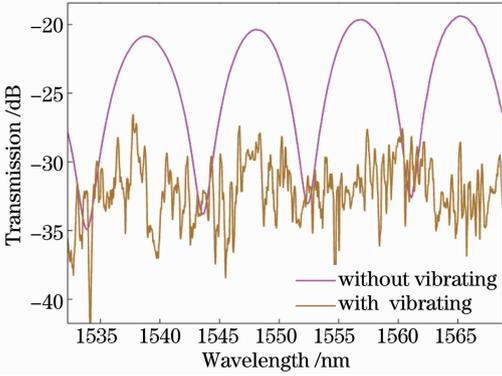


图 3 传感器在没有振动(橘红色)和有振动(橙色)情况下的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of the sensor with/without vibration

式即可得到传感器的弯曲半径,进而得出弯曲曲率。

实验结果表明,在不同的弯曲曲率条件下,传感器的透射光谱会发生漂移,且随着曲率的增加,波长往短波长方向漂移。实验测得传感器的弯曲响应如图 5 所示。

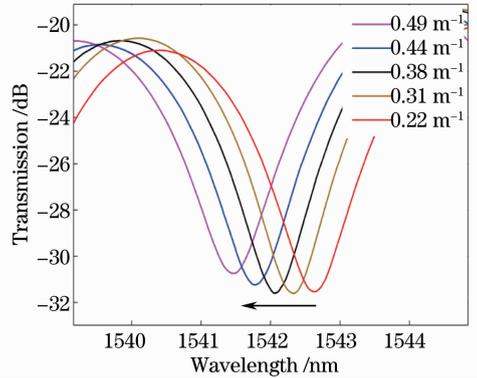


图 5 在不同弯曲曲率条件下,传感器的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra with different bending curvatures

为了得到传感器透射谱的弯曲响应特性,对传感器的弯曲曲率进行调节。实验中,将左侧的微位移调节架往右进行调节,调节间隔为 20 μm。两微位移调节架之间的初始间距为 215 mm。通过计算位移平台的调节量,可以得到传感器相应的弯曲曲率^[18]。如图 4 所示,传感器弯曲半径与位移量的关系可表示为

$$R \sin \frac{l}{2R} = \frac{l - \Delta l}{2}, \quad (5)$$

式中 l 表示两个微位移调节架之间的初始间距,即 215 mm, Δl 表示微位移平台的位移量, θ 表示由传感器弯曲引起的夹角, R 表示弯曲半径。通过计算(5)

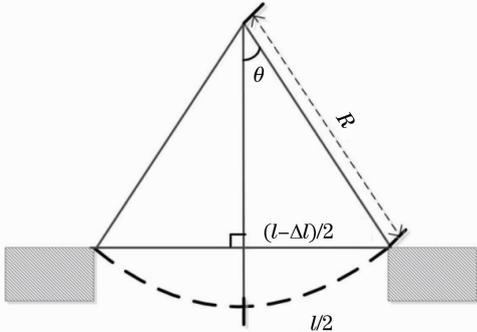


图 4 传感器弯曲半径与调节架位移量的关系

Fig. 4 Relationship between the curvature and displacement

图 6 为传感器透射谱漂移量与曲率之间关系,由图中可以看出,基于偏芯结构的传感器对弯曲有较好的响应特性,其弯曲灵敏度可达 -5.44 nm/m^{-1} 。由此可见,通过对传感器曲率的调节,可以对透射谱进行调整。

为了验证传感器的振动响应特性,对传感器在振动情况下的透射谱进行了探测。实验中,传感器

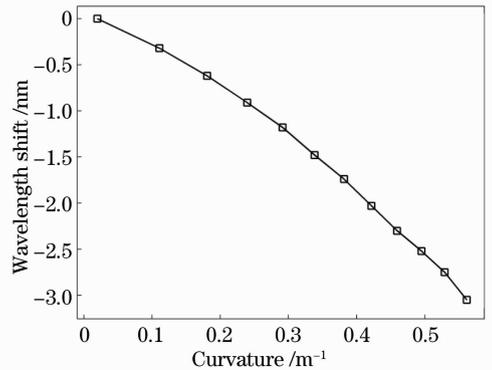


图 6 传感器的波长漂移量与曲率的关系

Fig. 6 Relationship between the wavelength shift and curvature

的振动是通过细铁棒敲击实现的。在没有振动和有振动两种情况下,由光谱仪测得的透射谱如图 3 所示。从图 3 中可以看出,在没有振动情况下,传感器输出光谱为较好的梳状谱,当传感器发生振动时,输出光谱发生急剧变化,输出光谱发生不规则抖动。由此可以看出,该传感器可用于进行振动探测,当传感器发生振动时,由于透射光谱的抖动,输出光功率也将发生抖动,进而对振动进行探测。

