

## 移频双脉冲相干探测相位敏感光时域反射仪

樊迎瑞<sup>1</sup>, 王宇<sup>1,4\*</sup>, 梅若彤<sup>2</sup>, 王俊虹<sup>1</sup>, 王鹏飞<sup>2,4</sup>, 刘昕<sup>2,4</sup>, 靳宝全<sup>2,3,4</sup>

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学 电子信息工程学院, 太原 030024; 3. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024; 4. 山西省矿山安全监测新型传感技术及应用工程研究中心, 太原 030024)

**摘要:** 为了提升相位敏感光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR)的相位解调性能, 提出了一种移频双脉冲相干探测 $\Phi$ -OTDR系统。通过分析声光调制器的幅频响应和拍频信号频谱, 优化了双脉冲的移频参数, 并对瑞利散射信号进行正交解调。实验结果显示, 该系统能准确解调50~2 000 Hz的振动信号, 驱动信号幅值与相位幅值的线性拟合度达0.992 2, 干涉衰落概率从25.93%降至8.28%, 实现了低衰落的相位解调。

**关键词:** 分布式光纤传感; 相位敏感光时域反射; 移频双脉冲; 相干探测; 相位解调

**中图分类号:** TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2026)02-0001-06

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.001

Frequency-shifted dual-pulse coherent detection  $\Phi$ -OTDRFAN Yingrui<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1,4\*</sup>, MEI Ruotong<sup>2</sup>,WANG Junhong<sup>1</sup>, WANG Pengfei<sup>2,4</sup>, LIU Xin<sup>2,4</sup>, JIN Baoquan<sup>2,3,4</sup>

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control Systems (Ministry of Education), Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. Shanxi Province Engineering Research Center of Novel Sensing Technology and Application for Mine Safety Monitoring, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** To enhance the phase demodulation performance of phase-sensitive optical time-domain reflectometer ( $\Phi$ -OTDR), a frequency-shifted dual-pulse coherent detection  $\Phi$ -OTDR system is proposed. By analyzing the amplitude-frequency response of the acousto-optic modulator and the beat signal spectrum, the frequency-shift parameters of the dual pulses were optimized, and orthogonal demodulation was performed on the Rayleigh scattering signals. The experimental results show that the system can accurately demodulate vibration signals in the range of 50~2 000 Hz, with a linear fitting degree of 0.992 2 between the amplitude of the driving signal and the phase amplitude. The probability of interference fading is reduced from 25.93% to 8.28%, achieving low-fading phase demodulation.

**Key words:** distributed optical fiber sensing, phase-sensitive optical time-domain reflectometer, frequency-shifted dual pulse, coherent detection, phase demodulation

收稿日期: 2025-02-27。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(62375197)资助; 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2024C002)资助; 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B004)资助; 山西省科技创新团队项目(201805D1310 03)资助。

**作者简介:** 樊迎瑞(2000—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 现就读于太原理工大学物理与光电工程学院光学工程专业, 主要研究方向为光纤传感技术。曾获国家励志奖学金、学业优秀奖学金, 以及“兆易创新杯”第十九届中国研究生电子设计竞赛华北赛区一等奖等荣誉。

**\*通信作者:** 王宇(1986—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光纤传感技术。



## 0 引言

分布式光纤传感技术能够实现对温度、应变、振动等物理量在光纤沿线的连续分布式测量, 具有灵敏度高、抗电磁干扰、测量范围广等优点<sup>[1-3]</sup>, 广泛应用于地震信息采集、管道泄漏检测、电路监测、周界安防等领域<sup>[4-10]</sup>。其中, 基于后向瑞利散射(RBS)原理的相位敏感光时域反射( $\Phi$ -OTDR)技术<sup>[11-14]</sup>在振动检测方面具有显著优势。

