

# 分布式全光纤微振动传感器研究

韩 屏<sup>1,2</sup> 谢涌泉<sup>2</sup> 刘 阳<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070; <sup>2</sup> 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 振动主动控制是消除干扰和提高机械加工精度的主要手段之一。振动主动控制的前提是对频率在 5 kHz 以上微振动信号进行准确测量。针对现有光纤光栅传感器在测量高频微振动信号上存在的频率低、结构复杂、无法分布式测量等不足,采用频率调制连续波(FMCW)技术结合光强度调制,设计了一种全光纤分布式微振传感器,并通过压电换能器(PZT)微振测量实验和仿真对传感器的性能进行验证,能够分布式测量频率最高为 60 kHz 的微振动信号。

**关键词** 光纤光学; 全光纤微振动传感器; 频率调制连续波; 光强度调制

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0305004

## Research of All-Fiber Micro-Vibration Multiplexing Sensors

Han Ping<sup>1,2</sup> Xie Yongquan<sup>2</sup> Liu Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430070, China

<sup>2</sup> School of Information and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** Vibration active control is one kind of main methods to eliminate interference and improve machining accuracy. The premise of vibration active control is the precise measurement of micro-vibration signal whose frequency is upper 5 kHz. A full-fiber micro-vibration distributed sensor is designed using frequency modulated consecutive wave (FMCW) and light intensity modulation technology, aiming at the shortage of existing grating sensor used for micro-vibration signal measurement, such as low frequency, complex structure and individual measurement etc. Through piezoelectric transducer (PZT) micro-vibration measuring experiment and simulation, it can prove that top frequency of 60 kHz for distributed measurement is achieved.

**Key words** fiber optics; all-fiber micro-vibration sensor; frequency modulated consecutive wave; optical intensity demodulation

**OCIS codes** 060.2370; 060.1155; 060.4230

## 1 引 言

高精度数控机床的加工精度可以达到微米量级,但其进给、主轴、切削等部件在工作过程中都会受到各种振动信号的干扰,导致加工精度降低。因此,必须设法降低机床工作过程中的振动。目前,振动主动控制为解决低频振动与噪声的隔离提供了有效手段。振动主动控制是指用控制系统来抑制机械振动,是根据被控系统的动态特性,采取由外部输入能量的控制方法使被控系统实现减振。

振动主动控制的关键在于确保传感器对振动信号测量的准确性。由于光纤传感器具有无源、抗干

扰能力强、精度高等优点,被广泛应用于振动测量。已有的光纤振动传感器可以分成相位调制型、波长调制型、强度调制型、偏振态调制型和模式调制型等。其中相位调制型的代表有:迈克耳孙干涉仪振动传感器、马赫-曾德尔(M-Z)型光纤振动传感器、迈克耳孙干涉式水听器、法布里-珀罗(F-P)型光纤振动传感器<sup>[1-3]</sup>,该类型传感器无法进行分布式测量;波长调制型的代表有:光纤布拉格光栅<sup>[4-5]</sup>,由于受到解调设备的限制,其测量频率低;强度调制型的代表有:光纤悬臂梁结构、自聚焦透镜的光纤振动传感器<sup>[6]</sup>;基于光弹效应的偏振型光纤振动传感

**收稿日期**: 2013-09-03; **收到修改稿日期**: 2013-10-23

**基金项目**: 国家自然科学基金(51175389, 50935005)、教育部科学技术研究重大项目(313042)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013-VII-001)

**作者简介**: 韩 屏(1980—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: hanping@whut.edu.cn

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

器<sup>[7]</sup>;模式调制型的光纤振动传感<sup>[8-9]</sup>等,以上几种类型的传感器,结构比较复杂、稳定性差,无法适应机械领域的应用。

以上各类光纤振动传感器,由于自身存在的不足,无法满足振动主动控制的需要。本文将干涉型光纤振动传感器与频率调制连续波(FMCW)和光强度调制技术相结合,提出了一种分布式全光纤微振传感器,能够实现对精密机械的进给、主轴、切削等部件的振动信号进行精确的分布式测量,为振动主动控制提供了依据。

