

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205278

Φ-OTDR 系统非对称光纤耦合器相位解调方法研究^{*}

王 宇^{1,2} 郭柴旺² 王俊虹² 梁 斌¹ 白 清² 刘 昕² 靳宝全²

(1. 山西省交通科技研发有限公司 太原 030600; 2. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与
山西省重点实验室 太原 030024)

摘 要:针对 3×3 光纤耦合器三路输出信号非旋转对称易导致相位解调产生误差的问题,提出了基于 3×3 光纤耦合器两路输出信号的非对称光纤耦合器相位解调系统理论,通过软件仿真分析验证了系统对单频周期信号与三次谐波信号的相位解调能力,并在相位敏感光时域反射仪(Φ-OTDR)上开展了光纤振动传感系统相位解调性能测试。实验结果表明,系统能够实现 200~4 000 Hz 频率范围内的相位解调,振动定位绝对误差在±10 m 以内,系统空间分辨率为 21 m。本方法在减少系统硬件成本的基础上,为 Φ-OTDR 系统光纤耦合器分光比与相位差不恒定问题提供了新的解决思路与参考方案,可在交通安全监测等领域进行应用推广。

关键词: 光纤振动传感;相位敏感光时域反射仪;3×3 光纤耦合器;相位解调

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5020

Study on phase demodulation method of asymmetric optical fiber coupler in Φ-OTDR system

Wang Yu^{1,2} Guo Chaiwang² Wang Junhong² Liang Bin¹ Bai Qing² Liu Xin² Jin Baoquan²

(1. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030600, China;
2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the non-rotational symmetry of the three output signals of the 3×3 optical fiber coupler is easy to cause the error of phase demodulation, this paper puts forward the theory of the asymmetric optical fiber coupler phase demodulation system based on the two output signals of the 3×3 optical fiber coupler, and verifies the phase demodulation ability of the system for the single frequency periodic signal and the third harmonic signal through software simulation analysis. The phase demodulation performance of the optical fiber vibration sensing system is tested on the phase-sensitive optical time domain reflectometer (Φ-OTDR). The experimental results show that the system can realize phase demodulation in the range of 200~4 000 Hz, the absolute error of vibration positioning is within ±10 m, and the spatial resolution of the system can reach 21 m. On the basis of reducing the hardware cost of the Φ-OTDR system, this method can provide a new solution and reference scheme for the problem of unsteady splitting ratio and phase difference of optical fiber coupler in Φ-OTDR system, and can be applied and popularized in the field of traffic safety monitoring.

Keywords: optical fiber vibration sensing; phase-sensitive optical time domain reflectometer; 3 × 3 optical fiber coupler; phase demodulation

0 引 言

光纤传感技术因本质安全、铺设简单、易于组网、灵

敏度高等优点在高速公路、高速铁路、轨道地铁等交通安全监测领域得到了广泛应用^[1-4]。相位敏感光时域反射仪(Φ-OTDR)作为光纤振动传感的重要研究方向,利用外界振动信号对光纤中瑞利后向散射光相位的调制原

理,可实现长距离传感光纤链路上多点振动信号的分布式感知。

相位解调是 Φ -OTDR 实现振动信号感知的关键环节。目前,3×3 光纤耦合器解调、相位生成载波解调、数字正交解调等相位解调理论与方法研究已成为 Φ -OTDR 领域的研究热点^[5-6]。其中,基于 3×3 光纤耦合器的相位解调方法由于结构简单、易于集成等特点,在 Φ -OTDR 应用推广过程中逐渐得到了国内外学者的广泛关注^[7-8]。2007 年,中国科学院声学研究所陈德胜等^[9]提出了 3×3 光纤耦合器相位解调方案,降低了系统对光纤器件的要求,解决了偏振诱导衰落问题,并应用于水听器和地质检波器。2007 年,中国科学院声学研究所侯文魁等^[10]在研究马赫-曾德尔干涉型光纤声传感器过程中,对 3×3 光纤耦合器三路输出信号不对称所造成的解调误差进行了理论推导,得出了相位解调误差的算术表达式,并通过仿真分析进行了验证。2016 年,华中科技大学吴锋等^[11]利用 3×3 光纤耦合器对无源传输声音信号进行相位解调,实现了一种新型光纤声音传感器系统。2019 年,第七一五所的高晓文等^[12]利用 3×3 光纤耦合器两路输出的李萨如图结合椭圆拟合,降低了耦合器分光比差异所引起的信号畸变。2020 年,武汉理工大学 Fu 等^[13]利用光纤马赫-曾德尔干涉仪,融合 3×3 光纤耦合器相位解调算法与双波长线性回归相位展开理论,实现了大动态范围的振动信号感知。2021 年,北方自动控制技术研究所 Ma^[14]在双光源马赫-曾德尔干涉仪系统中提出了 3×3 光纤耦合器非对称影响的消除方法,可将信号解调处理时间缩短 5 倍。上述研究为 3×3 光纤耦合器相位解调性能提升做出了重要贡献。

