

# 基于 $3 \times 3$ 迈克耳孙干涉仪的分布式光纤振动传感器

曹玉龙<sup>1,2</sup> 杨飞<sup>1</sup> 徐丹<sup>1,2</sup> 叶青<sup>1</sup> 蔡海文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出一种基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的分布式光纤振动传感系统, 利用  $3 \times 3$  干涉仪搭建零差相干检测的相位敏感型光时域反射计( $\varphi$ -OTDR)。使用传输矩阵相位解调算法, 通过对  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的传输矩阵基本参数的求取, 建立差分相位与干涉仪输出光强的对应关系, 使用简单有效的软件运算程序对光纤中的瑞利散射光的差分相位进行解调, 实现对光纤的扰动进行分布式探测。利用该系统对光纤线路上的振动进行测试, 实验结果表明, 系统能够对振动进行准确的定位, 并有效地对音频和射频驱动的频率进行还原, 系统有效传感距离为 10 km。

**关键词** 光纤器件; 光传感器; 瑞利散射; 迈克耳孙干涉仪;  $3 \times 3$  耦合器

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1010001

## Disturbed Fiber Vibration Sensor Based on $3 \times 3$ Michelson Interferometer

Cao Yulong<sup>1,2</sup> Yang Fei<sup>1</sup> Xu Dan<sup>1,2</sup> Ye Qing<sup>1</sup> Cai Haiwen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** A distributed fiber vibration sensor based on  $3 \times 3$  Michelson interferometer is proposed, and a  $3 \times 3$  interferometer is used to build the structure of a phase sensitive optical time domain reflectometer ( $\varphi$ -OTDR) based on homodyne coherent detection. With transfer matrix phase demodulation algorithm and through the basic parameters of the  $3 \times 3$  interferometer transmission matrix, the corresponding relationship between differential phase and interferometer output light intensity is established. The simple and efficient software computing programs are used to demodulate the differential phase of Rayleigh scattering light in optical fiber, so as to realize the optical fiber distributed disturbance detection. The system is also used to detect the vibration along the fiber, and the experimental results show that the sensing system can accurately locate for the vibration and restore the frequencies of audio and radio frequency drivers, of which the effective sensing distance is 10 km.

**Key words** optical devices; optical sensor; Rayleigh scattering; Michelson interferometer;  $3 \times 3$  coupler

**OCIS codes** 230.2285; 060.2370; 190.5890; 060.2430

## 1 引 言

相位敏感型光时域反射计( $\varphi$ -OTDR)是一种新型的分布式光纤传感技术, 能够对长距离的微小振动信号进行检测<sup>[1-3]</sup>。 $\varphi$ -OTDR 有很多重要的应用领域, 如大型建筑的健康监测、石油管线、边境、重要设施的周界安防等。基于瑞利散射的  $\varphi$ -OTDR 分布式光纤技术, 能够定性测量光纤扰动的位置信息, 但由于采用直接探测, 无法定量测量<sup>[1-2]</sup>。为了提高信噪比, 常规的  $\varphi$ -OTDR 使用外差相干检测技术, 采用窄线宽和极小频率漂移的激光器作为光源, 通过探测脉冲宽度区域内后向瑞利散射光的干涉信号强度变化来检测和定位

收稿日期: 2016-04-29; 收到修改稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(U0934001, 11076028)

作者简介: 曹玉龙(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zerone.cyl@gmail.com

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光传感、光电检测等方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

扰动信号<sup>[3-5]</sup>。马赫-曾德尔和迈克耳孙干涉仪能够对入射光的相位差进行解调<sup>[6-8]</sup>,可用于对光纤中反射回来的散射光相位差进行解调,以此可以搭建自外差相干检测的  $\varphi$ -OTDR 系统<sup>[9-10]</sup>。3×3 干涉仪解调属于一种散射光的零差检测,通过待测光纤 2 个邻近点的散射光相位差来表征光纤的扰动情况,因此对线宽的要求不高。通常使用微分交叉相乘算法对散射光的相位差进行解调<sup>[9-10]</sup>,得到分布式的光纤相位分布。