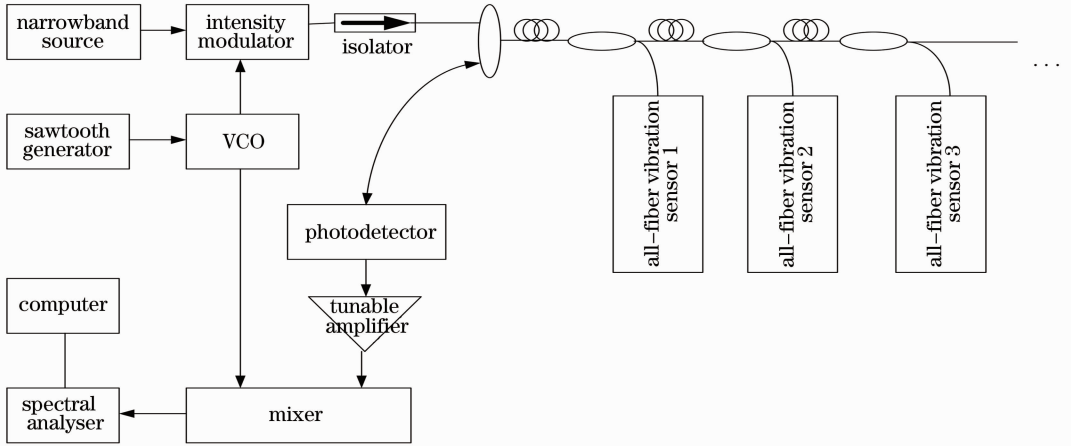


图 1 传感器系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of sensing system

在锯齿波调制的 FMCW 系统中<sup>[10-11]</sup>,锯齿波的频率范围从  $f_0$  到  $f_0 + B$ ,  $B$  为频移,锯齿波周期为  $T$ ,则 VCO 的瞬时输出频率为

$$f_T(t) = f_0 + B \frac{t}{T}, \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

瞬时相位为

$$\varphi_T(t) = 2\pi \int_0^t f_T(\tau) d\tau + \varphi_0, \quad 0 < t < T, \quad (2)$$

因此 VCO 的输出为

$$v_{VCO}(t) = v_0 \cos \varphi_T(t), \quad (3)$$

式中  $v_0$  是输出电压的峰值,该输出信号驱动强度调制器对光源进行调制。

假设激光器输出光强度恒定,用  $I_0$  表示,则输出的调制光信号为

$$I_T(t) = I_0 \left[ 1 + k_m \cos \left( \frac{\pi B}{T} t^2 + 2\pi f_0 t + \varphi_0 \right) \right], \quad 0 < t < T, \quad (4)$$

式中  $k_m$  为强度调制信号。使用压电换能器(PZT)将每一路传感器的初始相位差调零。当检测到振动信号,每个传感器的干涉信号的反射强度为

## 2 传感系统理论分析

本文设计的分布式全光纤微振传感器系统的结构如图 1 所示,锯齿波发生器驱动压控振荡器(VCO),VCO 产生振荡信号,一方面驱动强度调制器对窄带光源进行调制,另一方面将参考信号和反射回来的微振传感器信号进行混频。由于每个微振传感器的反射信号和参考信号之间有时延,在混频的过程中会产生拍频。拍频的值与频移和传感器到调制器间的距离成比例,进而根据拍频值就能够对各个分布式传感器的光谱信号进行区分。

$$I_i(t) = a_i R_i I_0 [1 + k_m \cos \varphi_T(t - 2\tau_i)] \times (1 + \cos \Delta\varphi_i),$$

$$2\tau_i < t < T + 2\tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

式中  $a_i$  光纤衰减系数,  $R_i$  是光分割器的分割比,  $N$  是传感器的个数,  $\tau_i$  是时延,  $\Delta\varphi_i = \frac{2\pi n}{\lambda} r_i$  是光相位差,  $n$  是折射率,  $\lambda$  是激光器的中心波长。反射光信号经过耦合器后,有一半的光强被光电探测器获取并转换为电压信号。为了获得拍频信号,转换后的电压信号需要和 VCO 产生的参考波形进行混频,混频信号可以表示为

$$v_{mix}(t) = v(t) \cdot v_{VCO}(t) = 0.5\alpha I_0 v_0 \cos \varphi_T(t) \times \sum_{i=1}^N a_i R_i [1 + k_m \cos \varphi_T(t - 2\tau_i)] (1 + \cos \Delta\varphi_i), \quad 2\tau_i < t < T + 2\tau_i, \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为光电转换效率,  $v(t)$  为转换后的电压信号,  $\Delta\varphi_i$  是由频率远高于参考信号的微振信号导致的,因此混频信号中包含高频和低频信号成分。

