

文章编号: 1002-1582(2025)04-0497-07

移频双脉冲调制相位敏感光时域反射传感技术

樊迎瑞¹, 王宇^{1*}, 张硕¹, 王俊虹¹, 王鹏飞², 刘昕², 靳宝全^{2,3}

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 太原理工大学 电子信息工程学院, 山西 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)

摘 要: 相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)因多采用相干探测方式而需要极高的采样频率。为了降低系统采样频率, 提出一种移频双脉冲调制直接探测 Φ -OTDR系统, 通过声光调制器时延变频控制产生频移量分别为79MHz和81MHz的移频双脉冲光, 将瑞利散射信号调制到差频为2MHz的边带上, 并结合外差解调技术, 将系统采样频率降低至10MHz。采用马赫-曾德尔干涉结构验证了移频的有效性, 并在10MHz采样频率下成功实现了200Hz、500Hz、1000Hz和2000Hz振动信号的精确解调。重复性实验中, 线性拟合系数达到0.9989, 验证了系统在低采样频率条件下振动信号解调的稳定性, 为降低 Φ -OTDR系统的硬件成本和数据处理量提供了有效的技术解决方案。

关 键 词: 分布式光纤传感; Φ -OTDR; 移频双脉冲; 外差解调; 低采样频率

中图分类号: TH89; TN29

文献标识码: A

Frequency-shifted dual pulse modulation phase-sensitive optical time-domain reflectometer sensing technology

FAN Yingrui¹, WANG Yu^{1*}, ZHANG Shuo¹, WANG Junhong¹,
WANG Pengfei², LIU Xin², JIN Baoquan^{2,3}

(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)

Abstract: Phase-sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR) requires extremely high sampling frequency because it mostly adopts the coherent detection method. In order to reduce the sampling frequency of the system, a frequency-shifted dual pulse modulation direct detection Φ -OTDR system is proposed. The frequency-shifted dual pulse light with frequency shifts of 79 MHz and 81 MHz, respectively, was generated by the time-delay frequency conversion control of the acousto-optic modulator to modulate the Rayleigh backward scattering signal onto the sidebands with a heterodyne frequency of 2 MHz. And the system sampling frequency is reduced to 10MHz by combining with the heterodyne demodulation technique. The validity of the frequency shift is verified by using the Mach-Zehnder interferometer structure, and the accurate demodulation of the vibration signals of 200Hz, 500Hz, 1000Hz, and 2000Hz is successfully realised at the sampling frequency of 10MHz. In the repeatability experiment, the linear fitting coefficient reaches 0.9989, which verifies the stability of the sys-

收稿日期: 2025-01-04; 收到修改稿日期: 2025-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(62375197); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2024C002); 山西省重点研发计划项目(202102130501021); 山西省科技创新团队项目(201805D131003)

作者简介: 樊迎瑞(2000—), 女, 硕士研究生, 从事光纤传感研究。fanyingrui1118@link.tyut.edu.cn。

王宇(1986—), 男, 教授, 博士, 从事光纤传感研究。

* 通讯作者: wangyu@tyut.edu.cn

tem for vibration signal demodulation under low sampling frequency conditions, and provides an effective technical solution to reduce the hardware cost and data processing capacity of the Φ -OTDR system.

Keywords: distributed optical fiber sensing; Φ -OTDR; frequency-shifted dual pulse; heterodyne demodulation; low sampling frequency

0 引 言

分布式光纤传感具有集传输与传感为一体的优点^[1], 传播距离长, 应用范围广, 可用于管道保护、电力监测、地震声波监测、轨道交通等领域^[2-7]。其中, 相位敏感光时域反射仪 (phase-sensitive optical time-domain reflectometer, Φ -OTDR) 以其长传感距离、高灵敏度、高信噪比的优势, 应用前景十分广阔^[8-10]。

Φ -OTDR 包括直接探测和相干探测两种方案。相干探测方案通过引入本振光, 在接收端将瑞利后向散射 (Rayleigh Backward Scattering, RBS) 光与本地光进行拍频实现对振动信号的还原^[11]。其通常采用单脉冲进行探测, 为了获得高质量的原始数据以进行有效解调, 系统对采集卡的要求较高, 高达几百 MHz 至 GHz^[11-15]。高采样频率会增加 Φ -OTDR 系统的硬件成本, 限制其广泛应用。

