

# 基于全光纤微振动传感器的定位系统研究

韩 屏<sup>1,2</sup> 朱阳波<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** 以噪声性质存在的微振动信号是造成干扰和影响机械加工精度的主要因素之一, 消除干扰的前提是对微振源的准确测量和定位。针对现有基于光纤的定位系统存在的不足, 设计了一种基于全光纤微振传感器的微振源定位系统, 该系统要求最少4个微振传感器, 通过同时测量3个传感器相对于另一个传感器的振动信号到达时间差(TDOA)来计算微振源的位置。通过实验对传感器和定位系统的性能进行验证, 相对定位误差低于0.56%, 且系统稳定可靠。

**关键词** 光纤光学; 全光纤微振动传感器; 达到时间差; 定位

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1106002

## Research of Location System Based on All-Fiber Micro-Vibration Sensor

Han Ping<sup>1,2</sup> Zhu Yangbo<sup>2</sup>

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

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

**Abstract** The micro-vibration signal existing as noise is one of the main facts that cause the interference and affect the machining accuracy. The premise of interference elimination is the precise measurement and location of micro-vibration source. A micro-vibration location system based on full-fiber micro-vibration sensor is provided, aiming at the shortcoming of existing location system based on fiber. At least 4 micro-vibration sensors are needed in this system, and the position of micro-vibration source is calculated by measuring the time difference of arrival (TDOA) of vibration signal at one sensor relative to other 3 sensors. The performance of sensors and location system is verified by experiment, the relative location error is inferior to 0.56%, and it is stable and reliable.

**Key words** fiber optics; all-fiber micro-vibration sensor; time difference of arrival; location

**OCIS Codes** 060.2370; 060.1155; 060.2310; 070.7345

## 1 引 言

对微振动信号和微振源的定位, 针对不同的对象, 如大型装备、机械设备、煤矿等, 要求在不同大小的定位区域内分布式地完成对振动信号的实时测量, 并且定位精度足够高。已有的基于光纤光栅传感器的定位系统中, 存在定位精度不高、单点测量、定位实时性差和设备昂贵等不足。文献[1]采用 Sagnac 干涉结构结合延时环的方法, 在 10 km 探测距离上实现了最大为 400 m 的误差。文献[2]提出一种基于光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器网络和时间反转聚焦成像的声发射定位方法, 能有效地对 4 m×4 m 监测区域进行声发射定位成像, 定位误差小于 2 cm。文献[3]利用 FBG 构建传感器网络, 结合小波变换研究碳纤维复合材料板低速冲击区域定位, 在 5 m×5 m 的碳纤维复合材料板上对 36 个样本进行区域定位识别, 实现了 33 个样本的定位, 区域识别精度为 4 cm×4 cm。基于 FBG 的定位系统, 其解调设备昂贵。文献[4]研究了基于光纤马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉技术的周界防范系统, 理论定位精度可达 10.22 m。文献[5]采用相敏光时域反射 (OTDR) 光纤周界系

收稿日期: 2015-06-17; 收到修改稿日期: 2015-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(51405360, 51475343)、国家国际科技合作专项(2015DFA70340)

作者简介: 韩 屏(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感和嵌入式方面研究。E-mail: hanping@whut.edu.cn

统,能够检测到传统的OTDR技术检测不到的微小扰动,但是它对激光器的线宽和频率的漂移以及探测器的灵敏度要求都比较高,系统实时性也比较差。

针对以上定位系统存在的不足,本文提出了一种全光纤微振传感器,并在此基础上设计了微振源定位系统,针对全光纤传感器的特性采用一种仅需测量到达时间差(TDOA)而无需测量振动波传输速度的定位算法,系统构成简单可靠,无需昂贵的解调和处理设备,为定位微振源提供了有效手段。

## 2 全光纤传感器设计

### 2.1 传感器结构

全光纤微振动传感器采用光纤型 Michelson 干涉仪结构,并制作弹性柱体为振动传导媒介,由4个部分组成:分布式反馈激光光源(DFB)、2×2 光纤耦合器(coupler)、传感器探测头、PIN 探测器及放大电路,其结构如图1所示。即DFB输出稳定光波,经耦合器等强度分光为2路,分别进入绕在2个弹性柱体上的光纤。探测头内部的惯性质量块M随着振动体受迫振动,2个弹性柱体将受到M的压缩或拉伸。2个弹性柱体伸缩时总体积保持不变,被M拉伸时,柱体半径减小,缠绕其上的光纤缩短;被M压缩时,柱体半径增大,缠绕其上的光纤伸展拉长,光纤的长度变化使传输光波的光程差发生改变,经反射并再次通过耦合器后发生光干涉,干涉光的光强变化能反映出光程差的变化,通过检测此光强便可还原出被检测对象的振动情况。