第  $i$  个微振传感器与调制器之间的光纤长度定义为  $L_i$ ,则  $\tau_i$  表达式为

$$\tau_i = nL_i/c, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

式中  $c$  是真空中光速。相应地,每个传感器的拍频为

$$f_i = \frac{B}{T} 2\tau_i = \frac{2nL_i B}{Tc}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

令振动信号频率的峰值为  $f_v$ ,在频域每个传感器检测到的微振信号的频谱在  $f_i$  附近移动。然而,考虑低通和带通滤波器的限制,频带  $\delta$  必须在邻近拍信号之间,因此第  $i$  个传感器占用的光谱范围为  $[f_i - 0.5\delta, f_i + 0.5\delta]$ ,同时,  $\delta$  为

$$\delta = f_i - f_{i-1} = \frac{2n\Delta L_{i-1} B}{Tc}, \quad i = 2, 3, \dots, N, \quad (9)$$

式中  $\Delta L_{i-1}$  是 2 个相邻传感器间的光纤长度,其推导式为

$$\Delta L_{i-1} = \frac{\delta Tc}{2nB}, \quad i = 2, 3, \dots, N. \quad (10)$$

(10) 式给出了多传感器系统的空间分辨率表达式,可以通过扩大频移  $B$  或降低锯齿波周期  $T$  来提高空间分辨率。理论上,多传感器系统中的传感器个数可以表示为

$$N = (f_0 - \delta) / \delta. \quad (11)$$

理想情况下,当  $\delta = 2f_v$  时  $N$  达到最大。实际中,  $\delta_{\text{beat}}$  通常比  $2f_v$  大很多,并且由于混频电路的限制

$f_N$  不能达到非常大,因此传感器个数不能太多。

### 3 传感器结构

借鉴迈克耳孙干涉仪原理设计的全光纤微振传感器如图 2 所示。传感器构成原理如图 2(a) 所示,质量块上下各有一个弹性柱体,在每个弹性柱体上分别缠绕一根光纤,并且在光纤的一端镀反射膜使光束反射。2 个弹性柱体上光纤反射的信号在 3 dB 耦合器处发生干涉。实物如图 2(b) 所示,上下两块铝板间,安装一个金属质地的质量块  $M$  和 2 个由橡胶制成的弹性柱体,铝板用 4 个螺丝固定。在 2 个弹性柱体上分别缠绕单模光纤。弹性柱体直径和光纤缠绕圈数的选取,取决于缠绕所引起的光衰减和传感器对振动量的灵敏度。由于 2 个弹性柱体和其上缠绕的光纤对称放置,受到温度变化的影响对称且相互抵消,故传感器不受温度影响。传感器的具体参数如表 1 所示,表中  $L'$  为单个柱体上的光纤长度,  $E$  为未缠光纤体的杨氏模量,  $H$  为弹性柱体的直径,  $N'$  为单个柱体光纤的缠绕圈数,  $n$  为单模光纤的折射率,  $M$  为中心质量块的质量,  $\lambda_0$  为光源中心波长,  $D$  为光源 3 dB 的带宽。

表 1 传感器参数规格

Table 1 Specific parameters of sensor

Parameter	$L' / \text{m}$	$E / \text{mPa}$	$H / \text{mm}$	$N'$	$n$	$M / \text{g}$	$\lambda_0 / \text{nm}$	$D / \text{nm}$
Value	7.4104	3.75	40	59	1.456	70.2	1560	0.0124