Φ -OTDR 系统所具有的超长传感距离与超多传感通道的特点,对于 3×3 光纤耦合器相位解调过程的稳定性提出了更高要求。然而,3×3 光纤耦合器在实际应用中难以保证三路输出信号分光比相同且输出信号相位差存在偏差。因此,本文提出可以仅利用 3×3 光纤耦合器的两路输出信号,来构建非对称光纤耦合器相位解调系统,经仿真分析与实验验证,本方法可实现 Φ -OTDR 光纤振动传感系统的相位解调,显著减少了系统硬件成本,提升了系统解调性能,有望在交通安全监测等领域进行应用推广。

1 光纤耦合器相位解调原理

1.1 3×3 光纤耦合器工作原理

根据耦合波理论,假设 3×3 光纤耦合器是偏振无关且无损耗,则耦合器三路输出激光光强为:

$$\begin{bmatrix} I_{o1} \\ I_{o2} \\ I_{o3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \beta \\ \beta & \alpha & \beta \\ \beta & \beta & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{i1} \\ I_{i2} \\ I_{i3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, I_{i1} 、 I_{i2} 和 I_{i3} 分别为输入耦合器 3 个端口的激光光强, I_{o1} 、 I_{o2} 和 I_{o3} 分别为输出耦合器 3 个端口的激光光强。其中 α 、 β 为:

$$\alpha = [\exp(2jlc) + 2\exp(-jlc)]/3 \quad (2)$$

$$\beta = [\exp(2jlc) - 2\exp(-jlc)]/3 \quad (3)$$

式中: c 和 l 分别为耦合器的耦合系数与耦合长度。

理想条件下,3×3 光纤耦合器输出端口的三路信号呈旋转对称关系,分光比是 1:1:1,且输出相位差均为 $2\pi/3$ 。因此,3×3 光纤耦合器 3 个输出端口所输出的光强可表示为:

$$I_o = \lambda + \mu \cos[\theta(t) + (n-2)2\pi/3] \quad (4)$$

式中: λ 、 μ 为耦合相关系数, $\theta(t)$ 为环境噪声引起的相位变化 $\psi(t)$ 与外界振动引起的相位变化 $\varphi(t)$ 之和,整数 n 取值为 0、1、2。

传统的 3×3 光纤耦合器需要保证在相位差恒定为 $2\pi/3$ 的条件下,通过数学运算化简得到待测的相位信息,这种方法被称为被动零差法^[15]。然而,在实际条件下,3×3 光纤耦合器的制作过程无法严格保证三路输出信号分光比为 1:1:1,且输出信号相位差存在偏差,难以恒定为 $2\pi/3$,从而导致相位解调结果可能产生误差^[16-17]。

1.2 非对称光纤耦合器相位解调原理

为了解决 3×3 光纤耦合器输出信号相位差存在偏差的问题,本文提出了一种非对称光纤耦合器相位解调算法,能够利用耦合器的两路输出信号实现相位解调,算法流程如图 1 所示。

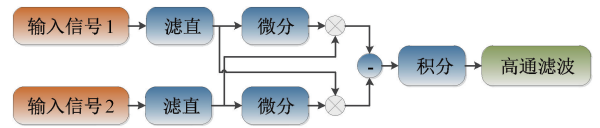


图 1 非对称光纤耦合器相位解调算法流程

Fig. 1 Algorithm flow of asymmetric fiber coupler phase demodulation

在非对称光纤耦合器相位解调过程中,光纤耦合器输出端的光强分别表示为:

$$I_1 = I_{d1} + I_{p1} \cos(\theta(t)) \quad (5)$$

$$I_2 = I_{d2} + I_{p2} \cos(\theta(t) + \Delta\varphi) \quad (6)$$

其中, I_1 和 I_2 分别为光纤耦合器两路输出端光强, I_{d1} 为光纤耦合器中第 1 路输出的直流分量, I_{d2} 为光纤耦合器中第 2 路输出的直流分量, I_{p1} 为第 1 路干涉条纹的峰值强度, I_{p2} 为第 2 路干涉条纹的峰值强度。 $\theta(t) = \varphi(t) + \psi(t)$, 其中 $\varphi(t)$ 为传感光纤的相位差信号,即为