近年来, 双脉冲探测技术在 $\Phi$ -OTDR系统中受到广泛关注。该技术通过发射2个具有特定时间间隔的脉冲光进行探测, 为分布式光纤传感提供了有效手

樊迎瑞,王宇,梅若彤,等:移频双脉冲相干探测相位敏感光时域反射仪

段<sup>[15-16]</sup>。围绕基于双脉冲直接探测的 $\Phi$ -OTDR,国内外研究学者相继开展了多种相位解调方法的研究。2014年,Alekseev A E等人<sup>[17]</sup>提出了一种相移双脉冲方案,利用相位调制器使探测脉冲对内的相对相位差以 $2\pi/3$ 的步长变化,通过将后向散射信号分为3组,成功实现了对外部扰动信号的提取。然而,该方法依赖于相位调制器的精确控制,增加了系统复杂性和硬件成本。2017年,He Xiangge等人<sup>[18]</sup>采用2个声光调制器(AOM)对双脉冲进行频率调制,并结合外差相位解调技术恢复扰动波形。但由于使用了2个AOM不仅提高了硬件成本,且两者之间的频移抖动可能导致干涉信号强度在频率范围内振荡,引入额外噪声。2018年,Muanenda Y等人<sup>[19]</sup>提出了一种基于双脉冲 $\Phi$ -OTDR的稳定零差相位解调技术。该方法利用相位调制器对探测脉冲对中的一个脉冲进行调制,生成用于动态相位变化的载波信号,并采用增强型相位载波生成差分乘方解调算法提取相位变化。然而,该方法同样依赖相位调制器,且解调算法复杂,增加了系统实现难度。2022年,Liu Shuaiqi等人<sup>[20]</sup>通过单个AOM产生双脉冲间的相对相移,并基于四步相移干涉测量方法提取相位信息。该方法在一定程度上降低了硬件成本,但其解调过程仍依赖于复杂的相位步进控制。2024年,Jiang Yiluo等人<sup>[21]</sup>设计了一种频率复用双脉冲 $\Phi$ -OTDR系统。该系统通过在光源中引入声光移频环路,能够输出由多个分离频率组成的高重复率窄脉冲序列,并采用I/Q解调技术实现相位还原。尽管提升了系统性能,但由于在光源中引入了声光移频环使得系统整体更为复杂。2025年,Cheng Yafeng等人<sup>[22]</sup>通过生成4个频率间隔为2.5 MHz的双脉冲,构造出 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 和 $2\pi$ 的相位差异,从而实现对振动波形的恢复。但该方法在提升解调能力的同时,对多频率脉冲的生成精度与相位差异控制提出了更高要求。上述研究工作主要通过引入相位差异或频率差异,实现对双脉冲探测信号的移相或移频调制,并在此基础上取得了良好的解调效果。然而,现有研究对系统的调制与解调方式提出了更高要求,存在系统复杂性高、硬件成本高以及噪声干扰等问题,限制了系统在实际应用中的性能和可靠性。为此,本文提出移频双脉冲相干探测 $\Phi$ -OTDR系统。

## 1 移频双脉冲相干探测 $\Phi$ -OTDR系统

### 1.1 正交解调原理

在相干探测 $\Phi$ -OTDR系统中,激光器发出的连续

光被分为2路:一路通过AOM进行调制,另一路则作为本振光。本振光与RBS光进行拍频,通过分析采集到的拍频信号还原振动信息。其中,本振光信号 $L(t)$ 可以表示为

$$L(t) = E_L \cos(2\pi f_N t + \zeta_L(t)) \quad (1)$$

式中: $E_L$ 是本振光强度, $\zeta_L(t)$ 是本振光相位, $f_N$ 是窄线宽激光的频率。

系统使用移频双脉冲作为探测脉冲,两脉冲具有相同的脉宽,频率分别为 $f_1, f_2$ ,两脉冲之间的间隔为500 ns,则AOM对连续光调制后产生的频移量也分别为 $f_1, f_2$ ,入射光所激发的后向瑞利散射光信号 $R(t)$ 可以表示为<sup>[23]</sup>

$$R(t) = \sum_{i=1}^2 s_0 E_R \cos[2\pi(f_N + f_i)(t - T_i) + \zeta_i(t)] \quad (2)$$

式中: $s_0$ 是光/电转换系数, $E_R$ 是RBS光的强度, $\zeta_i(t)$ 是RBS光的相位, $T_i$ 是第 $i$ 个脉冲相对于第1个脉冲的延迟时间, $t$ 是时间。