传统的直接检测方案主要计算 RBS 信号的幅度, 难以提取相位信息。研究人员提出了基于双脉冲探测的直接检测方案, 实现了 RBS 信号相位信息的提取。2014 年, 俄罗斯科学院的 Alekseev A 等通过添加电光相位调制器实现了相移双脉冲 Φ -OTDR 方案, 利用相位分集技术对光纤外部扰动信号进行解调和重建^[16]。2022 年, 南方科技大学的邵理阳等人使用直接检测 Φ -OTDR, 通过相移双脉冲实现对外部低频振动的定量解调^[17]。

双脉冲外差探测结构是降低系统采样频率的有效途径。2017 年, 北京大学的张敏等提出了一种双脉冲外差 Φ -OTDR 系统, 使用两个声光调制器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) 产生了两个不同频率偏移的脉冲, 外差频率为 50kHz, 采样频率为 20MHz^[18]。该方案虽然实现了较低的采样的采样频率, 但采用两个 AOM 增加了硬件成本, 且过低的差频信号容易受到激光频漂等低频噪声干扰, 增大了信号解调的复杂度。2018 年, 电子科技大学的饶云江等采用双脉冲外差方案构建了分布式光纤地震波传感系统, 两个声光调制器的差频为 20MHz, 采样频率为 100MHz^[19]。该方案差频较高, 可以避免低频噪

声的干扰, 但其同样使用了两个 AOM, 并且较高的外差频率需要更高的采样频率, 进一步增加了系统的硬件成本。2020 年, 国防科技大学的路阳等利用单个声光调制器实现了双脉冲外差系统, 差频为 12.5kHz, 采样频率为 100MHz^[20]。虽然该方案仅使用一个 AOM, 但其差频较低, 且引入了不平衡干涉仪, 使得系统结构更加复杂。上述外差频率优化方法可以实现更低的采样频率, 为 Φ -OTDR 采样频率的降低做出了重要贡献。

然而, 现有研究仍存在系统复杂性高、硬件成本高以及噪声干扰等问题。为此, 本文提出了一种基于移频双脉冲调制的低采样频率 Φ -OTDR 系统, 通过单个声光调制器生成移频双脉冲光, 简化了系统结构, 且将采样频率降低了至 10MHz。系统将 RBS 信号调制到 2MHz 的差频边带, 有效避免了低频噪声的干扰。为确保振动信号能够有效还原, 系统采用了 10MHz 的采样频率进行信号解调。实验结果表明, 系统在 10MHz 的采样频率下, 成功对 200Hz、500Hz、1000Hz 和 2000Hz 振动信号实现了精确解调, 验证了系统在低采样频率下的振动检测能力, 为 Φ -OTDR 在实际工程中的进一步应用提供有效方案。

1 原理分析

1.1 移频双脉冲干涉原理

脉冲光注入到待测光纤中后, 会激发脉宽范围内的 RBS 光。RBS 光通过光电转换可以用于振动信号的检测与分析。利用光时域反射原理, 通过分析 RBS 光强突变的位置, 可以实现对振动信号的检测。

移频双脉冲调制 Φ -OTDR 系统原理如图 1 (a) 所示。频率分别为 f_A 、 f_B 的两个脉冲 (脉冲 A 和脉冲 B) 依次被发射至待测传感光纤中。这两个脉冲具有相同的脉宽, 脉冲 B 相对脉冲 A 延迟 Δt 的时间。假设传感光纤由若干厚度为 Δs 的级联片组成, 对于单个的脉冲信号, 在位置 $L = l\Delta s$ 处的后向散射信号 $E(L)$ 可以表示为^[1]

$$E(L) = E_0 \sum_{n=l}^{l+N-1} (\eta_n \beta_n e^{j\zeta_n} e^{j\varphi_n} \cdot e^{-\alpha n \Delta s}) \quad (1)$$