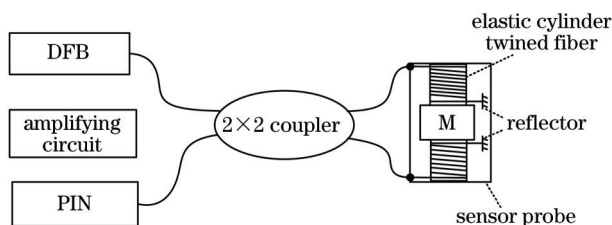


图1 全光纤微振动传感器结构图

Fig.1 Structure chart of full-fiber micro-vibration sensor

### 2.2 传感器制作

图2(a)为镀好银质反射膜的光纤,镀银末端涂覆层易受到人为磨损,因此对镀银处进行硅橡胶涂抹保护,如图2(b)所示。

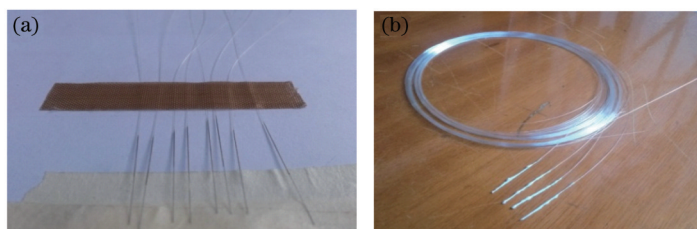


图2 (a)镀银光纤及(b)硅胶涂抹后光纤实物图

Fig.2 Entity graphs of (a) silver coated fiber and (b) silicon painted fiber

完成以上步骤后进行镀膜光纤反射率检测,以确认镀膜效果。检测时使用光源、耦合器及光功率计,检测方法如图3所示。光源发出的光经耦合器分光为2束,4端的光进入光功率计2测得功率为 $P_2$ ,另一束在镀膜处反射后经耦合器到达光功率计1测得光功率为 $P_1$ ,假设事先已测得从3端入射1、2端出射光的分光比为 $1-\gamma:\gamma$ ,从1端入射3、4端出射光的分光比为 $\mu:1-\mu$ ;在理想情况下,光纤镀膜后反射率 $r$ 计算公式为

$$r = \frac{1-\mu}{\mu\gamma} \cdot \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

选取多条镀膜光纤进行测试,按(1)式计算对应光功率,其反射率均值约为20.6%。

硅橡胶灌注制成的一对弹性柱体如图4(a)所示。弹性柱体的半径对绕于其上的光纤弯曲损耗有很大影响,选择合适的半径以避免光纤缠绕后的弯曲损耗(宏弯损耗)过大、影响干涉光的检测。对于纤芯折射率阶跃型单模光纤(SMF),其单位长度的弯曲损耗可由(2)式给出<sup>[6-7]</sup>:

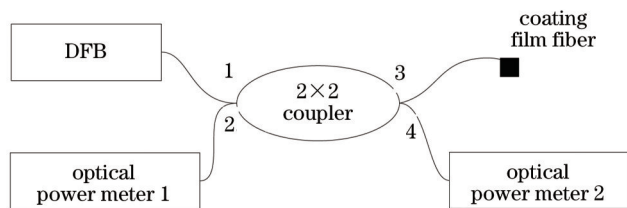


图3 镀膜反射率检测示意图

Fig.3 Schematic diagram of reflectivity detection

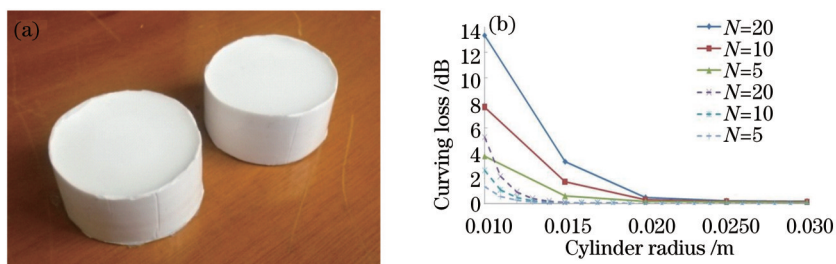


图4 弹性柱体及光纤反射率。(a) 弹性柱体实物;(b) 反射率测试结果

Fig.4 Elastic cylinder and fiber reflectivity. (a) Entity of elastic cylinder; (b) Results of reflectivity detection