本振光与RBS光的拍频信号 $B(t)$ 为

$$B(t) = \sum_{i=1}^2 s E_L E_R \cos[2\pi f_i(t - T_i) + \zeta_i(t) - \zeta_L(t)] \quad (3)$$

式中: $s$ 为常数, $s = 4s_0$ 。

由式(3)可知,拍频信号 $B(t)$ 包含2个频率分量。对其进行的正交解调主要包括以下步骤:首先,利用带通滤波器对拍频信号进行分离,以提取出这2个不同的频率分量。由于2个探测脉冲在发射时存在时间延迟,2个频率分量对应的拍频曲线在时间轴上出现偏移,因此在带通滤波后需通过数据对齐消除由于延迟带来的时间差,确保2个频率分量的信号在时间维度上处于同一基准。随后,对处于同一时间基准的2个单频信号分量进行正交解调,获得相应的幅值与相位信息。最后,采用矢量叠加的方法进行幅值信号聚合,对聚合后的信号进一步幅值解调,从而还原出振动相位信息。

### 1.2 系统结构与原理

移频双脉冲相干探测 $\Phi$ -OTDR系统实验装置图如图1所示。窄线宽激光器产生波长为1 550 nm的连续光,首先经过耦合器(1:99)分成2束光,其中99%的一路通过AOM(中心频率为80 MHz)进行调制,生成的脉冲光经掺铒光纤放大器功率放大后,通过环形器端口1注入待测传感光纤。1%的一路则作为本振光,与环形器端口3返回的RBS光进行拍频。随后,平衡光电探测器(BPD)对其进行光/电转换,由数据采集卡

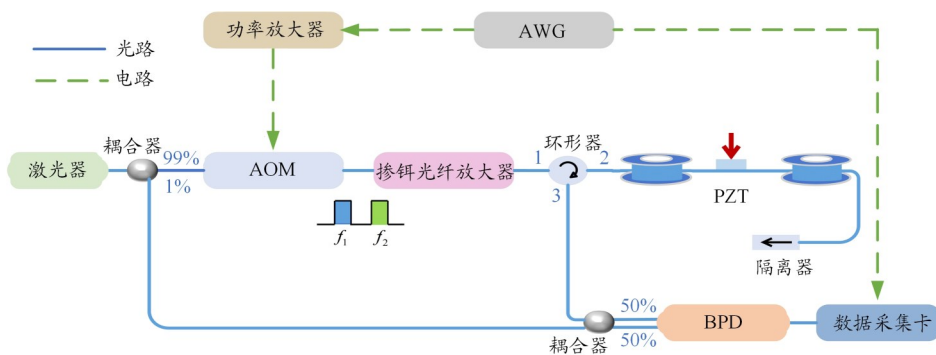


图1 移频双脉冲相干探测Φ-OTDR系统实验装置图

将采集到的拍频信号进行模/数转换,传回上位机进行后续的数据处理。

在实验中,由任意波形发生器(AWG)向压电陶瓷换能器(PZT)施加标准的正弦信号,以模拟外部扰动,其中PZT上缠绕1 m的光纤。待测传感光纤的长度为700 m,在200 m处连接PZT。使用AWG产生具有不同频率的移频双脉冲信号,经功率放大器放大后驱动AOM对连续光进行调制。移频双脉冲重复频率设置为80 kHz、脉宽设置为100 ns,脉冲间隔设置为500 ns。同时,AWG产生脉冲触发数据采集卡进行采集,保证信号调制和采集严格同步,采样率设置为250 MHz。

## 2 实验结果

为验证所提系统性能,本文搭建了相应实验平台。所选AOM的中心频率为80 MHz。由于系统仅采用单个AOM实现移频调制,其幅频响应特性将直接影响双脉冲的生成效果。为此,在正式实验前,首先对该AOM的幅频响应进行测试,得到4组不同移频量的双脉冲时域图如图2所示。图中,每组波形中左侧为第一个脉冲,右侧为第二个脉冲。可以看出,双脉冲时域波形均保持良好的形状,无明显畸变,表明该AOM在测试频率范围内时域响应稳定。