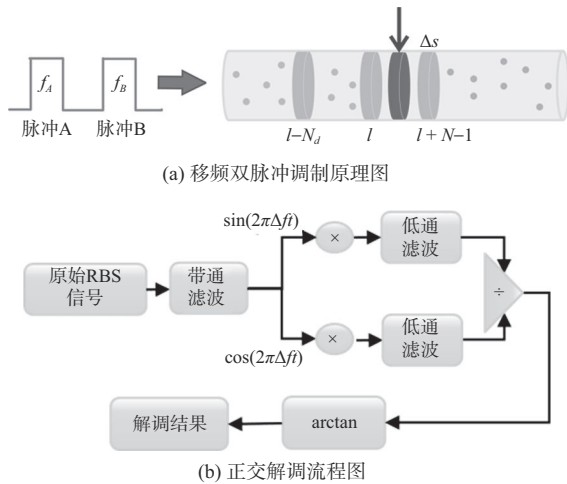


图1 移频双脉冲调制原理图与正交解调流程图

式中 E_0 为入射光的振幅; α 为光纤衰减系数; η_n 为脉冲第 n 片的偏振衰减系数; β_n 为脉冲第 n 片的瑞利散射截面; ζ_n 为光脉冲通过该点的相位延迟; φ_n 为振动引起的第 n 片动态相位变化。 N 为单个脉冲所通过级联片的总数。式 (1) 可以简化为

$$E(L) = I_l e^{j\phi_l} \quad (2)$$

式中, $I_l = E_0 e^{-\alpha L} \eta_l \beta_l e^{j\zeta_l}$, ϕ_l 表示在该位置外界振动所引起的相位的总变化, 如果脉冲 A 和脉冲 B 具有足够长的脉宽, 两脉冲之间间隔 N_d 个级联片, 则探测到的 RBS 光可以表示为

$$E(L) = I_l e^{j\phi_l} e^{j(2\pi f_A t + \varphi_A)} + I_{(l-N_d)} e^{j\phi_{(l-N_d)}} e^{j(2\pi f_B t + \varphi_B)} \quad (3)$$

φ_A 和 φ_B 为两个脉冲的初始相位。式 (3) 的交流成分可以表示为

$$A(t) = I \cos[2\pi\Delta f t + \psi(t) + \Delta\varphi_0] \quad (4)$$

式中, $I = |I_l I_{(l-N_d)}|$; $\Delta f = f_A - f_B$ 为外差频率; $\Delta\varphi_0 = \varphi_A - \varphi_B$ 为 l 位置处双脉冲信号携带的初始相位差; $\psi(t) = \phi_l - \phi_{(l-N_d)}$ 为外界振动引起的相位变化。

1.2 移频双脉冲解调算法

如图 1 (b) 所示为移频双脉冲调制 Φ -OTDR 系统解调流程图。根据双脉冲干涉原理, 所获得的信号频谱是以脉冲 A 和脉冲 B 的频率差 Δf 为中心进行展宽的, 因此可以通过外差解调算法来进行分析。

采集到的原始 RBS 信号首先经带通滤波器滤除噪声, 保留频率为 Δf 的差频成分。之后将其分别与 $\sin(2\pi\Delta f t)$ 、 $\cos(2\pi\Delta f t)$ 相乘进行数字混频处理, 得到 I、Q 两路正交分量, 即

$$S_I(t) = I \cos[2\pi\Delta f t + \psi(t) + \Delta\varphi_0] \times \cos(2\pi\Delta f t) \quad (5)$$

$$S_Q(t) = I \cos[2\pi\Delta f t + \psi(t) + \Delta\varphi_0] \times \sin(2\pi\Delta f t) \quad (6)$$

数字混频后得到的两路正交分量 $S_I(t)$ 、 $S_Q(t)$ 均包含一个二倍频分量和一个零频分量。其中, 零频分量携带有用的振动信息, 而二倍频分量则属于无用信息。因此需要使用低通滤波器对二倍频分量进行滤除, 保留所需的零频分量, 滤波后的结果如下

$$S_I(t) = \frac{1}{2} I \cos[\psi(t) + \Delta\varphi_0] \quad (7)$$

$$S_Q(t) = \frac{1}{2} I \sin[\psi(t) + \Delta\varphi_0] \quad (8)$$

最后, 对两路信号进行反正切求解就可以得到相位信息, 表示为

$$\psi(t) = \arctan\left(\frac{S_Q(t)}{S_I(t)}\right) - \Delta\varphi_0 \quad (9)$$