基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的  $\varphi$ -OTDR 技术,通过对干涉仪传输矩阵参数的求解,建立散射光相位差与干涉仪输出光强的对应关系,根据这种对应关系快速准确地对光纤中的相位进行解调。搭建了实验系统,对光纤中的振动信号进行感知和定位,通过相位对扰动信息进行还原,实验结果表明,系统能够对 10 km 距离的光纤进行传感。

## 2 原理与装置

基于 3×3 耦合器的迈克耳孙干涉仪原理如图 1 所示,该干涉仪由 3×3 耦合器、环形器和 2 个法拉第旋转镜(FRM)组成。待探测光(LUT)通过环形器注入到 3×3 耦合器的一个端口,在 3×3 耦合器的另一端,其中 2 个端口分别连接法拉第旋转镜且其中一路有一定的时延  $\tau$ ,另一个端口则放置在折射率匹配液中或连接隔离器,以防止反射。反射回来的光经过耦合器再分为 3 路分别被 3 个光电探测器(PD)探测接收。

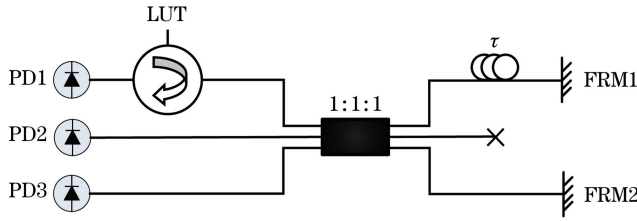


图 1 3×3 迈克耳孙干涉仪

Fig. 1 Michelson interferometer based on 3×3 coupler

干涉仪中 3×3 耦合器正向传输时从端口  $M$  到端口  $N$  的透射率可表示为  $b_{NM} \exp(i\theta_{NM})$ ,其中  $b_{NM}$  为端口的分光比例, $\theta_{NM}$  为引入的相位差,于是 3×3 耦合器的正向传输矩阵元素可表示为

$$T_{NM} = b_{NM} \exp(i\theta_{NM}), \quad (1)$$

同理,反向传输传输矩阵元素可以表示为

$$T'_{NM} = b'_{NM} \exp(i\theta'_{NM}), \quad (2)$$

式中  $b'_{NM} \exp(i\theta'_{NM})$  为反向传输时从端口  $M$  到端口  $N$  的透射率, $b'_{NM}$  为端口的分光比例, $\theta'_{NM}$  为引入的相位差。

由于 2 个反射臂长度不一样,会引入不一样的相移和损耗,假设 FM1 臂的透射率为  $p_{11}$ ,FM2 臂的透射率为  $p_{22}$ ,同时 FM2 臂相对于 FM1 臂的臂长差引起的往返总时延差为  $\tau$ ,两臂的相移差为  $\delta$ , $\delta = 2\pi n \Delta L / \lambda$ , $n$  为光纤折射率, $\Delta L$  为干涉仪两臂的臂长差, $\lambda$  为光波长。于是干涉仪两反射臂的传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} \exp(-i\omega\tau - i\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

于是整个干涉仪的传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_{NM} = \mathbf{T}'_{N \times 3} \mathbf{P} \mathbf{T}_{3 \times M}, \quad (4)$$

假设入射光的光场形式为

$$\mathbf{E}(t) = |\mathbf{E}(t)\rangle \exp[i\varphi(t)] \mathbf{z}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{z}$  表示传输方向。其从干涉仪的 1 端口正向入射,即入射光矩阵可以表示为  $\mathbf{E}^{\text{in}} = [\mathbf{E}(t), 0, 0]^T$ ,于是该激光经过干涉仪后的输出光场可以表示为

$$\mathbf{E}_N^{\text{out}} = \mathbf{M}_{NM} \mathbf{E}_M^{\text{in}}. \quad (6)$$