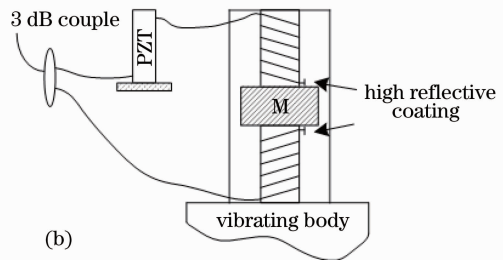
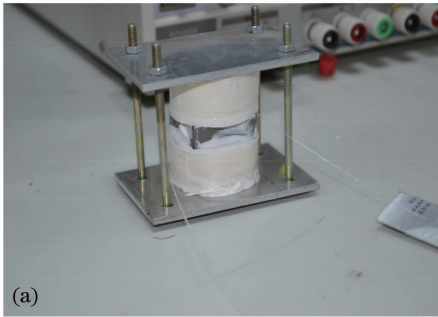


图 2 微振动传感头。(a) 实物图; (b) 结构原理图

Fig. 2 Micro-vibration sensors. (a) Figure of material object; (b) structure chart

### 4 实验和仿真

进行传感器振动测量实验的环境构成如图 3 所示。用信号发生器和 PZT (PZT 的位移量为微米量级) 作为激励源产生幅值、频率各不相同的振动信号,传感器输出的干涉光信号通过光电转换、放大和除噪电路后输出给示波器进行观察。

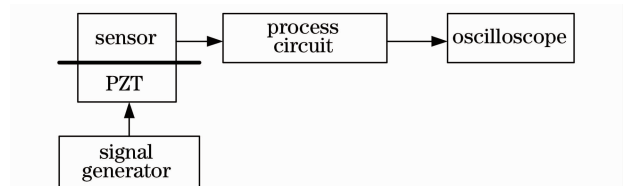


图 3 实验环境图

Fig. 3 Experimental environment

针对传感器所能检测到的微振信号的频率范围进行测试。在改变振动频率的情况下,传感器所能输出的最佳波形的时域和频域图形如图 4~8 所示。

图(a)中的绿色波形为信号源给出的激励信号,粉红色波形为传感器的测量信号;图(b)是经过快速傅里叶变换(FFT)变换后的频域信号。

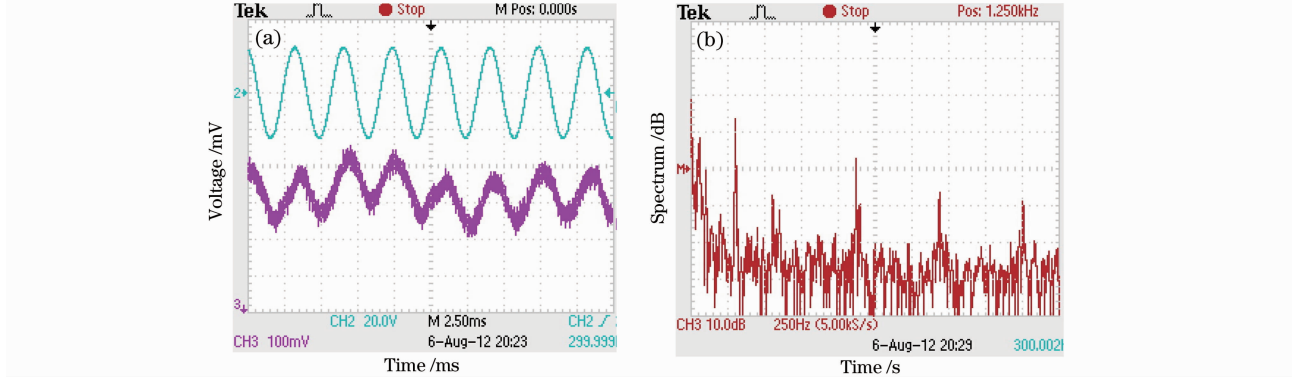


图 4 微振源  $f=300$  Hz 时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 4 Signal comes from 300 Hz micro-vibration source. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