进一步对AOM输出的脉冲光幅度进行分析,得到了幅频响应曲线如图3所示。可以看出,在中心频率80 MHz处AOM表现出最佳响应特性,此时脉冲幅度最高,达767 mV。随着脉冲频率偏离中心频率程度的增大,脉冲幅度逐渐减小。将输出幅度高于最大幅值10%(76.7 mV)的频率范围定义为有效幅频响应区间。在左边界55 MHz和右边界105 MHz处,脉冲光的幅度分别降低至76 mV和24 mV,均低于有效幅值阈值。基于上述实验结果,可以认为该AOM的有效频响范围为60~100 MHz。

由正交解调原理可知,首先需对原始拍频信号进行带通滤波,以分离其包含的2个频率分量,再通过矢量叠加得到用于还原振动信息的新拍频信号。滤波的有效性取决于2个频率分量的分离程度。为此,需针对不同移频双脉冲探测方案,分析原始拍频信号的频谱特征。同时,所选移频双脉冲的频率应位于AOM的频响范围内,以确保AOM

能对其进行有效调制。

不同移频双脉冲探测下的拍频信号频谱如图4所示。当双脉冲频率均为80 MHz时,信号频率分量集中于80 MHz处,与理论预期一致,表明同频双脉冲探测的拍频信号具有单一集中的频谱特征。当双脉冲频率分别为75 MHz和85 MHz时,由于两频率偏离AOM中心频率(80 MHz)的偏移量较小,频谱中出现部分重叠,导致带通滤波难以将2个频率分量完全分离。当

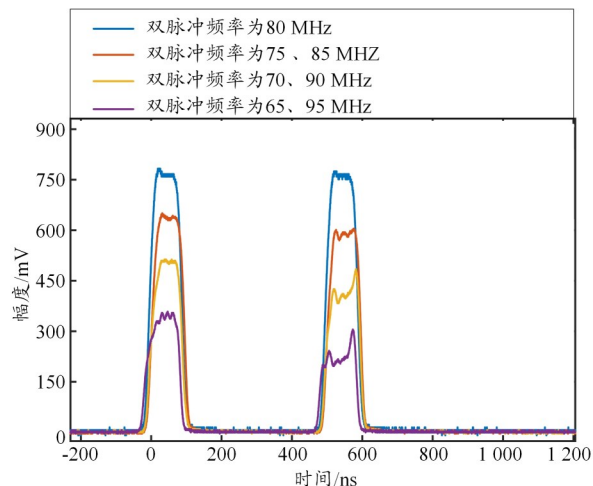


图2 不同移频双脉冲信号时域图

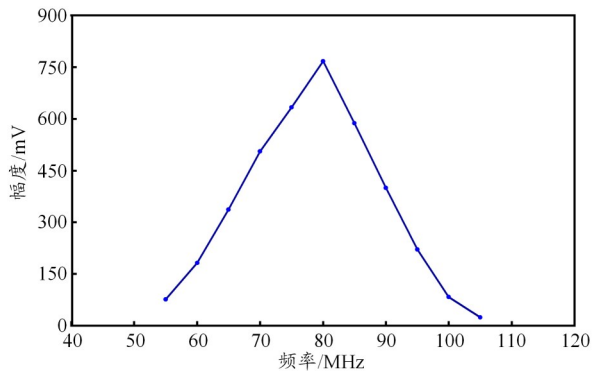


图3 AOM幅频响应曲线

樊迎瑞,王宇,梅若彤,等:移频双脉冲相干探测相位敏感光时域反射仪

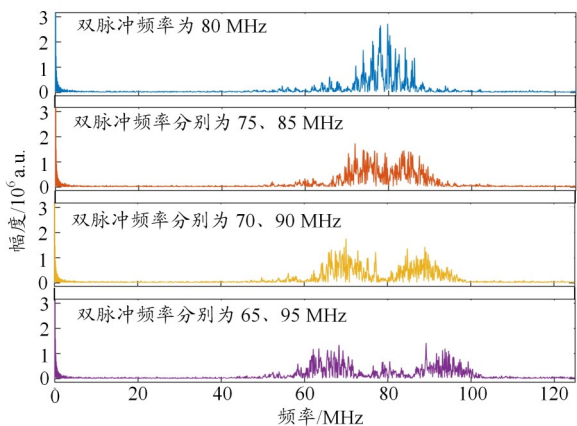
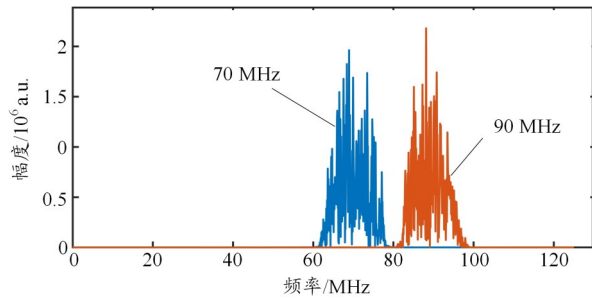