定义中间参数如下:

$$\begin{cases} c_{NM} = p_{MM} b'_{NM} b_{M1} \\ \eta'_N = 2p_{11} b'_{N1} b_{11} p_{22} b'_{N2} b_{21} \cos \theta_N = 2c_{N1} c_{N2} \cos \theta_N \\ \zeta'_N = 2p_{11} b'_{N1} b_{11} p_{22} b'_{N2} b_{21} \sin \theta_N = 2c_{N1} c_{N2} \sin \theta_N \\ \theta_N = (\theta'_{N2} + \theta_{21}) - (\theta'_{N1} + \theta_{11}) \\ \Delta\varphi = \varphi(t) - \varphi(t - \tau) \\ \eta_N = r_N \eta'_N \\ \zeta_N = r_N \zeta'_N \\ \xi_N = r_N (c_{N1}^2 + c_{N2}^2) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $N=1,2,3, M=1,2, r_N$  表示干涉仪第  $N$  个输出端口处光探测器的响应度。于是输出光的光功率可以表示为

$$\begin{aligned} P_N^{\text{out}} = E_N^{\text{out}} (E_N^{\text{out}})^* &= |p_{11} b'_{N1} b_{11} E(t) + p_{22} b'_{N2} b_{21} \exp(i\theta_N - i\delta) E(t - \tau)|^2 = \\ &= (p_{11} b'_{N1} b_{11})^2 |E(t)|^2 + (p_{22} b'_{N2} b_{21})^2 |E(t - \tau)|^2 + \\ &+ (p_{11} b'_{N1} b_{11} p_{22} b'_{N2} b_{21}) \exp[-i(\theta_N - \delta)] |E(t) E(t - \tau)| \exp[i\varphi(t) - i\varphi(t - \tau)] + \\ &+ (p_{11} b'_{N1} b_{11} p_{22} b'_{N2} b_{21}) \exp[i(\theta_N - \delta)] |E(t) E(t - \tau)| \exp[-i\varphi(t) + i\varphi(t - \tau)] = \\ &= (p_{11} b'_{N1} b_{11})^2 |E(t)|^2 + (p_{22} b'_{N2} b_{21})^2 |E(t - \tau)|^2 + \\ &+ (p_{11} b'_{N1} b_{11} p_{22} b'_{N2} b_{21}) |E(t) E(t - \tau)| [2\cos(\theta_N - \delta - \Delta\varphi)] = c_{N1}^2 |E(t)|^2 + c_{N2}^2 |E(t - \tau)|^2 + \\ &+ \eta'_N \cos(\delta + \Delta\varphi) |E(t) E(t - \tau)| + \zeta'_N \sin(\delta + \Delta\varphi) |E(t) E(t - \tau)|, \end{aligned} \quad (8)$$

而光探测器的输出电流为

$$\begin{aligned} I_N(t) = r_N P_N^{\text{out}} &= r_N c_{N1}^2 |E(t)|^2 + r_N c_{N2}^2 |E(t - \tau)|^2 + \\ &+ \eta_N \cos(\delta + \Delta\varphi) |E(t) E(t - \tau)| + \zeta_N \sin(\delta + \Delta\varphi) |E(t) E(t - \tau)|, \end{aligned} \quad (9)$$

定义矩阵  $\mathbf{X}'$  为

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} X'_1(t) \\ X'_2(t) \\ X'_3(t) \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \cos(\delta + \Delta\varphi) |E(t) E(t - \tau)| \\ \sin(\delta + \Delta\varphi) |E(t) E(t - \tau)| \\ [ |E(t)|^2 + |E(t - \tau)|^2 ] / 2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