$$\alpha_c = A_c R^{-\frac{1}{2}} \exp(-UR) \quad (2)$$

式中  $R$  为光纤弯曲半径,  $A_c$  与  $U$  近似估算可由(3)与(4)式给出<sup>[6]</sup>:

$$A_c \approx 30\Delta^{\frac{1}{4}} \lambda^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda_{cf}}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

$$U \approx 0.705 \frac{\Delta^{\frac{3}{2}}}{\lambda} (2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_{cf}})^3, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为工作波长,  $\lambda_{cf}$  为截止波长,  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_2$ , 为纤芯与包层相对折射率差, 且当  $0.8 \leq \lambda/\lambda_{cf} \leq 2$  时, 此近似数值可靠。G652D 单模光纤工作波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , 截止波长  $\lambda_{cf} = 1260 \text{ nm}$ ,  $\Delta = 0.7\%$ , 估算出不同  $R$  下的单位长度弯曲损耗  $\alpha_c$  (单位: dB/m)。光纤缠绕  $N=5, 10, 20$  圈时理论计算的弯曲损耗结果如图 4(b) 中虚线所示, 当  $R \geq 0.015 \text{ m}$  时, 光纤缠绕圈数对弯曲损耗无明显影响, 当  $R \leq 0.015 \text{ m}$  时, 弯曲损耗随圈数增加有明显上升趋势, 当  $R=0.01 \text{ m}$ , 缠绕圈数达到 20 圈时, 理论弯曲损耗已达 5.28 dB。在算得理论弯曲损耗后, 制作了半径为 0.01、0.015、0.02、0.025、0.03 m 5 种柱体供光纤缠绕, 使用中心波长为 1550 nm 光源与光功率计进行实际弯曲损耗测量, 其结果如图 4(b) 中实线所示。根据图中理论估算与实际测量结果可知, 弹性柱体半径  $R \geq 0.02 \text{ m}$  时, 缠绕圈数的增加不会明显加剧光纤的弯曲损耗。  $R=0.02 \text{ m}$ , 缠绕圈数为 20 时, 实际弯曲损耗约为 0.4 dB。因此, 选择  $R=0.02 \text{ m}$  的弹性柱体为传感器的传感臂。缠绕光纤后的弹性柱体及传感探头完整实物如图 5 所示。

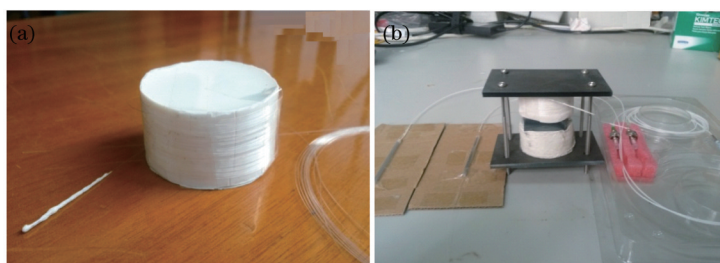


图5 (a)传感臂和(b)全光纤传感器实物图

Fig.5 Entity graphs of (a) sensing arm and (b) full-fiber sensor

### 2.3 传感器性能分析

全光纤微振动传感器进行微振动测量, 实质上是由弹性柱体伸缩改变光纤长度实现的, 它是一种惯性式测振传感器, 因此可等效为质量块-弹簧-阻尼器系统(m-k-c 系统)。柱体伸缩量  $\Delta h$  即为质量块与实际振

动两者绝对位移之差,其稳定状态下柱体伸缩量可表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta h = \frac{y}{\sqrt{(1-f_0^2/f^2)^2 + (2\xi f_0/f)^2}}, \quad (5)$$