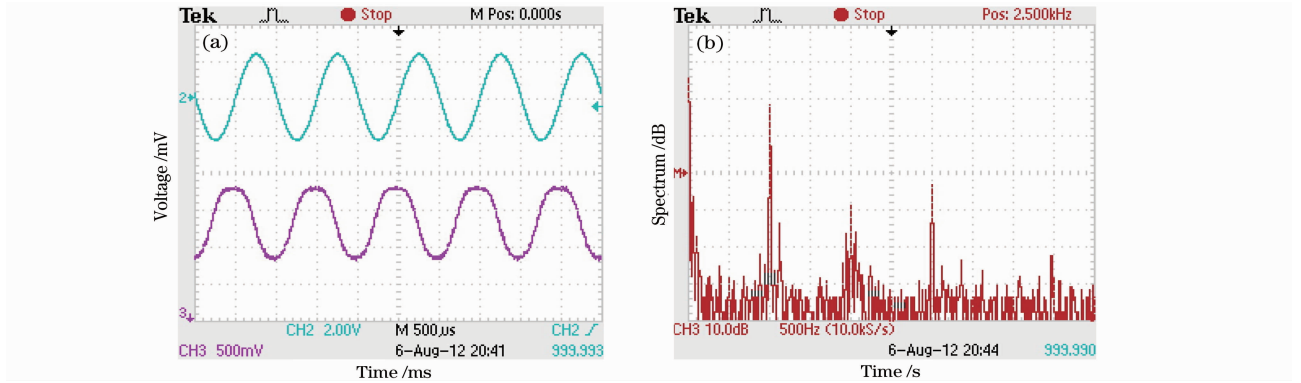


图 5 微振源  $f=1000$  Hz 时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 5 Signal comes from 1000 Hz micro-vibration source. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

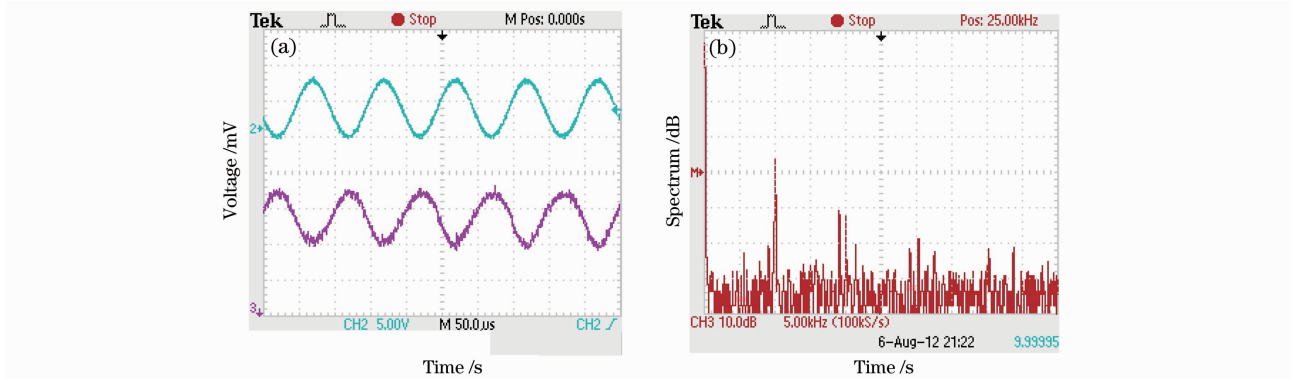


图 6 微振源  $f=10$  kHz 时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 6 Signal comes from 10 kHz micro-vibration source. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

针对微振信号振幅对传感器输出结果的影响进行如下实验,结果如图 9~12 所示。在信号发生器激励频率一定,激励幅度  $V$  改变的情况下,系统输出波形的时域和频域图形。图(a)中的绿色波形为信号源给出的激励信号,粉红色波形为传感器的测

量信号;图(b)是经过 FFT 变换后的频域信号。图 9 和图 10 所示,传感器基本可以测量激励振幅在 2 V 以内的振动信号。出现图 11 和图 12 中所示现象的原因是因为激励振幅量过大,在中心质量块振动 1/4 个周期的过程中,可能已经经过了干涉过程