于是光探测器的输出电流可以表示为

$$I_N(t) = \eta_N X'_1(t) + \zeta_N X'_2(t) + \xi_N X'_3(t) + r_N (c_{N1}^2 - c_{N2}^2) [ |E(t)|^2 - |E(t - \tau)|^2 ] / 2, \quad (11)$$

写成矩阵形式即为

$$\begin{pmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X'_1(t) \\ X'_2(t) \\ X'_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 (c_{11}^2 - c_{12}^2) \\ r_2 (c_{21}^2 - c_{22}^2) \\ r_3 (c_{31}^2 - c_{32}^2) \end{pmatrix} [ |E(t)|^2 - |E(t - \tau)|^2 ] / 2. \quad (12)$$

于是通过(12)式可以将  $\mathbf{X}'$  表示为  $I_N(t)$  的函数, 即

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} r_1 (c_{11}^2 - c_{12}^2) \\ r_2 (c_{21}^2 - c_{22}^2) \\ r_3 (c_{31}^2 - c_{32}^2) \end{pmatrix} [ |E(t)|^2 - |E(t - \tau)|^2 ] / 2, \quad (13)$$

式中右侧第二项可以忽略不计<sup>[11]</sup>, 因此有

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

据(14)式获取矩阵  $\mathbf{X}'$  后, 根据(10)式可以得到差分相位为

$$\delta + \Delta\varphi = \arctan \left[ \frac{X'_2(t)}{X'_1(t)} \right] = \arctan \left[ \frac{A_1 I_1(t) + A_2 I_2(t) + A_3 I_3(t)}{A_4 I_1(t) + A_5 I_2(t) + A_6 I_3(t)} \right], \quad (15)$$

其中矩阵  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 \\ A_7 & A_8 & A_9 \end{pmatrix}$  为矩阵  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix}$  的逆矩阵。数据处理流程如图 2 所示。

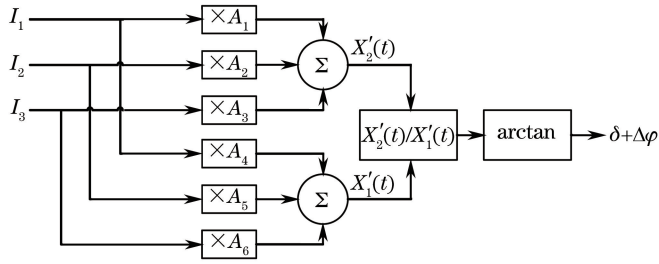


图 2 传输矩阵算法处理流程

Fig. 2 Transmission matrix demodulation method scheme

根据图 1 所示的结构搭建迈克耳孙干涉仪后放置在密封性高的壳体内,进行隔温隔震。求取干涉仪的基本参数为  $\tau = 21.88 \text{ ns}$  (对应干涉仪的自由光谱范围为  $45.7 \text{ MHz}$ )、 $\eta_1 = 0.049343$ 、 $\eta_2 = -0.033353$ 、 $\eta_3 = -0.023025$ 、 $\zeta_1 = 0.000086119$ 、 $\zeta_2 = 0.05136$ 、 $\zeta_3 = -0.051714$ 、 $\xi_1 = 0.049839$ 、 $\xi_2 = 0.061855$ 、 $\xi_3 = 0.057177$ ,求得  $A_1 = 22.2760$ 、 $A_2 = -9.3757$ 、 $A_3 = -9.2744$ 、 $A_4 = -12.0949$ 、 $A_5 = 14.4098$ 、 $A_6 = -5.0461$ 。将这些参数代入(15)式,可以求取差分相位<sup>[12]</sup>。