式中  $y$  表示实际振动绝对位移,  $f_0$  为传感器固有频率,  $f$  为待测振动实际振幅频率,  $\xi$  为传感器阻尼比。传感器采用双臂结构,其固有频率为单臂结构的  $\sqrt{2}$  倍<sup>[9]</sup>:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E'\pi R^2}{mH}}, \quad (6)$$

式中  $E'$  为光纤缠绕后柱体杨氏模量,  $R$  与  $H$  为柱体半径与高度,  $m$  为惯性质量块质量。一般采用矢量位移法计算光纤缠绕后柱体杨氏模量与泊松比<sup>[9]</sup>,其表达式为

$$\begin{cases} E' = \frac{1-\mu-2\mu^2/X}{1-\mu-2\mu^2} E \\ \mu' = \mu/X \\ X = 1 + \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E} \frac{E_r S_r N}{HR} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $E$  与  $\mu$  分别为绕光纤前弹性柱体杨氏模量及泊松比,  $X$  仅为比例系数,  $E_r$ 、 $S_r$  为光纤杨氏模量与截面积, 现将传感器各参数代入(6)式计算其固定频率。传感器使用 G652D 单模光纤(杨氏模量  $7.3 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, 包层直径 125  $\mu$ m), 算得  $E_r S_r = 895.84$  N, 弹性柱高度与半径皆为 0.02 m, 光纤缠绕圈数  $N$  为 50 圈, 柱体原弹性模量  $E = 3.75$  MPa, 原泊松比  $\mu$  为 0.45。数据代入(6)与(7)式中计算, 得  $X = 5.33$ ,  $E' = 12.26$  MPa, 传感器固有频率  $f_0$  约为 747 Hz。

### 3 定位系统设计

针对光纤传感器灵敏度高和响应速度快的特点,提出了一种基于到达时间差的4点定位算法并设计了定位系统。该定位系统能够实现分布式多点实时测量,其组成原理如图6(a)所示,光源通过1×4分路器供给4个全光纤传感器。在定位区域中,布置4个已知自身坐标位置的传感器作为信标,任何一个微振源(OSC)发出的振动信号,经过传输介质到达4个信标传感器的时间存在先后差异,只要能够捕获微振源发出的振动信号达到4个信标传感器之间的时间差,就能够实现对微振源的定位。

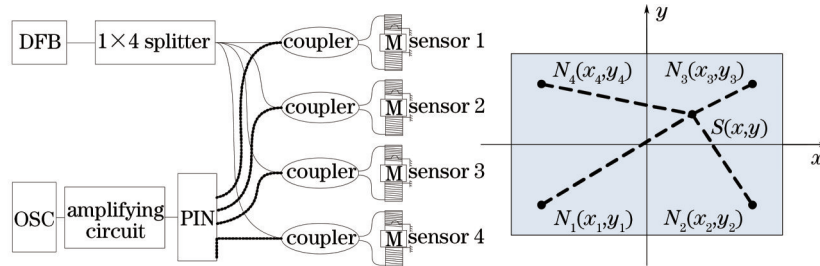


图6 (a)定位系统原理图;(b)传感器布置示意图

Fig.6 (a) Schematic of location system; (b) schematic diagram of sensors placement

将4个信标传感器引入直角坐标系进行定位实验,布置为如图6(b)中所示位置。图中,  $N_1 \sim N_4$  点表示1~4号信标传感器,分别位于坐标轴4个象限。由于进行平面定位实验,且示波器能获得振动到达2个传感器的时间差,因此若坐标系中某点  $S(x, y)$  发生振动,由于面板各向同性,振动波在面板各个方向上的传播速度相同,则  $S$  点到  $N_i$  点的距离与  $S$  点到其他3个点的距离差为

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} = v\Delta t_{i1}, \quad (8)$$

式中  $i = 2, 3, 4$ ,  $v$  表示振动信号传播速度,  $\Delta t_{i1}$  表示振动信号到达  $N_1$  与  $N_2 \sim N_4$  的时间差。由此将  $i = 2, 3, 4$  代入(8)式并两两相除即可消去传播速度参数  $v$  (未知量), 消去后表达式为



$$\begin{cases} \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}} = \frac{\Delta t_{12}}{\Delta t_{13}} \\ \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2}} = \frac{\Delta t_{12}}{\Delta t_{14}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中2个等式为包含了振源S坐标值的非线性方程组,解此方程组即可得到S的坐标。