的几个级别的峰值,从而在振动信号的 1/4 个周期

中,系统输出信号形成几个振荡波。

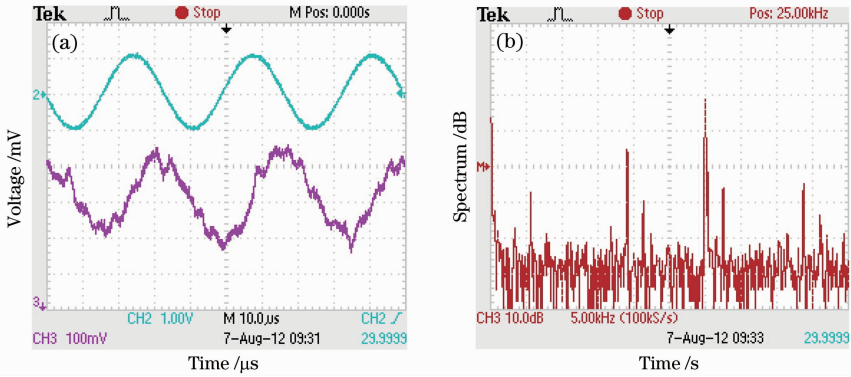


图 7 微振源  $f=30\text{ kHz}$  时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 7 Signal comes from 30 kHz micro-vibration source, (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

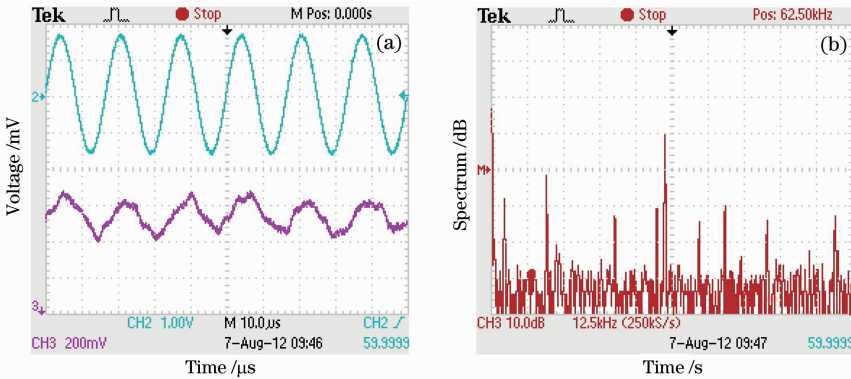


图 8 微振源  $f=60\text{ kHz}$  时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 8 Signal comes from 60 kHz micro-vibration source, (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

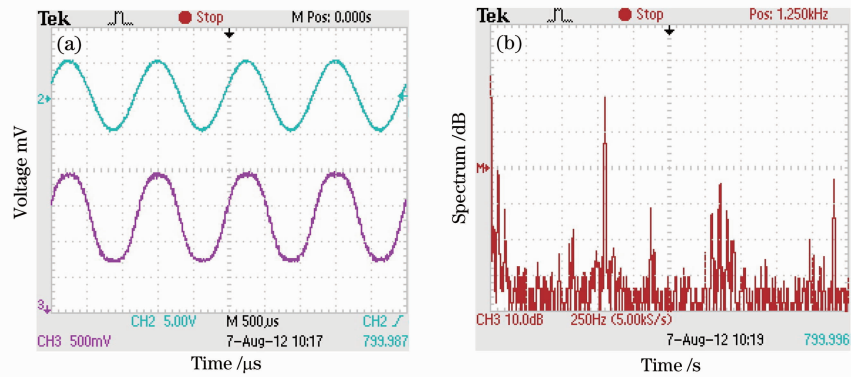


图 9 激励源  $f=800\text{ Hz}$ ,  $V=1\text{ V}$  时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 9 Signal comes from excitation source when frequency is 800 Hz and amplitude is 1 V. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

为了便于直观说明,采用 Matlab 对传感器的分布式测量结果进行仿真。仿真参数为:  $T=2 \times 10^{-4}\text{ s}$ ,  $f_0=3\text{ MHz}$ ,  $B=3\text{ MHz}$ ,  $L_1=273.97\text{ m}$ ,  $L_2=376.91\text{ m}$ ,  $L_3=684.93\text{ m}$ ,  $\delta=15\text{ kHz}$ ,  $T=2 \times 10^{-4}\text{ s}$ 。模拟的振动信号是频率分别为  $f_{v1}=1\text{ kHz}$ ,  $f_{v2}=1.5\text{ kHz}$ ,  $f_{v3}=2\text{ kHz}$  的正弦波。如图 13 所示,仿真结果表明,