图 3 为传感系统的原理图。一个波长为  $1551.7 \text{ nm}$ 、功率为  $20 \text{ mW}$  的分布反馈式 (DFB) 激光器作为主光源,该连续光源受射频信号 (RF) 调制后产生脉冲,光脉冲经环形器 1 (circulator 1) 注入待测传感光纤中产生后向散射光,散射光经环形器 1 的 3 端口输出后由掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大,放大的散射光经过光纤布拉格光栅 (FBG) 滤噪,再通过环形器输入  $3 \times 3$  耦合器中,其中一个支路上加入延时光纤,光纤长度与空间分辨率相关。经过迈克耳孙干涉仪的散射光用 3 个探测器分别进行光电转换,由数模采集卡 (DAQ) 采集接收,并使用相关程序进行运算得到差分相位信息。

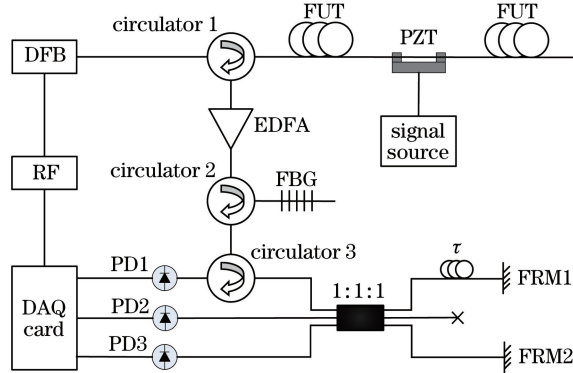


图 3 传感系统原理图

Fig. 3 Schematic configuration of sensing system

### 3 实验结果与分析

如图 3 所示,在系统的光纤端口接入 FUT,并在光纤线路上的某一处放置压电陶瓷 (PZT),通过信号发生器产生一定频率的电压信号驱动 PZT,从而使得光纤发生振动,同时将一段光纤缠绕在绕线柱上,并使用音箱对该段光纤进行音频扰动,通过系统对这两种类型的振动进行检测。

通过 RF 将激光器的输出脉冲参数调制为:脉宽  $40 \text{ ns}$ ,重复频率  $20 \text{ kHz}$ 。首先对  $3 \text{ km}$  的光纤进行音频测试。得到 3 个探测器的输出时域信号,如图 4 所示。 $3.1 \text{ km}$  处发生幅值变化,对这种时域信号进行差分运算得到幅度的差分信息,如图 5 所示,可以看到明显的幅值变化信息。对时域信号进行傅里叶变换,能够获取如图 6 所示的扰动点信息。相对于其他位置,施加音频扰动的地方有明显的强度信息,以此可以对扰动位置进行定位。

通过对这样的时域信号进行传输矩阵解调运算,可以获取相位分布信息。对  $4 \text{ km}$  的光纤瑞利散射光相位信息进行计算,得到  $3.1 \text{ km}$  处的相位分布如图 7 所示。