此振源定位的方法是将振源的位置问题转化为测量振动信号到达各全光纤传感器的时间差。振动波在不同传输介质中的传输速度不同,该定位算法无需测量振动波传播的速度,降低了测量和算法的复杂度,有利于提高定位的实时性。

## 4 实验验证与分析

### 4.1 实验环境搭建

实验环境如图7(a)所示,定位实验在一个有效定位区域长为3 m、宽为2 m、厚为2 mm的铝板上进行。在定位区域的4个角上分别放置1个全光纤传感器作为信标,传感器输出经光电转换后由四通道示波器进行波形观测。将1个压电陶瓷(PZT)作为微振源放在铝板上的任意位置。4个传感器的坐标(以左下角为 $S_1$ )分别为: $S_1(-1.42 -0.95)$ , $S_2(1.47 -0.93)$ , $S_3(1.45 0.93)$ , $S_4(-1.43 0.93)$ ,坐标的原点是定位区域的中心。将PZT微振源依次放在位于4个不同象限的 $x_1, x_2, x_3, x_4$ 位置,如图7(b)所示。

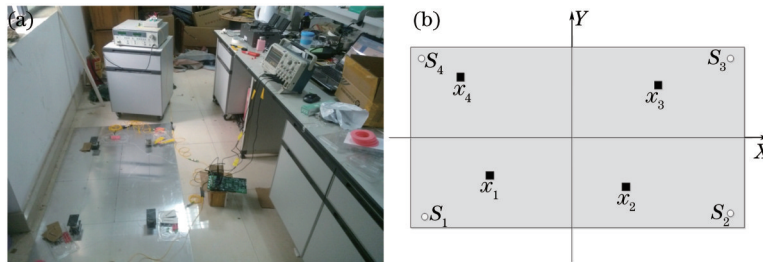


图7 定位系统实物图。(a)实验环境;(b)振源位置

Fig.7 Entity graphs of location system. (a) Experimental environment; (b) position of vibration source

图8显示出了在示波器上观察到的PZT振动信号传输到2个不同的全光纤传感器上的时间先后关系。若有多个传感器对同一振动源进行检测,通过示波器能获得各传感器检测到振动信号的时间先后集合,进而获得(9)式中的 $\Delta t_{12}$ 、 $\Delta t_{13}$ 、 $\Delta t_{14}$ 。

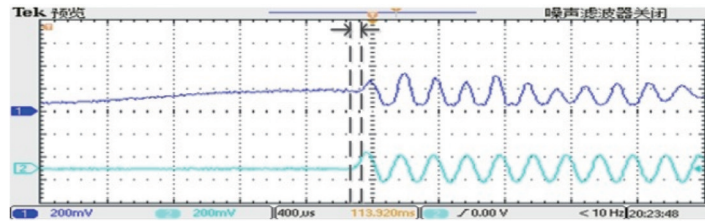


图8 振动波形的时间差

Fig.8 Time difference of vibration wave

### 4.2 数据测量和分析

首先,仅对4个传感器进行单次测量就获取测量信号,不对原始数据进行任何预处理。实验结果如下:

- 1) 微振源在 $x_1$ 处距离信标传感器 $S_1$ 近,故测量到 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 分别相对于 $S_1$ 的时间差,即 $t_{21} = 118 \mu s$ ,  
 $t_{31} = 57 \mu s$ , $t_{41} = 73 \mu s$ ;
- 2) 微振源在 $x_2$ 处距离信标传感器 $S_2$ 近,故测量到 $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 分别相对于 $S_2$ 的时间差,即 $t_{12} = 91 \mu s$ ,  
 $t_{32} = 104 \mu s$ , $t_{42} = 181 \mu s$ ;
- 3) 微振源在 $x_3$ 处距离信标传感器 $S_3$ 近,故测量到 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_4$ 分别相对于 $S_3$ 的时间差,即 $t_{13} = 179 \mu s$ ,

$t_{23} = 123 \mu s, t_{43} = 180 \mu s$ ;

4)微振源在  $x_4$  处距离信标传感器  $S_4$  近,故测量到  $S_1, S_2, S_3$  分别相对于  $S_4$  的时间差,即  $t_{14} = 101 \mu s, t_{24} = 95 \mu s, t_{34} = 181 \mu s$ 。