图4 不同频率移频双脉冲探测时拍频信号频谱图

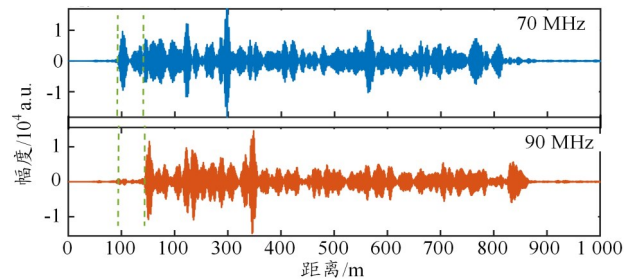
双脉冲频率分别为 70 MHz 和 90 MHz 时,频谱中的 2 个频率分量分别集中于 70 MHz 和 90 MHz 处,彼此之间无明显重叠,实现了较好的频域分离。当双脉冲频率进一步增大偏移量至 65 MHz 和 95 MHz 时,尽管 2 个频率分量在频域上同样保持分离,但随着偏移量增大,调制光强下降,不利于系统信噪比的维持。综合考虑上述频谱分析结果及 AOM 的频率响应特性,本文最终选取频率为 70 MHz 和 90 MHz 的双脉冲信号开展后续研究。该方案在兼顾 AOM 良好频率响应的前提下,实现了拍频信号 2 个频率分量的有效分离,为后续相位解调的准确性奠定了基础。

对图 4 中 70 MHz 和 90 MHz 双脉冲探测下的拍频信号频谱进行带通滤波,可提取出中心频率分别为 70 MHz 和 90 MHz 的 2 个频率分量,2 个频率分量及其对应的拍频曲线如图 5 所示。可以看出,90 MHz 分量的拍频曲线相较于 70 MHz 分量存在约 50 m 的空间延迟,该延迟源于 2 个探测脉冲之间 500 ns 的时间间隔。为准确重构振动信息,需要在矢量叠加前对存在延迟的 2 个频率分量进行数据对齐操作,以消除由于延迟带来的时间差,确保 2 个频率分量在时间维度上处于同一基准。

在传统  $\Phi$ -OTDR 系统中,光纤某些位置因相干衰落导致 RBS 光强度极弱,使得该处的相位信息出现失真,难以准确检测振动。与之相比,本文系统采用移频双脉冲驱动单个 AOM 进行探测,拍频信号中存在 2 个频率分量。这 2 个分量具有不同的强度包络分布,即它们在光纤上的衰落位置各不相同。通过矢量叠加将 2 个信号按照其幅度和相位关系进行聚合,可生成 1 个衰落被有效抑制的新拍频信号。对该合成信号进行正交解调,即可在准确还原振动信息的同时,提升系统抗衰落能力。