待测信号, $\psi(t)$ 为外界环境中的低频噪声信号, $\Delta\varphi$ 是光纤耦合器制造过程所引入的相位差, 为一个固定常数。

在光纤耦合器相位解调过程中, 首先需要滤除直流信号 I_{D1} 、 I_{D2} 。由于 3×3 光纤耦合器在制造过程中存在一定的偏差, 其输出信号分光比不一致, 所以 $I_{D1} \neq I_{D2}$ 。并且光纤耦合器的输出具有一定的相位差, 因而其两路输出信号的李萨如图形为具有一定厚度的椭圆。利用最小二乘法对其进行方程拟合, 椭圆可表示为^[18]:

$$I_1^2 + k_1 I_1 I_2 + k_2 I_2^2 + k_3 I_1 + k_4 I_2 + k_5 = 0 \quad (7)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 分别为椭圆方程的参数变量, 通过对李萨如图形的椭圆拟合得到。

因此, 3×3 光纤耦合器输出光强中的直流分量可以表示为:

$$I_{D1} = \frac{2k_2 k_3}{k_1^2 + k_1 k_4 - 2k_2} \quad (8)$$

$$I_{D2} = \frac{2k_1 - k_1 k_3}{k_1^2 - 2k_2} \quad (9)$$

滤除直流分量后, 所获得光强的交流分量为:

$$I_{A1} = I_{p1} \cos(\theta(t)) \quad (10)$$

$$I_{A2} = I_{p2} \cos(\theta(t) + \Delta\varphi) \quad (11)$$

式中: I_{A1} 、 I_{A2} 为 3×3 光纤耦合器输出光强的交流分量, I_{p1} 、 I_{p2} 分别为干涉条纹的峰值强度。

经过微分处理的光强交流分量 I'_{A1} 、 I'_{A2} 为:

$$I'_{A1} = -I_{p1} \sin(\theta(t)) \theta'(t) \quad (12)$$

$$I'_{A2} = -I_{p2} \sin(\theta(t) + \Delta\varphi) \theta'(t) \quad (13)$$

将每一路的光强交流分量信号 I_{A1} 、 I_{A2} 分别与另外一路经过微分的交流分量 I'_{A2} 、 I'_{A1} 交叉相乘并求差, 可得:

$$C = I_{A1} I'_{A2} - I_{A2} I'_{A1} =$$

$$I_{p1} I_{p2} [\cos(\theta(t) + \Delta\varphi) \sin(\theta(t)) - \cos(\theta(t)) \sin(\theta(t) + \Delta\varphi)] \theta'(t) \quad (14)$$

式中: C 为两路交流信号分别与另一路交流信号微分的乘积之差。所获得的 C 通过积分器可得:

$$Q = I_{p1} I_{p2} \sin(\Delta\varphi) \theta(t) =$$

$$I_{p1} I_{p2} \sin(\Delta\varphi) (\varphi(t) + \psi(t)) \quad (15)$$

式中: Q 为光强信号通过积分获得的输出结果。

利用高通滤波器可滤除外界环境中的低频噪声信号 $\psi(t)$, 而得到待测信号 $\varphi(t)$ 。因而相位解调输出信号 D 为:

$$D = k\varphi(t) \quad (16)$$

式中: $k = I_{p1} I_{p2} \sin(\Delta\varphi)$ 。

由式(16)可知, 输出信号 D 仅与待测信号 $\varphi(t)$ 成正比关系, 与 3×3 光纤耦合器结构参数无关。因此, 非对称光纤耦合器相位解调算法可以有效避免 3×3 光纤耦合器三端输出信号的相位差不是 $2\pi/3$ 和分光比不是严格 $1:1:1$ 所带来的问题, 从而有望实现光纤振动传感系统相位解调的目的。

2 实验结果分析

2.1 实验系统搭建

基于 Φ -OTDR 的非对称光纤耦合器相位解调系统结构如图2所示。

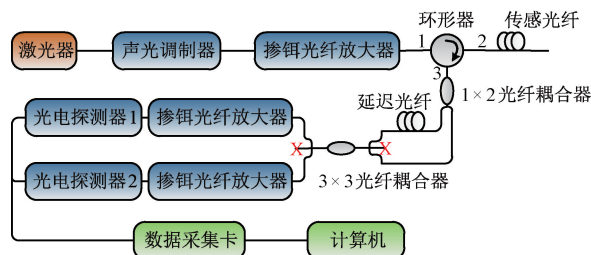


图2 基于 Φ -OTDR 的非对称光纤耦合器相位解调系统结构

Fig. 2 Structure diagram of asymmetric optical fiber coupler phase demodulation system based on Φ -OTDR