4 振动响应实验

基于上述实验,对该传感器的振动响应进行测试。实验装置如图 7 所示,实验中,入射光为一功率可调的固定波长激光器(laser),输出端与光电探测器(PD)相连,对传感器的输出信号进行探测,最后将探测信号通过数据采集卡(DAQ)采集到电脑中进行数据处理。

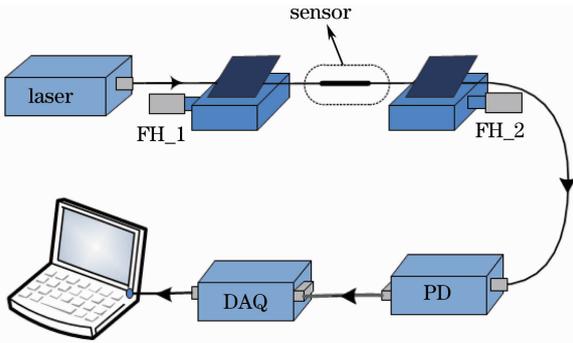


图 7 振动响应实验装置图

Fig. 7 Schematic diagram of the vibration experiment setup

为了得到较好的振动响应特性,需要先对传感器的输出光谱进行调节,通过调整弯曲半径,使入射光波长位于传感器的线性工作区域,如图 8 所示。图中箭头表示激光器波长位置,黑色实线表示激光器工作在传感器的透射谱的线性工作区域,黑色虚线表示激光器工作在传感器的透射峰区域。实验中为了使传感器具有较好的振动特性,将传感器固定于一个弹性钢片上,通过敲击钢片,使钢片振动,进一步带动传感器振动。当对传感器进行敲击时,传感器的输出光谱会发生变化,进而引起输出光功率的变化,从而达到对振动进行监测的目的。

当对传感器进行振动测试之前,需要先对传感器的输出谱进行调整,以保证入射的激光器波长落在传感器透射光谱的线性区域,从而保证实验效果。为了实现这一目的,先用光功率计对传感器输出端进行功率检测,通过调节微位移平台,改变传感器的

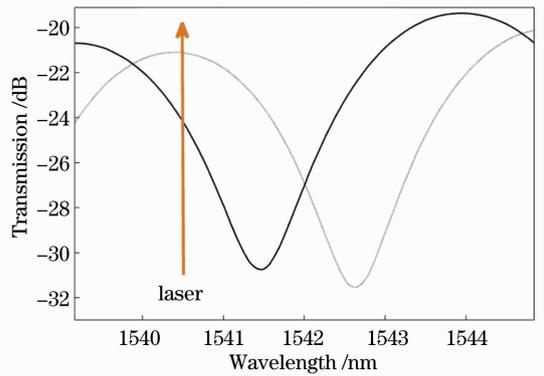


图 8 激光器波长在传感器透射谱的位置

Fig. 8 Positions of the input laser wavelength in the transmission spectrum of sensor

弯曲半径,对输出光谱进行调整。通过对光功率的监测,可以确定入射激光器波长是否位于线性区域。因为传感器的输出光谱近似为梳状谱,在一个波峰波谷范围内,调节弯曲半径,光谱会发生相应漂移,当功率计显示功率达到一个极大值时,说明入射激光器波长位于传感器的波峰处,此处损耗最小,输出功率最大。继续调节微位移平台,光谱继续发生漂移,入射波长也随之向传感器线性区域移动。继续调节微位移平台,光谱进一步漂移,使入射波长落于传感器的波谷位置,此时损耗最大,光功率计显示功率出现一个极小值,再往回调节微位移平台,使输出光功率位于极大值和极小值中间,此时入射激光器波长即位于传感器输出谱线性区域的中间。