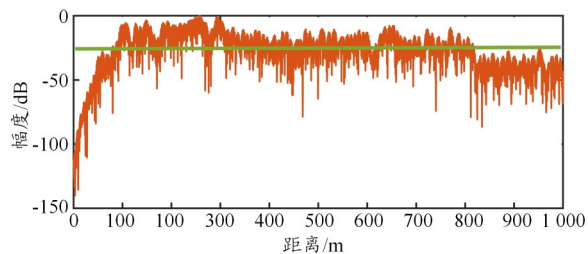
(a) 带通滤波后得到的 2 个频率分量信号



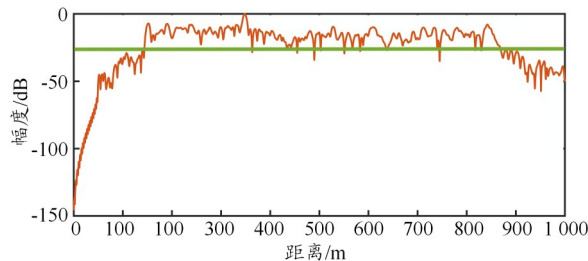
(b) 2 个频率分量对应的拍频曲线及其衰落包络差异

图5 带通滤波后的 2 个频率分量及其对应的拍频曲线情况

为评估系统对于干涉衰落的抑制效果,本文分别采用频率为 80 MHz 的单脉冲和移频双脉冲进行对比探测实验,得到的归一化幅值曲线如图 6 所示。为量化衰落程度,首先定义幅值曲线尾端的信号强度为衰落阈值(图中绿色实线),并将传感光纤有效范围(100~800 m)内信号强度低于该阈值的采样点比例定义为衰落概率。图 6(a)为单脉冲探测结果,其尾端信号强度为 -25.3 dB。经计算,有效范围内信号强度低于该阈



(a) 80 MHz 单脉冲探测归一化幅值曲线



(b) 移频双脉冲探测归一化幅值曲线

图6 归一化幅值曲线对比

值的点占比为25.93%,即衰落概率为25.93%。图6(b)为移频双脉冲探测结果,其尾端信号强度为-26.9 dB,对应计算得到衰落概率为8.28%。对比2种探测方式,移频双脉冲使衰落概率降低了17.65%。实验结果表明,该系统能有效抑制相干衰落,显著提升系统对振动信息提取的准确性与可靠性。

为直观展示系统对动态振动的响应能力,本文实验时向PZT施加幅度为10 V、频率为1 000 Hz的正弦信号。将1 000条连续采集的传感曲线沿时间轴堆叠,得到的瀑布图如图7所示,图中曲线的变化趋势可反映信号在时域上的动态演变。实验中,双脉冲的重复频率设置为80 kHz,对应采样间隔为12.5 μs,因此1 000次连续采集的总时间跨度为12.5 ms。在图7的白色矩形框标记区域(时长11 ms)内,可以观察到明显的周期性起伏,共记录到11次完整的振动事件。经

计算,单个振动周期为1 ms,对应的振动频率为1 000 Hz,与施加的激励信号频率完全吻合。

为验证系统的解调能力,向PZT施加峰值电压为10 V、频率分别为50、500、1 000、2 000 Hz的正弦信号,相应的相位解调结果如图8所示。其中,图8(a)~图8(d)分别为各频率下振动信号的相位曲线,均可观察到规律的正弦波形;图8(e)~图8(h)为对应的功率谱密度(PSD)曲线,其信噪比分别为10.9、12.9、13.4、13.2 dB。实验结果表明,该系统能够有效解调不同频率的振动相位,且各频率下的信噪比均超过10 dB,验证了该方法在振动信号还原方面的准确性与可靠性。

为了进一步评估系统的线性解调性能,向PZT施加频率为1 000 Hz、幅值为1~10 V的正弦驱动信号,电压步进为1 V,得到驱动信号幅值与解调相位幅值之间的拟合曲线如图9所示。根据线性拟合结果,当驱