图2中窄线宽激光器发出的 1550 nm 连续光经声光调制器调制产生脉冲光, 再经掺铒光纤放大器放大后进入环形器1口。入射光经环形器2口进入传感光纤, 产生的后向瑞利散射信号经环形器3口进入 1×2 光纤耦合器。随后, 1×2 光纤耦合器的一路输出信号经过延迟光纤后进入 3×3 光纤耦合器, 另一路输出信号则直接进入 3×3 光纤耦合器。选取 3×3 光纤耦合器的两路输出进行放大并通过光电探测器采集到光强模拟信号, 并利用FPGA的高速并行特性将采集到的模拟信号转化为数字信号, 最后通过USB3.0高速传输通道送入计算机进行相位解调分析处理^[19]。

2.2 仿真结果分析

依据非对称光纤耦合器相位解调原理, 利用MATLAB软件进行相位解调过程仿真, 研究系统对单频周期信号与三次谐波信号的相位解调能力。设定仿真系统中输入频率为 10 kHz 且幅值为1的单频正弦信号。经仿真分析, 获得相位解调结果频谱图如图3所示。

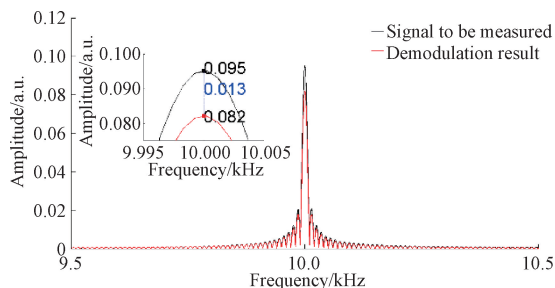


图3 单频周期信号解调结果频谱图

Fig. 3 Spectrum diagram of demodulation result of single frequency periodic signal

由图3可得, 非对称光纤耦合器相位解调的信号频

率与仿真设定的输入信号频率相同且峰值误差较小。因此,仿真结果表明,非对称光纤耦合器可实现单频周期信号的相位解调。

Φ -OTDR 系统在真实环境中所感知的振动信号,往往不是包含单一频率成分,而是包含多个频率成分^[20]。设定待测信号为 100、500 和 1 000 Hz 3 组频率成分所组成的三次谐波信号,且各频率成分的幅值均为 1。通过仿真分析,系统对三次谐波信号的相位解调结果频谱图如图 4 所示。

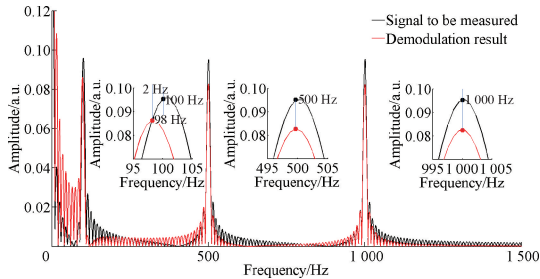


图 4 三次谐波信号解调结果频谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of third harmonic signal demodulation result

由图 4 可知,非对称光纤耦合器相位解调系统可在高频范围内得到精确的解调结果,而在低频(100 Hz)处存在一定误差。因此,非对称光纤耦合器相位解调方案可以实现振动信号的相位解调,并且能够实现三次谐波信号的频率识别。

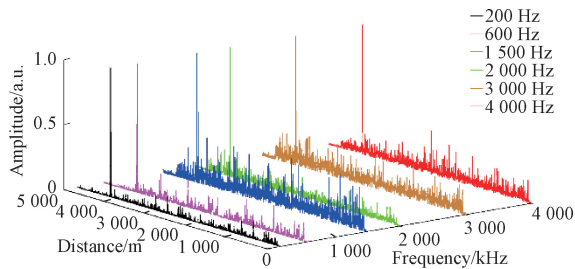
2.3 实验结果分析

依照图 2 所示搭建基于 Φ -OTDR 的非对称光纤耦合器相位解调系统。在实验过程中通过在压电陶瓷管(PZT)表面缠绕一段传感光纤,并由信号发生器输出一一定频率的压电陶瓷驱动脉冲,用于模拟外界振动信号对光纤的扰动作用。通过实验参数调节,进行系统频率响应范围、定位误差以及空间分辨率的测试分析。

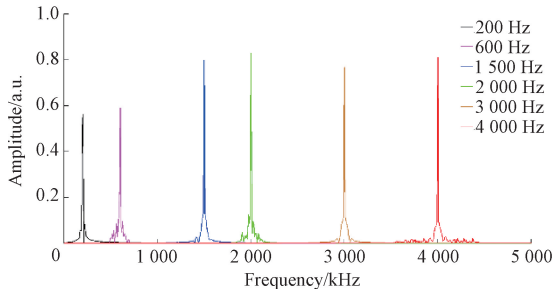
1) 频率响应范围测试

在长度为 4 km 的传感光纤末端接入 PZT 模拟振动信号,设置声光调制器重复频率为 16 kHz 进行测试。调节信号发生器输出幅度为 2 V,频率依次为 200、600、1 500、2 000、3 000、4 000 Hz 的压电陶瓷驱动信号。实验得到不同频率下的振动信号频率-空间分布结果如图 5 所示。