实验中,通过调节微位移平台,测得传感器输出光功率的前后两个临近的极大值和极小值分别为 -2.3 dBm 和 -13.2 dBm,即此处传感器的消光比约为 11 dB。调节微位移平台,使入射波长位于线性区域的中间,即输出光功率约为 -8 dBm。将输出端与探测器相连,并用采集卡对输出信号进行采集。考虑到一般敲击振动信号的频率在 1 kHz 左右,最大一般也不会超过 5 kHz,因此将采集卡采样频率设定为 15 kHz,以保证采样率。在无外界干扰情况下,探测器输出波形如图 9(a)所示,由图 9(a)可以看出,此传感器的噪声情况非常好,几乎没有噪声,这也为后面的传感器振动响应实验提供了非常好的前提。为了进一步测试外界干扰的影响,用风扇对着传感器进行扇风,使传感器有一个轻微的晃动,输出波形如图 9(b)所示。从图中可以看出,在轻微晃动情况下,传感器的输出波形并没有太明显的扰动,只有轻微的信号波动。这表明该传感器对轻微的晃动不敏感,这也有利于排出外界轻微晃动的干扰。

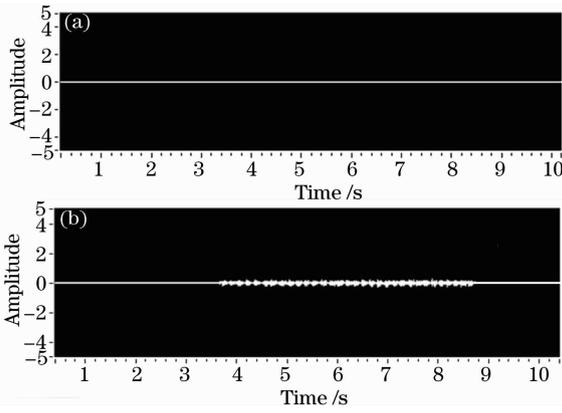


图 9 传感器的输出信号波形。(a)没有振动；
(b)轻微晃动

Fig. 9 Output signal waveforms of the sensor.
(a) Without vibration; (b) with slight vibration

为了测试在敲击情况下的振动响应,当用细铁棒对传感器进行敲击,在弹性钢片的带动下,传感器有一个富有规律的振动,探测器输出波形也随之发生变化,探测器输出波形如图 10(a)所示。由图可以看出,传感器的振动响应非常敏感,响应信号波形与马赫-曾德尔型(M-Z)传感器相似。同时,由图 10(a)还可看出,在没有敲击情况下,传感器的噪声非常小,近似为零,表明该传感器具有非常好的信噪比。为了得到图 10(a)中振动信号的频谱特性,对振动信号进行傅里叶变换,得到其对应的频谱图,如图 10(b)所示。从图中可以看出,在敲击振动条件下,传感器的振动频率响应具有一定的宽度,在 100~2000 Hz 范围内均有响应,且频率响应最高点在 500 Hz 附近。

为了进一步检验该类型光纤振动传感器的振动响应特性,又制作了两个不同长度的传感器,并按上

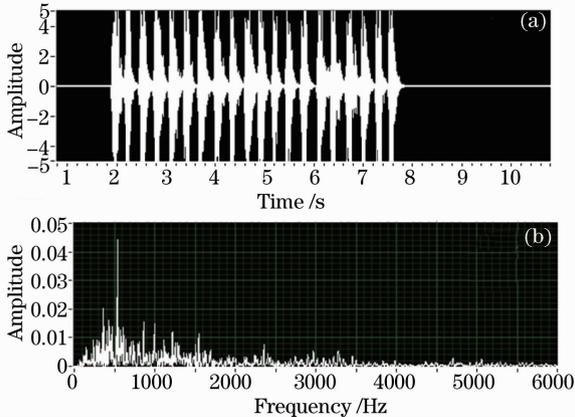


图 10 在振动情况下,传感器的(a)输出信号波形和
(b)对应的频谱

Fig. 10 (a) Output single waveform and (b) frequency spectrum of the sensor with vibration

述步骤对其振动响应进行了测试。传感器的长度分别为 98.9 mm 和 161 mm,对应透射谱的消光比分别为 13 dB 和 12 dB。在相同的振动条件下测试其振动响应,实验结果如图 11 所示,其中图 11(a)对应的传感器长度为 98.9 mm,图 11(b)对应为 161 mm。由图 11 可以看出,这两个长度的传感器对振动均表现出了非常好的响应特性,探测器输出波形与前面实验基本一致。此实验结果表明,基于光纤偏芯熔接结构的光纤振动传感器对振动响应具有极好的一致性和可重复性,这就为其实际应用提供了条件。同时,为了测量冲击振动信号的频谱,对上述两种振动信号进行频谱分析,如图 12 所示,其中图 12(a)对应的传感器长度为 98.9 mm,图 12(b)对应为 161 mm。结果表明,振动信号在 100~2000 Hz 范围内均有不同程度的响应,而在 500 Hz 附近达到最大值,这也与前面的实验结果相一致。