将以上测试结果,代入(9)式可求解振源坐标,使用 Matlab 画出方程组的图像确定解的范围,画图结果如图 9 所示。图 9 中 2 条线条分别代表代入(9)式中的一个等式,2 条线交点即为振动源位置,在初步确定解的范围后,可使用牛顿迭代求出解的具体数值,实际振源位置与求解坐标结果如表 1 所示。

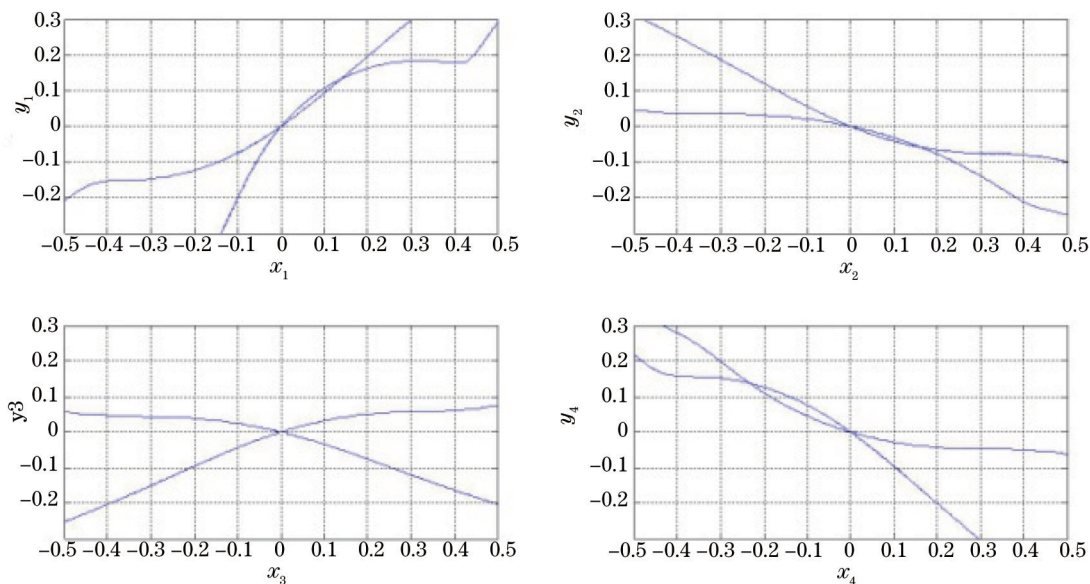


图 9 二元非线性方程组

Fig.9 Dual nonlinear equation set

表 1 振源实际坐标与测量坐标

Table 1 Real coordinate and measured coordinate of vibration source

Real coordinate /m	Measured coordinate /m	Error /m
(-0.78, -0.43)	(-0.138, -0.133)	0.707
(0.57, -0.56)	(0.36, -0.47)	0.212
(0.82, 0.71)	(0.71, 0.8)	0.114
(-1.23, 0.8)	(-1.14, 0.68)	0.125

对某一个微振源只进行一次测量,数据中会存在各种干扰和偶然因素,故所得到的定位误差最大为 0.7 m。

对 4 个全光纤传感器进行连续测量,连续采集测量信号,并采用取平均值、最小二乘法和中位数 3 种方法对原始数据进行预处理。在每个测量点连续采集测量信号 50 次,采用不同的处理方法计算各个微振源处的坐标如表 2、3、4 所示。

表 2 振源实际坐标与取平均值得到的测量坐标

Table 2 Real coordinate and measured coordinate with averaging method of vibration source

Real coordinate /m	Measured coordinate /m	Error /m
(-0.78, -0.43)	(-0.74, -0.52)	0.098
(0.57, -0.56)	(0.49, -0.51)	0.094
(0.82, 0.71)	(0.76, 0.66)	0.078
(-1.23, 0.8)	(-1.15, 0.68)	0.14

表 3 振源实际坐标与用最小二乘法得到的测量坐标

Table 3 Real coordinate and measured coordinate with least square method of vibration source

Real coordinate /m	Measured coordinate /m	Error /m
(-0.78, -0.43)	(-0.77, -0.48)	0.05
(0.57, -0.56)	(0.61, -0.58)	0.044
(0.82, 0.71)	(0.85, 0.68)	0.042
(-1.23, 0.8)	(-1.2, 0.83)	0.042