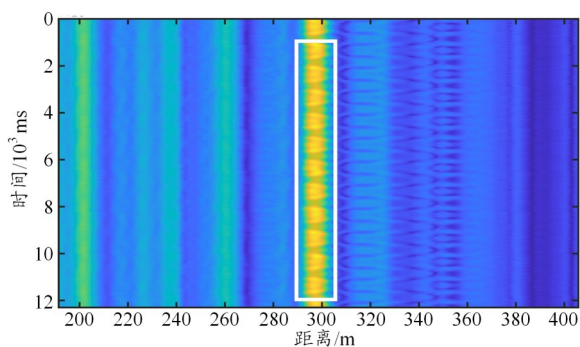


图7 施加1 000 Hz振动信号对应的瀑布图

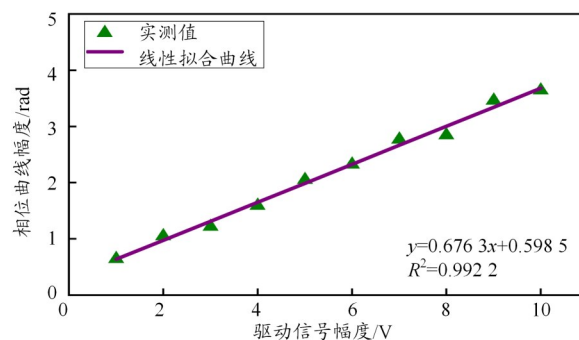


图9 相位拟合曲线

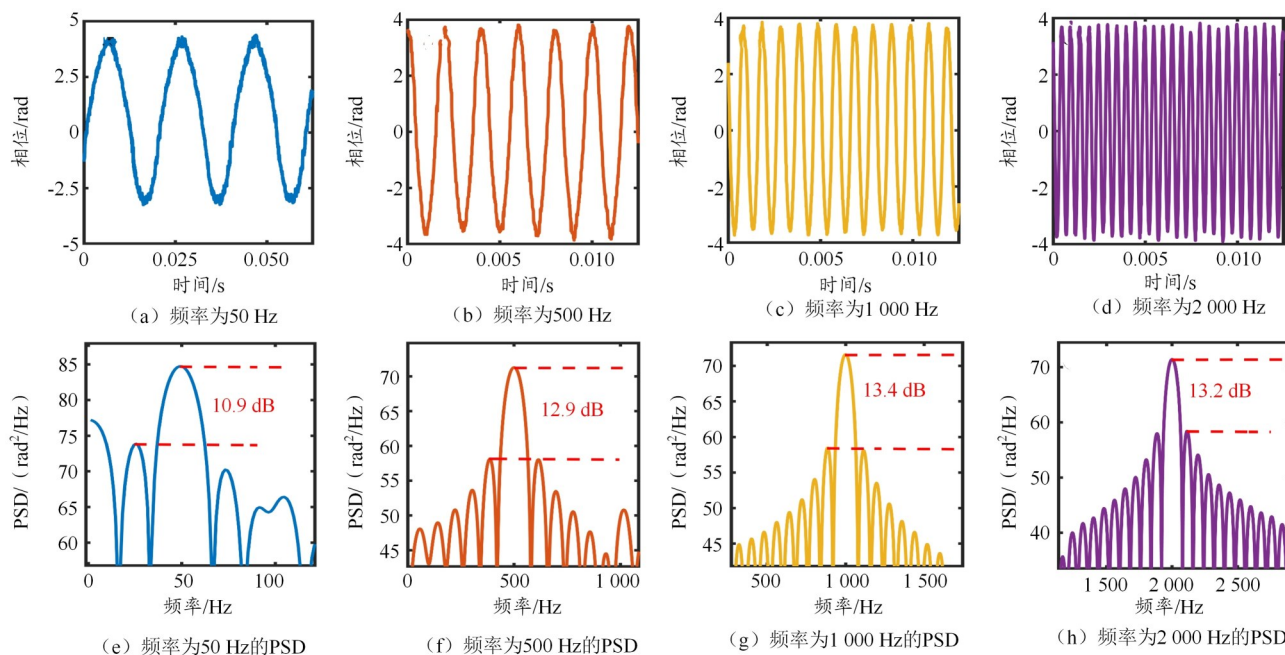


图8 不同频率振动信号的解调结果

樊迎瑞,王宇,梅若彤,等:移频双脉冲相干探测相位敏感光时域反射仪

动电压幅值从 1 V 增加到 10 V 时,解调相位幅值由 0.645 rad 上升至 3.640 rad。该拟合的决定系数  $R^2$  为 0.992 2,表明解调相位幅值与 PZT 驱动电压幅值之间具有良好的线性关系。实验结果验证了该系统在相位解调过程中具有良好的线性稳定性。