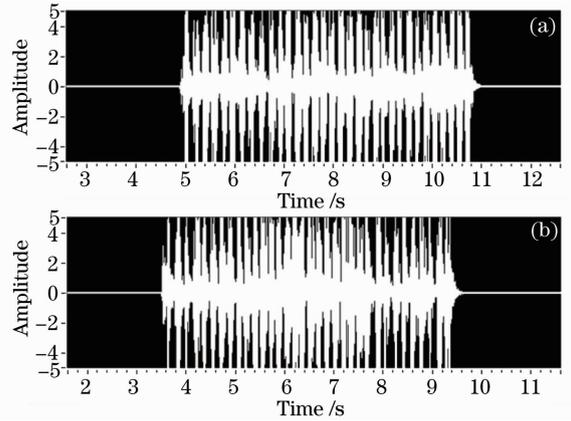


图 11 不同长度的传感器的振动响应。(a) $L=98.9$ mm;
(b) $L=161$ mm

Fig. 11 Vibration responses of the sensor with different fiber lengths. (a) $L=98.9$ mm; (b) $L=161$ mm

为了更全面地测试传感器的振动响应特性,对传感器非线性工作区域(波峰或波谷)的振动响应进行了分析。在此实验中,选择长度为 63.8 mm 的传感器进行实验。通过调节位移平台,使入射波长处于波峰或波谷的位置。同时,考虑到传感器的振动响应会受到入射光功率的影响,为了更准确地分析传感器在不同光谱位置处的响应特性,调节激光器的入射光功率,使进入到探测器的光功率与前面实验保持一致,即 -8 dBm 左右,并在相同的振动条件下,对输出信号进行探测。传感器在波峰和波谷位置处的输出波形图如图 13 所示。由图可见,在波峰和波谷位置处的响应明显弱于线性区域,这也与理论相符。

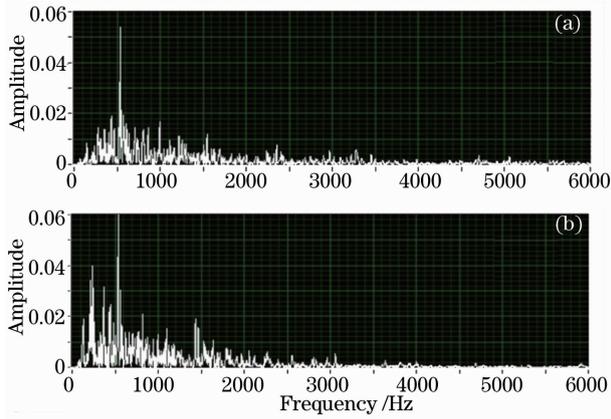


图 12 不同长度的传感器的振动信号的频谱。

(a) $L=98.9$ mm; (b) $L=161$ mm

Fig. 12 Frequency spectra of the sensor with different fiber lengths. (a) $L=98.9$ mm; (b) $L=161$ mm

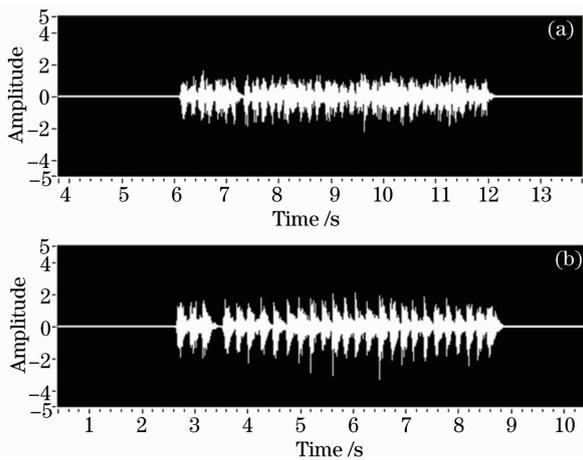


图 13 传感器在(a)波峰和(b)波谷位置处的振动响应

Fig. 13 Vibration responses in the transmission (a) peak and (b) dip

5 结 论

通过上述实验结果可以看出,基于偏芯熔接结构的光纤振动传感器具有极好的振动响应特性,且通过对比不同长度的传感器的响应特性发现,传感器的振动响应特性与传感器的长度没有太大关系,但与入射光波长所在的传感器透射谱工作区域有关。当调节传感器的弯曲曲率,使入射光落在传感器的线性工作区域时,传感器的振动响应最好;当入射光波长落在波峰或是波谷位置时,振动响应变差。此外,由于传感器具有良好的弯曲响应特性,可以通过调节弯曲曲率来对透射谱进行调整,进而达到最佳传感效果,这也使得该传感器对入射光的波长不挑剔,增强了实用性。另外,该传感器还表现出了良好的噪声特性,在无振动或外界轻微晃动的情况下,