表4 振源实际坐标与用中位数得到的测量坐标

Table 4 Real coordinate and measured coordinate with median method of vibration source

Real coordinate /m	Measured coordinate /m	Error /m
(-0.78, -0.43)	(-0.77, -0.46)	0.032
(0.57, -0.56)	(0.58, -0.57)	0.014
(0.82, 0.71)	(0.81, 0.73)	0.022
(-1.23, 0.8)	(-1.22, 0.82)	0.022

对传感器进行连续多次测量且采用平均、最小二乘法、中位数等常用方法对获取的测量数据进行预处理,能够消除部分干扰和偶然因素,定位误差减小到4 cm以内。

在48 h内,每隔2 h对 $x_1, x_2, x_3, x_4$ 4个位置上进行一次定位实验,记录每次实验的误差,48 h内的4个位置上的误差变化如图10所示。纵坐标为定位误差,4个位置上48 h内定位误差的最大波动范围为0.011 m。

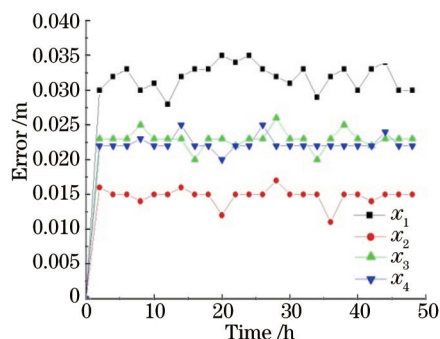


图10 48 h误差测量

Fig.10 Measured errors in 48 h

由以上定位实验可知,只要对原始采样数据进行适当的处理,基于全光纤微振动传感器的定位系统能够在定位区域内对处于不同位置的振动信号源进行定位,具有低于0.56%的相对定位误差,且系统稳定可靠。

## 5 结 论

针对微振源的测量和定位,设计了采用到达时间差原理的全光纤微振传感器定位系统。通过对PZT模拟的微振信号源进行测量和定位的实验,验证了该定位系统能够在3 m×2 m的定位区域内达到4 cm以内的定位精度,并通过大量重复性实验验证了系统的稳定性和可靠性。然而,分析在更大定位区域内,信标传感器个数、布置方式以及定位算法性能等因素对定位精度的影响,是后期的研究重点。

## 参 考 文 献

- 1 Zeng N, Shi C Z, Zhang M, *et al.*. A 3-component fiber-optic accelerometer for well logging[J]. *Opt Commun*, 2004, 234(1-6): 153-162.
- 2 Sai Yaozhang, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.*. Acoustic emission location technology research based on FBG sensor network and time reversal focusing imaging method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0805003.  
赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于FBG传感网络和时间反转变聚焦成像方法的声发射定位技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0805003.
- 3 Lu Shizeng, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.*. Identification of impact location by using fiber Bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305006.  
路士增, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于小波变换和支持向量多分类机的光纤布拉格光栅低速冲击定位系统[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305006.
- 4 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.
- 5 Kristen Parrish. An Overview of FMCW Systems in MATLAB[M]. *EE 383V Radar Principles: Term Project*, 2010: 1-7.
- 6 Chen Chi. The Sensing Technology and Application of Broad Dynamic Range Distributed Optical Fiber Sensor[D]. Wuhan: Wuhan

University, 2013.

陈 池. 大量程分布式光纤传感技术研究及工程应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.

7 Peng Xingling, Zhang Hua, Li Yulong. Simulation study on influencing factors of macrobending loss of optical fiber[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(10): 1132-1137.

彭星玲, 张 华, 李玉龙. 光纤宏弯损耗性能影响因素的仿真研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1132-1137.

8 Chen Xi, Lou Ping, Yu Shuibao, *et al.*. Moiréfringe based fiber optic inertial vibration sensor system[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(1): 13-19.

陈 希, 楼 平, 余水宝, 等. 基于莫尔条纹的光纤惯性式振动传感器系统[J]. 光电子·激光, 2014, 25(1): 13-19.

9 Luo Hong, Xiong Shuidong, Hu Yongming, *et al.*. Research on three-component all polarization-maintaining fiber optic accelerometer [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(10): 1382-1386.

罗 洪, 熊水东, 胡永明, 等. 三分量全保偏光纤加速度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1382-1386.

栏目编辑: 王晓琰