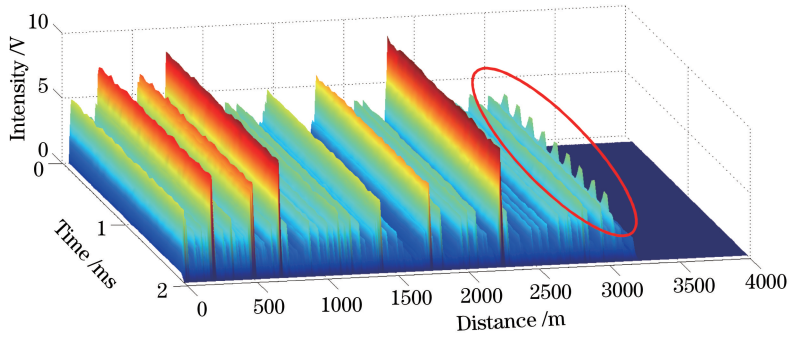


图 4 干涉仪输出的时域信号

Fig. 4 Time domain output signal of interferometer

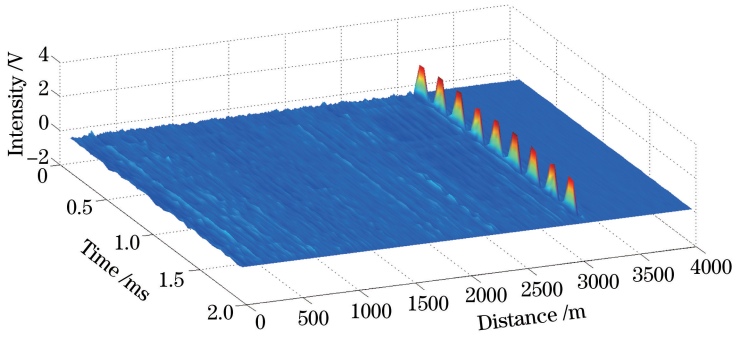


图 5 干涉仪输出的时域差分信号

Fig. 5 Time domain output differential signal of interferometer

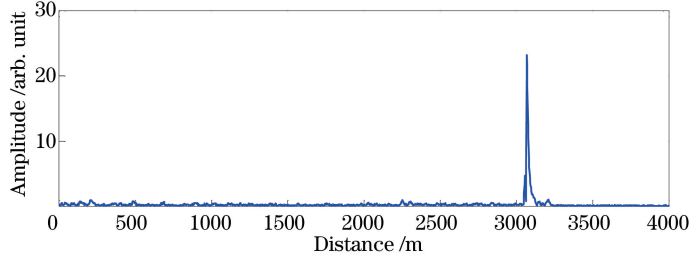


图 6 音频扰动时幅值变化分布

Fig. 6 Amplitude changing distribution with audio vibration

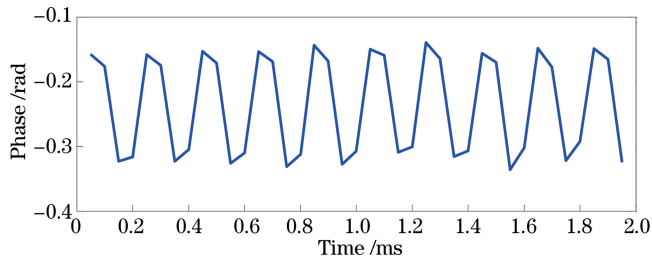


图 7 相位振动分布信息

Fig. 7 Phase vibration distribution

同样利用 PZT 对光纤进行扰动测试,并通过系统对扰动位置和扰动产生的相位分布进行检测,当注入脉冲探针的重复频率提高到 100 kHz 时,可以得到更为真实有效的分布信息,但是重复频率与探测距离负相关,重复频率越高则探测距离越短,100 kHz 的重复频率对应最大探测距离为 1 km,因此需要将待测光纤的距离缩短至 1 km。对 PZT 施加扰动,分别对 5 kHz 和 20 kHz 的信号进行采集解调,得到的相位分布如图 8 所示,通过提高脉冲重复频率可以得到更精确的正弦信号,同时也能对更高频率的信号进行采集。

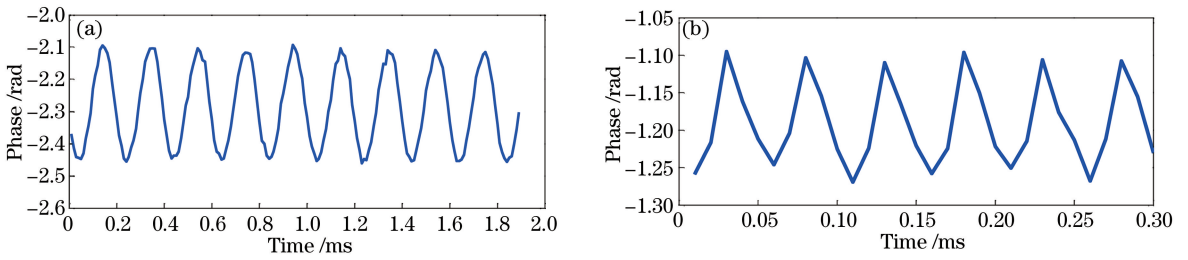


图 8 脉冲重复频率为 100 kHz 时获取的相位信息。(a) 5 kHz 振动源;(b) 20 kHz 振动源

Fig. 8 Phase information with pulse repetition rate of 100 kHz. (a) 5 kHz vibration source; (b) 20 kHz vibration source