如图 5(a) 所示,在不同频率条件下,6 组实验的振动信号频率-空间分布结果表明在光纤位置为 4 175 m 处均存在明显的振动信号。而在振动位置(4 175 m)处,不同频率响应结果如图 5(b) 所示,可得系统在高频范围内具有精确的解调性能,而在低频处存在一定误差,与仿真结果相一致。因此,在脉冲重频为 16 kHz 的条件下,基于 Φ -OTDR 的非对称光纤耦合器相位解调系统可实现频率



(a) 不同频率振动信号频率-空间分布结果
(a) Frequency spatial distribution results of vibration signals with different frequencies



(b) 振动位置处不同频率响应结果
(b) Response results of different frequencies at vibration position

图 5 频率响应结果

Fig. 5 Frequency response results

响应范围为 200~4 000 Hz 的振动信号相位解调。

2) 定位误差测试

在传感光纤的特定位置处施加振动,通过解调振动位置信息可实现系统定位误差测试。选取总长度为 10 505 m 的传感光纤,调节脉冲激光重复频率为 6 kHz,脉冲宽度为 200 ns。在传感光纤尾端,利用工具敲击光纤产生振动信号,并通过重复性实验解调振动位置,从而可进行定位误差测试分析。

$$\delta = \frac{\omega c}{2n} \quad (17)$$

式中: δ 为系统空间分辨率, ω 为探测脉冲宽度, c 为真空中光速, n 为光纤折射率。

由式(17)可知,在 200 ns 脉宽条件下,系统空间分辨率为 20 m。因而,本系统难以确定 20 m 以内定位数据的准确性,即本系统的最大允许定位误差为 ± 10 m。为此,针对给定的振动施加位置,系统的定位性能应满足定位误差小于等于 ± 10 m 的需求。

如图 6(a) 所示,通过 50 次重复实验, Φ -OTDR 系统解调出的振动位置分布在 10 495~10 515 m 之间,则系统可实现振动定位绝对误差为 ± 10 m,从而满足设计需求。根据式(18)可获得重复性实验中每次实验的相对误差如图 6(b) 所示。

$$\epsilon_i = \frac{|l_i - l_0|}{l_0} \times 100\% \quad (18)$$

式中: ϵ_i 为第 i 次实验的振动定位相对误差, l_i 为第 i 次

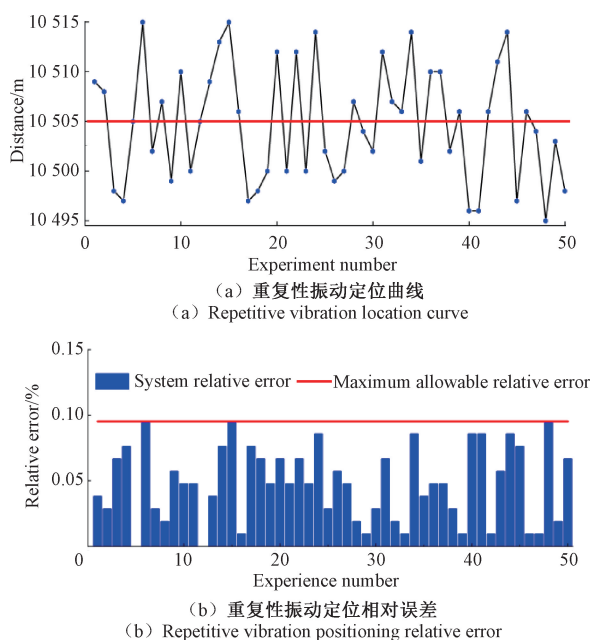


图6 振动信号定位误差分析结果

Fig. 6 Analysis results of vibration signal positioning error

实验的振动定位位置, l_0 为真实的振动施加位置, 即 10 505 m。因此, 系统最大允许定位误差由式 (18) 计算可得为 0.095%, 并在图 6(b) 中用红线进行标记。同时, 50 次重复实验所得到的振动定位相对误差可用柱状图进行表示, 均满足 $\leq 0.095\%$ 的设计需求。

随后, 在传感光纤的特定位置处, 利用 PZT 产生振动信号进行单次测试, 通过相位解调分析系统定位结果。如图 7 所示, 在构造的距离-时间瀑布图上, 振动信号作用区域在距离域上分布于 4 200~4 220 m 之间, 振动定位点位于光纤 4 210 m 处, 因而在传感光纤全链路上的定位绝对误差在 ± 10 m 以内。