代表 3 个分布式传感器的 3 个拍频信号分别为 40、55、100 kHz,分别对应  $L_1=273.97\text{ m}$ ,  $L_2=376.91\text{ m}$ ,  $L_3=684.93\text{ m}$  这 3 个位置上的传感器。同时,在每个拍频信号峰值为中心的  $f_v=2\text{ kHz}$  范围内,可以看到微振信号的频谱。



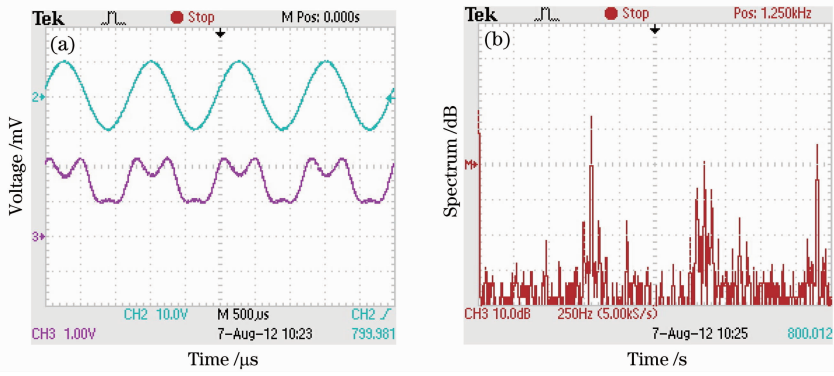


图 10 激励源  $f=800\text{ Hz}$ ,  $V=2\text{ V}$  时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 10 Signal comes from excitation source when frequency is 800 Hz and amplitude is 2 V. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

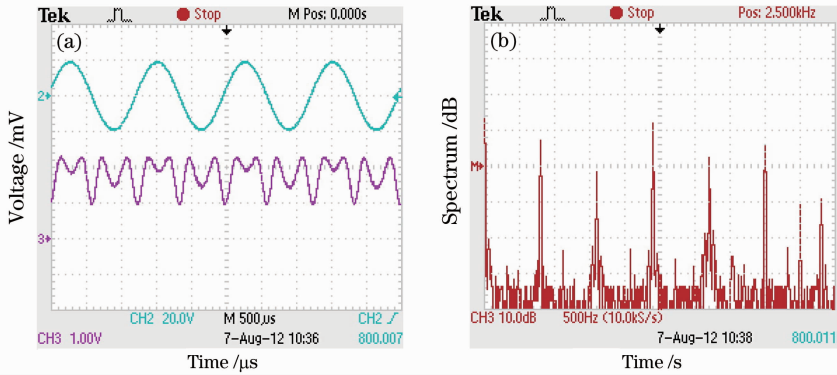


图 11 激励源  $f=800\text{ Hz}$ ,  $V=4\text{ V}$  时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 11 Signal comes from excitation source when frequency is 800 Hz and amplitude is 4 V. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

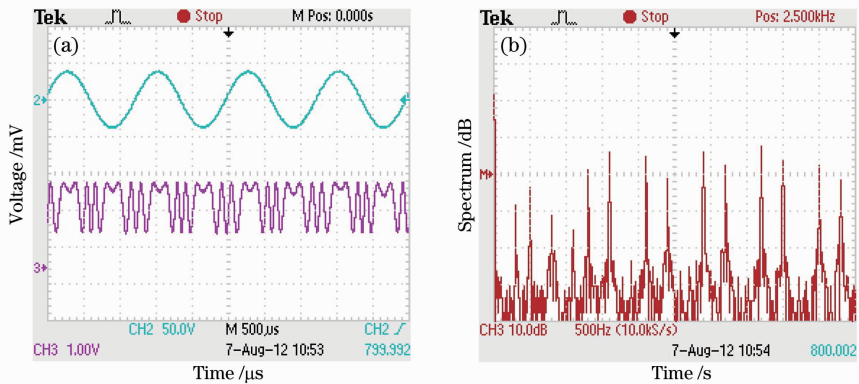


图 12 激励源  $f=800\text{ Hz}$ ,  $V=8\text{ V}$  时的微振信号。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 12 Signal comes from excitation source when frequency is 800 Hz and amplitude is 8 V. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