2 实验系统

系统实验装置如图 2 所示。采用窄线宽激光器作为光源, 产生波长为 1550nm 的激光。由任意波形发生器 (Arbitrary Waveform Generator, AWG) 驱动 AOM, 生成具有指定频移与时延的探测脉冲。脉冲光在经过掺铒光纤放大器进行功率放大后, 经过 1550nm 的密集波分复用器实现光学滤波。滤波后的脉冲光通过环形器的端口 1 注入待测传感光纤中, 返回的 RBS 光经环形器的端口 3 输出, 并由带宽为 200MHz 的光电探测器进行光电转换后进行强度检测。为防止菲涅尔反射, 在待测传感光纤的末端连接了光隔离器。光电探测器输出的模拟信号经数据采集卡转换成数字信号, 传回主机后进行数据处理。

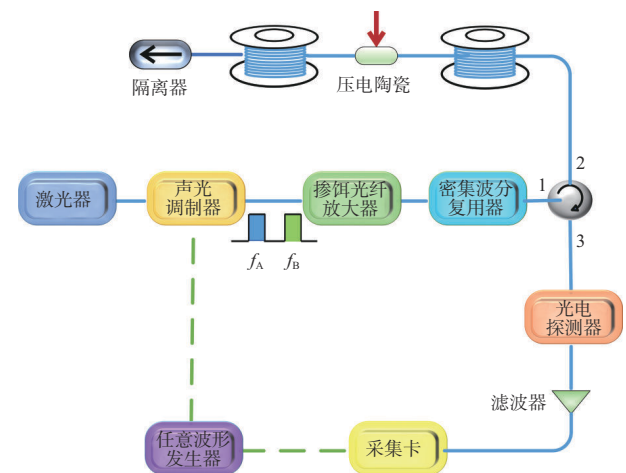


图2 实验系统结构图

实验中, 传感光纤总长度为 600m, 包括利用压电陶瓷换能器 (Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT) 连接的两段长度分别为 100m 与 500m

的光纤。PZT上缠绕的光纤长度为2m，通过向其施加标准正弦信号以模拟待测传感光纤受到的外部扰动。AWG向声光调制器提供重复频率为80kHz、脉宽为100ns的双脉冲信号作为驱动，其中脉冲间隔为500ns，频率分别为79MHz和81MHz。脉冲光的调制和数据采集的触发均由AWG实现，保证信号调制与采集的同步。

3 实验结果

基于上述结构展开实验。探测脉冲信号如图3所示。两个脉冲脉宽均为100ns，频率分别为79MHz和81MHz，间隔500ns，将其通过功率放大器放大后作为驱动信号驱动声光调制器。激光器产生的连续光经声光调制器调制后成为移频双脉冲光，如图4所示，可以看到第二个脉冲相对第一个脉冲有500ns的延迟。