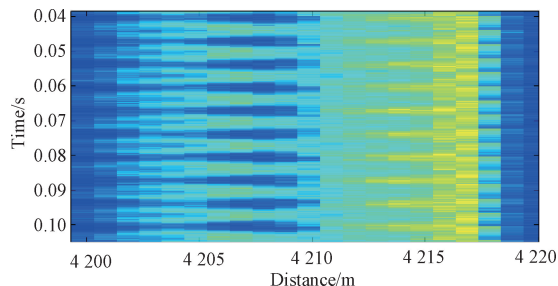


图7 光纤振动定位瀑布图

Fig. 7 Waterfall diagram of optical fiber vibration positioning

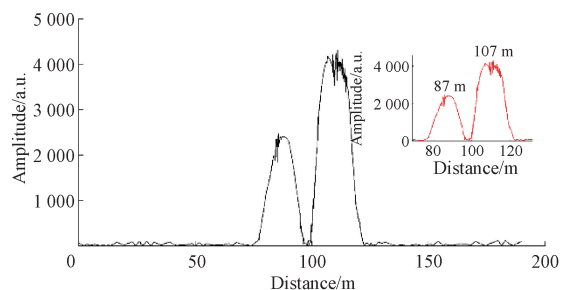
上述实验结果表明, 在脉冲重频为 6 kHz, 脉冲宽度为 200 ns 的条件下, 基于 Φ -OTDR 的非对称光纤耦合器相位解调系统定位绝对误差在 ± 10 m 以内。

3) 空间分辨率测试

为了判断系统的实际空间分辨率, 通常可在传感光

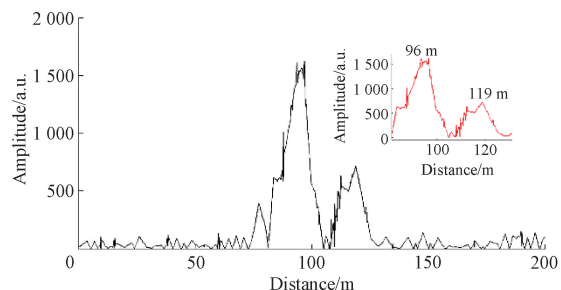
纤上的两个位置处分别加入 PZT 用于模拟两个距离相近的振动事件。以振动定位曲线上对应于两个 PZT 的双峰可准确区分且无混叠为标准, 通过逐步缩短两个 PZT 之间的光纤长度, 从而获得振动事件可区分的最短有效距离, 确定系统的实际空间分辨率。

设置系统的脉冲重频为 16 kHz 且脉冲宽度为 200 ns, 在距离光纤始端 100 和 125 m 的初始位置处分别接入两个 PZT 来模拟产生外界振动信号。两个 PZT 经由信号发生器驱动, 分别产生频率为 500 和 1 000 Hz 的不同正弦振动信号。如图 8(a) 所示, 选取振动定位曲线上对应于两个 PZT 的峰值所在位置为实际定位结果, 则可得两个 PZT 的定位结果分别为 87 和 107 m, 从而可用于判断系统实际的定位误差和空间分辨率。随后, 通过不断缩短两个 PZT 之间的距离来对比振动定位曲线结果, 在距离分别为 21、23 和 25 m 时, 可实现振动信号的准确区分。由此可得, 两个 PZT 之间距离至少在 21 m 以上时可以实现不同振动信号位置的分辨。



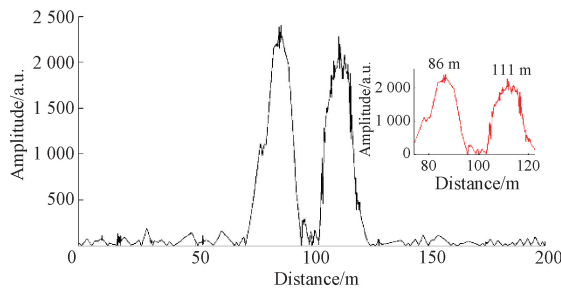
(a) 两个PZT间距为21 m的振动定位曲线

(a) Vibration positioning curve with a distance of 21 m between two PZTs



(b) 两个PZT间距为23 m的振动定位曲线

(b) Vibration positioning curve with a distance of 23 m between two PZTs



(c) 两个PZT间距为25 m的振动定位曲线

(c) Vibration positioning curve with a distance of 25 m between two PZTs

图8 振动定位曲线结果对比

Fig. 8 Comparison of vibration positioning curve results

随后,设定两个 PZT 之间距离为 21 m,分别绘制光纤耦合器两路输出信号的距离-时间-强度三维振动定位图。图 9(a)为光电探测器 1 检测到的信号经相位解调后的结果,图 9(b)为光电探测器 2 检测到的信号经相位解调后的结果。经对比可知,两路输出信号均可通过三维振动定位图实现两个振动信号的分辨。