传感器基本没有噪声,但对较强的振动却具有极好的响应特性,有极好的信噪比,这也增强了对外界振动信号的识别性。

参 考 文 献

- Jia Zhen'an, Fu Haiwei, Ying Xudong, *et al.*. High-accuracy quasi-distributed optical fiber Bragg grating seismic demodulation system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074221.
贾振安, 傅海威, 营旭东, 等. 高精度准分布式光纤光栅地震地波解调系统的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074221.
- Wang Hongliang, Chen Jiaomin, Fan Wei, *et al.*. Characteristics of low-frequency vibration FBG sensor [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(6): 1023–1030.
王宏亮, 陈娇敏, 樊伟, 等. 光纤 Bragg 光栅低频振动传感器的特性研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(6): 1023–1030.
- Dong Xinyong, Zhao Chunliu, Ning Ding, *et al.*. Temperature-independent bend sensor using chirp effect of fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(4): 425–428.
董新永, 赵春柳, 宁鼎, 等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的弯曲传感[J]. *光子学报*, 2001, 30(4): 425–428.
- Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Long period fiber grating sensors measuring bend-curvature and determining bend-direction simultaneously [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(10): 1139–1143.
王义平, 陈建平, 饶云江. 同时测量弯曲曲率和弯曲方向的长周期光纤光栅传感器[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(10): 1139–1143.
- Jiang Zongfu, Xi Fengjie, Xu Xiaojun, *et al.*. Theory and applications of defocus grating wavefront curvature sensing [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 205–210.
姜宗福, 习锋杰, 许晓军, 等. 光栅型波前曲率传感器原理和应用[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 205–210.
- Tong Zhenrong, Wang Jieyu, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain based on core diameter mismatch and fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1206001.
童峥嵘, 王洁玉, 杨秀峰, 等. 基于纤芯失配和光纤布拉格光栅实现温度和应变同时测量[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1206001.
- Chen Yaofei, Han Qun, He Yang, *et al.*. Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0905001.
陈耀飞, 韩群, 何洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905001.
- Fu Lihui, Yin Wenqing. Investigation on on-line optical fiber surface plasma resonance sensors based on frequency modulation spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612004.
付丽辉, 尹文庆. 基于调频光谱原理的在线式表面等离子体共振光纤传感器[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612004.
- Wang Wenyan, Wen Jianxiang, Pang Fufei, *et al.*. All single-mode fiber Fabry-Perot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1005001.
王文轶, 文建湘, 庞拂飞, 等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1005001.
- Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628001.
赵华新, 蒋永翔, 罗天穹, 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628001.
- M L Filograno, P Corredera Guillen, A Rodriguez-Barrios, *et al.*. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg

- grating sensors [J]. *IEEE Sens J*, 2012, 12(1): 85–92.
- 12 Sun Qizhen, Liu Deming, Wang Jian. A novel ring structure-based distributed optical fiber vibration sensing system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5903–5908.
孙琪真, 刘德明, 王 健. 基于环结构的新型分布式光纤振动传感系统[J]. *物理学报*, 2007, 56(10): 5903–5908.
- 13 Jiang Yi, Huang Junbin. Wavelength division multiplex based on fiber optical vibration sensor array [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(11): 1525–1528.
江 毅, 黄俊斌. 基于波分复用器的光纤光栅振动传感器阵列[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1525–1528.
- 14 W C Wong, C C Chang, Y F Zhang, *et al.*. Miniature single-mode fiber refractive index interferometer sensor based on high order cladding mode and core-offset [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(5): 359–361.
- 15 J Chen, J Zhou, Z Jia. High-sensitivity displacement sensor based on a bent fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(23): 2354–2357.
- 16 J Chen, J Zhou, Q Zhang, *et al.*. All-fiber modal interferometer based on a joint-taper-joint fiber structure for refractive index sensing with high sensitivity [J]. *IEEE Sens J*, 2013, 13(7): 2780–2785.
- 17 Z Bai, W Zhang, S Gao, *et al.*. Compact long period fiber grating based on periodic micro-core-offset [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(21): 2111–2114.
- 18 Y Gong, T Zhao, Y J Rao, *et al.*. All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(11): 679–681.

栏目编辑：王晓球