### 3 结束语

本文提出了一种移频双脉冲相干探测  $\Phi$ -OTDR 系统。该系统仅采用单个 AOM 对探测光进行移频调制,生成具有特定频率偏移的双频脉冲光,在简化系统结构、降低硬件成本的同时,实现了振动相位的低衰落正交解调。通过对 AOM 幅频响应特性及拍频信号频谱特征的分析,确定了最优化的双脉冲移频方案(70 MHz 和 90 MHz),并对获取的拍频信号进行了带通滤波、数据对齐及矢量叠加等正交解调处理。实验结果表明,该系统能够准确解调 50~2 000 Hz 内的振动信号,驱动信号幅值与解调相位幅值之间的线性拟合系数达 0.992 2,展现出良好的线性稳定性。在抗衰落性能方面,系统将相干衰落概率从传统单脉冲探测的 25.93% 降低至 8.28%,有效抑制了干涉衰落对振动信息提取的影响。该系统通过简洁的硬件结构和可靠的解调算法,提升了振动信息提取的准确性与可靠性,可有效降低漏报与误报概率,适用于对监测可靠性要求较高的周界安防及其他场景,为分布式光纤传感技术的工程化应用提供了参考方案。

### 参考文献:

- [1] Bao Xiaoyi, Chen Liang. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [2] Barrias A, Casas J R, Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 748.
- [3] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Continuous multicore optical fiber grating arrays for distributed sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(6): 1248-1252.
- [4] Chen Junfeng, Li Hao, Xiao Xiangpeng, et al. Fully distributed fiber-optic streamer with small channel spacing for marine seismic acquisition[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294: 116852.
- [5] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5778.
- [6] Duan Yuxing, Liang Lei, Tong Xiaoling, et al. Application of pipeline leakage detection based on distributed optical fiber acoustic sensor system and convolutional neural network[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, 57(10): 105102.
- [7] Fu Shichong, Zhang Dan, Peng Yang, et al. A simulation of gas pipe-

line leakage monitoring based on distributed acoustic sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(9): 095108.

[8] Ding Zhewen, Zhang Xuping, Zou Ningmu, et al. Phi-OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 5163-5169.

[9] Riedel M, Cosma C, Enescu N, et al. Underground vertical seismic profiling with conventional and fiber-optic systems for exploration in the Kylylahti polymetallic mine, eastern Finland[J]. *Minerals*, 2018, 8(11): 538.

[10] Liu Yifan, Li Chao, Chen Yichi, et al. Voiceprint and position information detection of non-cooperative ship with  $\Phi$ -OTDR and suspended sensitized optical cable[J]. *Optics Express*, 2024, 32(10): 17362-17372.

[11] 单一男,马智锦,曾旭,等.基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 1-9.

[12] Lu Yuelan, Zhu Tao, Chen Liang, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.

[13] 王宇,王俊虹,梁斌,等.基于光纤移频延时环的  $\Phi$ -OTDR 信号衰落抑制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(11): 23-30.

[14] Wang Yu, Ding Kai, Xu Yuelin, et al. Optical fiber microphones based on twice envelope demodulation algorithm[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2019, 297: 111555.

[15] Ju Zhewu, Yu Zhijie, Hou Qingkai, et al. Low-noise and high-sensitivity  $\Phi$ -OTDR based on an optimized dual-pulse heterodyne detection scheme[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 1864-1870.

[16] Zhou Sha, Feng Hao, Zeng Zhoumo. Phase demodulation method in phase-sensitive OTDR without coherent detection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4831-4844.

[17] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(11): 115106.

[18] He Xiangge, Xie Shangran, Liu Fei, et al. Multi-event waveform-retrieved distributed optical fiber acoustic sensor using dual-pulse heterodyne phase-sensitive OTDR[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 442-445.

[19] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse  $\Phi$ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 687-701.

[20] Liu Shuaiqi, Shao Liyang, Yu FeiHong, et al. Quantitative demodulation of distributed low-frequency vibration based on phase-shifted dual-pulse phase-sensitive OTDR with direct detection[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 10096-10109.

[21] Jiang Yiluo, Gao Xilun, He Wenping, et al. Frequency multiplexed dual-pulse fiber-optic  $\Phi$ -OTDR for a fading-free distributed fiber sound sensor[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(19): F59-F66.

[22] Cheng Yafeng, Wang Hanyong, Ming Changpeng, et al. Frequency-modulated dual-pulse phase-sensitive optical time-domain reflectometry with direct detection[J]. *Optics Communications*, 2025, 575: 131309.

[23] Wang Zinan, Zhang Li, Xue Naitian, et al. Coherent  $\Phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853-858.