对 10 km 的光纤进行传感,将脉冲的重复频率降至 10 kHz,PZT 放置在 9.57 km 处并对其施加 5 kHz 的扰动信号,测得 10 km 光纤的振动信号如图 9 所示,系统检测到 9.57 km 处的扰动信号并获取其扰动源频率为 5 kHz。

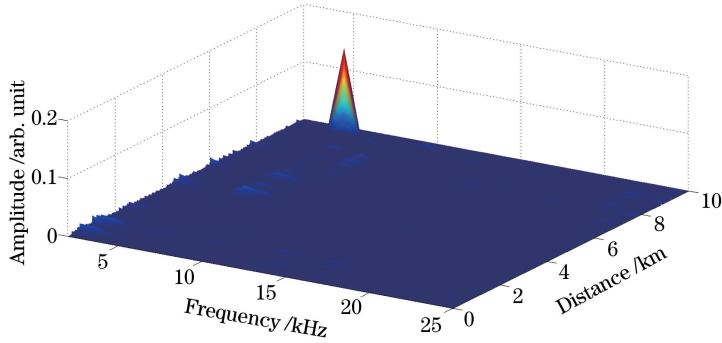


图 9 10 km 光纤扰动信号分布

Fig. 9 Vibration distribution along 10 km fiber

## 4 结 论

通过  $3 \times 3$  耦合器搭建迈克耳孙干涉仪对光纤中瑞利散射光的相位差进行检测,封装好后测得其传输矩阵参数,通过传输矩阵参数获取光纤中瑞利散射光相位差与干涉仪输出光强的对应关系,依次对光纤中的相位信息进行解调。系统能够准确地对振动信号进行感知,传感距离达到 10 km,且能够准确地解调得到光纤扰动位置的相位,对扰动信号源的频率进行还原。

## 参 考 文 献

- Choi K N, Juarez J C, Taylor H F. Distributed fiber optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters[C]. SPIE, 2003, 5090: 134-141.
- Juarez J C, Maier E W, Choi K N, *et al.* Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- Lu Y, Zhu T, Chen L, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- Liang Kezhen, Pan Zhengqing, Zhou Jun, *et al.* Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805004.  
梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805004.
- Zhou Jun, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.* Phase demodulation technology using a multi-frequency source discrimination of interference-fading induced false alarms in a  $\varphi$ -OTDR system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905003.  
周俊, 潘政清, 叶青, 等. 基于多频率综合鉴别  $\varphi$ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905003.
- Priest R G. Analysis of fiber interferometer utilizing  $3 \times 3$  fiber coupler[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and



- Techniques, 1982, 30(10): 1589-1591.
- 7 Sheem S K. Optical fiber interferometers with  $[3 \times 3]$  directional couplers: Analysis[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(6): 3865-3872.
  - 8 Breguet J, Gisin N. Interferometer using a  $3 \times 3$  coupler and Faraday mirrors[J]. Optics Letters, 1995, 20(12): 1447-1449.
  - 9 Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204.
  - 10 Wang C, Wang C, Shang Y, *et al.* Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry[J]. Optics Communications, 2015, 346: 172-177.
  - 11 Takushima Y, Choi H Y, Chung Y C. Measurement of differential phasor diagram of multilevel DPSK signals by using an adjustment-free delay interferometer composed of a  $3 \times 3$  optical coupler[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(6): 718-730.
  - 12 Xu D, Yang F, Chen D, *et al.* Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a  $3 \times 3$  optical fiber coupler[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22386-22393.