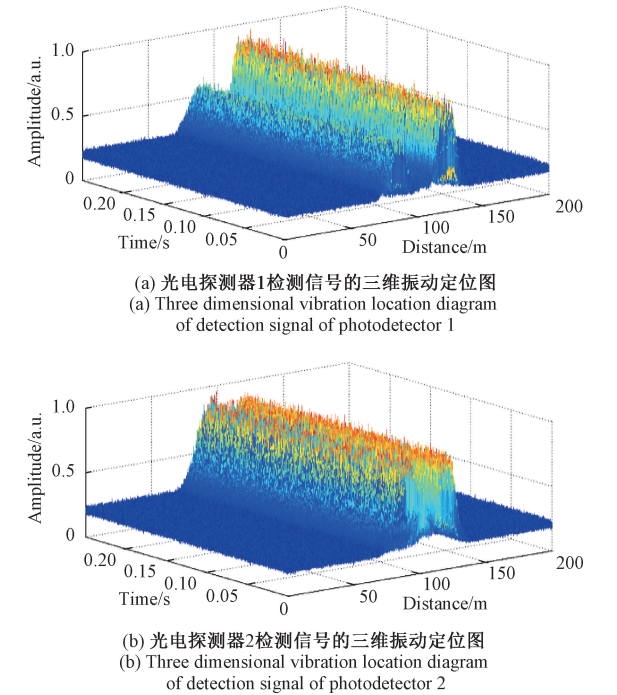


图 9 三维振动定位图

Fig. 9 Three dimensional vibration location diagram

如表 1 所示,通过分析三维振动定位图中两处尖峰对应的距离值,可得两个振动点定位结果。由此可知,非对称光纤耦合器相位解调系统可以稳定分辨出间隔 21 m 的两个振动点。

表 1 两个振动点定位结果

Table 1 Positioning results of two vibration points

探测器件	振动点 1 定位结果	振动点 2 定位结果
光电探测器 1	92 m	113 m
光电探测器 2	88 m	109 m

3 结 论

本文介绍了 3×3 光纤耦合器相位解调工作原理,并根据其三路输出信号非旋转对称易导致相位解调产生误差的问题,提出了利用两路输出信号的非对称光纤耦合器相位解调系统理论,并进行仿真实验验证其

基本性能。实验结果表明,基于 Φ -OTDR 的非对称光纤耦合器相位解调系统可以实现 200~4 000 Hz 范围内的相位解调,在脉冲宽度为 200 ns 的情况下,振动定位绝对误差在 ± 10 m 以内,空间分辨率可达到 21 m。上述方法通过减少系统硬件成本,提升系统解调性能,可为 Φ -OTDR 系统在交通安全监测等领域的应用推广提供参考。

参考文献

[1] 尹露. 光纤传感技术下的快速路交通状态监测研究[J]. 交通工程, 2020, 20(6): 24-29, 36.

YIN L. Research on expressway traffic condition monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(6): 24-29, 36.

[2] 梁晨,倪克琦,常素良,等. 轨道交通监测用光纤光栅解调设备设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 154-158.

LIANG CH, NI K Q, CHANG S L, et al. Research of optical fiber grating demodulation equipment used in rail transit monitoring [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(8): 154-158.

[3] 姚明远,张浩霖,杨玥. 分布式光纤传感技术应用于地铁隧道安全监测[J]. 电子技术与软件工程, 2019(15): 18-19.

YAO M Y, ZHANG H L, YANG Y. Application of distributed optical fiber sensing technology in subway tunnel safety monitoring [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(15): 18-19.

[4] 江舒,李涛,林杰俊,等. 船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 35-42.

JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and application of the FBG strain sensor for ship[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 35-42.

[5] LI Y, WANG Y, XIAO L, et al. Phase demodulation methods for optical fiber vibration sensing system: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(3): 1842-1866.

[6] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 184-190.

ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Improved phase demodulation method for fiber optic

- vibration sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8):184-190.
- [7] 张冰,王葵如,颜玢玢,等. 基于双波长和 3×3 光纤耦合器的干涉测量相位解卷绕方法[J]. 光学学报, 2018,38(4):232-239.
- ZHANG B, WANG K R, YAN F F, et al. Phase unwrapping method based on dual wavelength and 3×3 fiber coupler with interferometric measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2018,38(4):232-239.
- [8] 宋美杰,于廷宽. 一种基于 3×3 耦合器的光纤相位解调算法[J]. 光通信技术,2019,43(5):51-53.
- SONG M J, YU T K. Optical fiber phase demodulation algorithm based on 3×3 coupler [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(5):51-53.
- [9] 陈德胜,肖灵,崔杰,等. 光纤干涉信号的 3×3 耦合器解调及偏振衰落分析[J]. 光电子. 激光,2007,18(5):523-525.
- CHEN D SH, XIAO L, CUI J, et al. Analysis of 3×3 coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(5):523-525.
- [10] 侯文魁,丁向辉,林京. Mach-Zehnder 干涉型光纤声传感器的 3×3 耦合器检测算法研究[J]. 水声信号处理技术,2007,26(5):165-167.
- HOU W K, DING X H, LIN J. Investigation of detection arithmetic of 3×3 coupler of Mach-Zehnder interference fiber acoustic sensor [J]. Underwater Acoustic Signal Processing Technology, 2007, 26(5):165-167.
- [11] 吴锋,吴柏昆,余文志,等. 基于 3×3 耦合器相位解调的光纤声音传感器设计[J]. 激光技术,2016(1):64-67.
- WU F, WU B K, YU W ZH, et al. Design of fiber acoustic sensors based on 3×3 coupler phase demodulation[J]. Laser Technology, 2016(1):64-67.
- [12] 高晓文,张自丽,叶博,等. 一种改进的光纤水听器 3×3 耦合器解调算法[J]. 声学及电子工程,2019(3):15-19.
- GAO X W, ZHANG Z L, YE B, et al. An improved optical fiber hydrophone 3×3 coupler demodulation algorithm [J]. Acoustic and Electronic Engineering, 2019(3):15-19.
- [13] FU X, WU J, LI Z, et al. Fiber-based large dynamic range vibration sensing with dual-wavelength phase unwrapping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(24):6090-6096.
- [14] MA P. A fast positioning method for long-range asymmetric interferometer disturbance sensors [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 117:103822.
- [15] 张叶浩,衣文索,崔光磊,等. 干涉型光纤预警系统入侵信号的调制解调技术[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2018,36(1):1-8.
- ZHANG Y H, YI W S, CUI G L, et al. Research on modulation and demodulation of intrusion signal based on interferometric optical-fiber early-warning system [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2018, 36(1):1-8.
- [16] 梁育雄,黄毓华,王升,等. 基于非对称 3×3 耦合器的光纤相位解调研究[J]. 激光技术,2021,45(1):25-30.
- LIANG Y X, HUANG Y H, WANG SH, et al. Fiber optical sensor demodulation research based on asymmetric 3×3 coupler [J]. Laser Technology, 2021, 45(1):25-30.
- [17] 巩玲仙,田竹梅,任国凤,等. 干涉型光纤传感器中非理想 3×3 耦合器对相位解调的影响分析[J]. 光学技术,2019,45(6):707-711.
- GONG L X, TIAN ZH M, REN G F, et al. Analysis of non-ideal 3×3 coupler on phase demodulation in interferometric fiber optic sensor[J]. Optical Technique, 2019, 45(6):707-711.
- [18] 刘俊承,张自超,余波,高峰. 3×3 耦合器解调过程中的偏振分析与处理[J]. 光子学报,2019,48(1):15-24.
- LIU J CH, ZHANG Z CH, YU B, et al. Polarization analysis and processing in demodulation process of 3×3 coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 48(1):15-24.
- [19] 崔琪,顾金良,刘庆国,等. 基于 DSP+FPGA 的高速数据采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):93-98.
- CUI Q, GU J L, LIU Q G, et al. Design of high speed data collection system based on DSP+FPGA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(1):93-98.
- [20] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 基于时频混合特征提取

算法的光纤传感信号识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 153-159.

ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Time-frequency domain based hybrid feature extraction algorithm for fiber optic sensing events recognition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 153-159.

作者简介



王宇, 2014 年于法国塞吉-蓬图瓦兹大学获得博士学位, 现为太原理工大学副教授, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: wangyu@tyut.edu.cn

Wang Yu received his Ph. D. degree in 2014 from Cergy-Pontoise University. Now

he is an associate professor in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



郭柴旺, 2019 年于长春理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: 912384983@qq.com

Guo Chaiwang received his B. Sc. degree in 2019 from Changchun University of Technology. Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



靳宝全(通信作者), 2010 年于太原理工大学获得博士学位, 现为太原理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: jinbaoquan@tyut.edu.cn

Jin Baoquan (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2010 from Taiyuan University of Technology. Now he is a professor and Ph.D. tutor in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.