由以上实验和仿真结果可以看出:全光纤微振传感器能够正确测量微振动信号的频率范围为  $300\text{ Hz}\sim 60\text{ kHz}$ ,能够正确测量激励幅值小于  $2\text{ V}$  的 PZT 微振动信号,能够实现分布式测量。因此,全光纤微振传感器能够满足分布式多点测量机械微

振动信号的要求,可以为机械振动主动控制提供依据。

## 5 结 论

针对精密机械的振动主动控制,结合光强度调

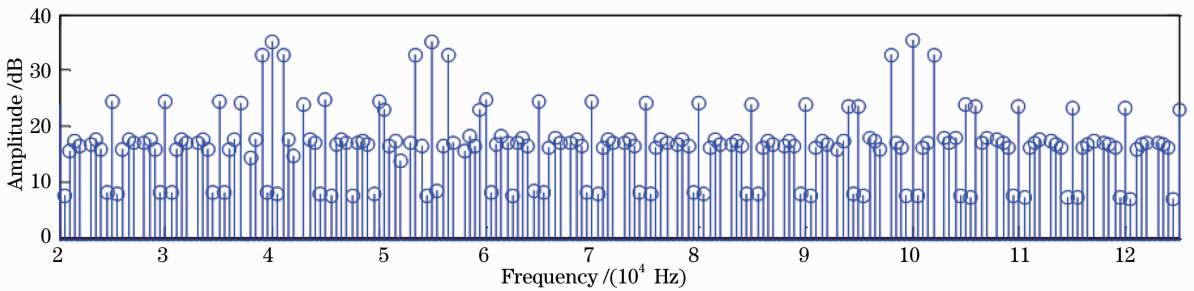


图 13 拍频仿真结果

Fig. 13 Simulation result of beat signal

制和 FMCW 技术,设计了分布式全光纤微振传感器。通过对信号发生器和 PZT 模拟的微振信号源进行测量实验和对传感器的分布式测量中拍频信号的仿真,从实践和理论两方面验证了全光纤分布式微振传感器能够多点测量振动频率在 60 kHz 以内和激励振幅在 2 V 以内的微振信号。

然而,进行振动主动控制需要进行多点的微振动信号测量,但本文对分布式测量传感器的最大个数研究并不透彻,在实际中会受到光纤模式、光强信号的稳定性、数据处理技术等因素的影响,如何确定和提高分布式测量传感器的个数将是后期研究的重点。

### 参 考 文 献

- 1 Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber 3×3 coupler interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 549–553.  
李 敏,谢 芳,陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉振动测量系统[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 549–553.
- 2 Zhang Ying, Chen Jiamei, Li Gang, *et al.*. Location method of distributed fiber-optic perimeter security system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605005.  
张 颖,陈佳妹,李 刚,等. 马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统定位算法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605005.
- 3 S H Aref, H Latifi, M I Zuibai, *et al.*. Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with low sensitivity to temperature changes for downhole application[J]. Opt Commun, 2007, 269(2): 322–330.

- 4 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.  
王拥军,刘永超,张靖涛,等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 5 Tong Zhengrong, 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.
- 6 Jiang Yi. Design of fiber-optic vibration sensor probe[J]. Optical Technology, 2002, 28(2): 148–149.  
江 毅. 光纤振动传感器探头的设计[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 148–149.
- 7 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie, *et al.*. High resolution fiber laser sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(1): 87–91.  
肖 浩,李 芳,王永杰,等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 87–91.
- 8 J S Leng, A Asundi. NDE of smart structures using multimode fiber optic vibration sensor[J]. NDT & E International, 2002, 35(1): 45–51.
- 9 D R Huston, William B Spillman Jr, Wolfgang Sauter, *et al.*. Measuring micro floor vibrations with distributed fiber optic sensors[C]. SPIE, 2001, 4357: 141–147.
- 10 Jesse Zheng. Single-mode birefringent fiber frequency-modulated continuous-wave interferometric strain sensor[C]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(2): 281–285.
- 11 Kristen Parrish. An Overview of FMCW Systems in MATLAB [M]. EE 383V Radar Principles: Term Project, 2010. 1–7.

栏目编辑: 王晓琰