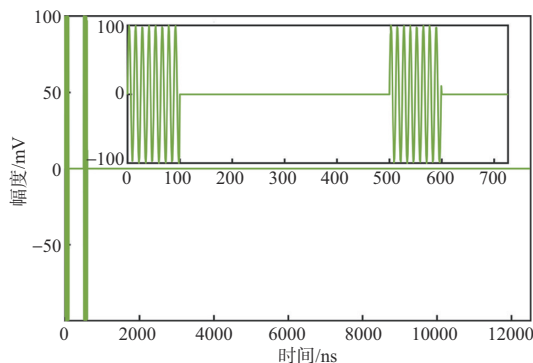


图3 探测脉冲信号

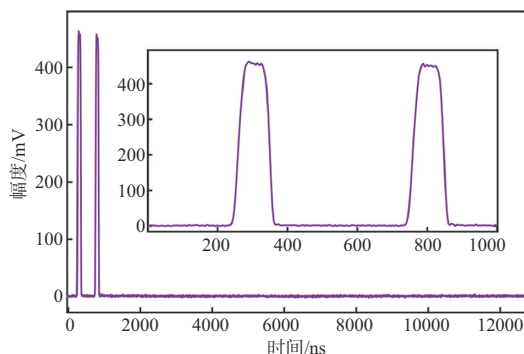
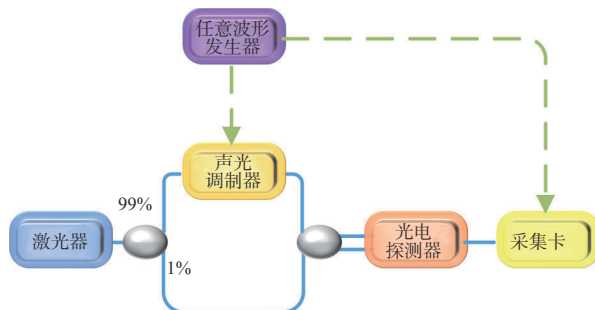
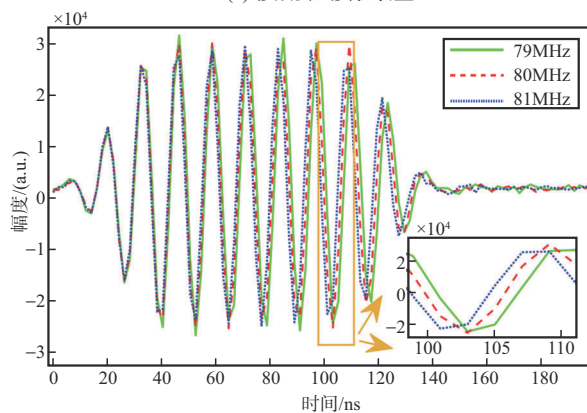


图4 调制后的脉冲光信号

为了测试所提出的移频脉冲调制方法的有效性，搭建了如图5(a)所示的实验装置。激光器发出的激光通过光耦合器(1:99)被分成两束。这两束光形成一个马赫-曾德尔干涉仪，其中一束光经过AOM进行调制，而另一束光则作为参考光。两束光通过一个耦合器进行混合后，使用光电探测器进行光电转换，由采集卡对拍频结果进行采集。通过观察拍频结果以验证移频结果的有效性。



(a) 移频测试实验装置



(b) 移频结果

图5 移频测试实验装置与结果

使用AWG产生脉宽100ns、频率分别为79MHz、80MHz、81MHz的脉冲信号，通过功率放大器放大后驱动声光调制器。与另一路的本振光拍频后的信号如图5(b)所示。图中实线(79MHz)、虚线(80MHz)、点线(81MHz)为不同频率驱动声光调制器后的拍频结果。从放大的插图中可以明显看出三者的差异，证明成功获得了所需要的频率信号。

首先通过PZT向传感光纤施加频率1000Hz、幅度10V信号的正弦信号。当探测脉冲在光纤中向前传播时，将不断激发光纤上不同位置处的瑞利后向散射光信号。产生的瑞利后向散射光信号会经过同样的路程再返回到光电探测器，因此每发送一个探测脉冲，即可获得一条对应的后向散射曲线。

图6是采集到的距离-时间二维数据矩阵图，显示了移频双脉冲调制 Φ -OTDR系统获得的5条连续的原始RBS曲线。在每次测量中，采集1000条RBS曲线(对应时间为12.5ms)，然后在距离轴上选取某一固定位置沿时间轴提取相应的数据点，进一步应用正交解调算法来对振动信号进行还原。

对图6中的一条原始RBS信号进行傅里叶变换分析其频谱特性，结果如图7(a)所示。为了观察低频噪声的影响，对单脉冲直接探测方案下

的低频分量进行了分析,如图7(b)所示。结果显示,激光频漂等低频噪声的频谱主要集中在1MHz以下,表明低频噪声在1MHz以下频段具有显著的能量分布。因此,将RBS信号调制到2MHz的差频边带能够有效避免其与低频噪声的混叠,从而提高信号解调的可靠性。

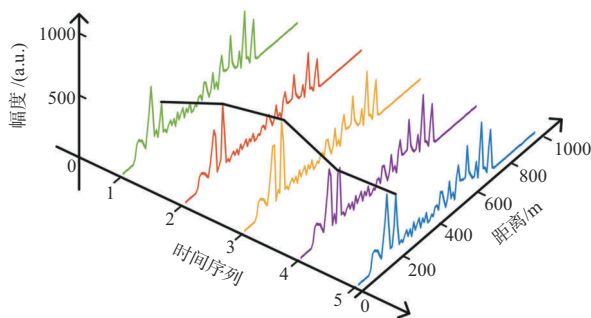


图6 距离—时间二维数据矩阵图

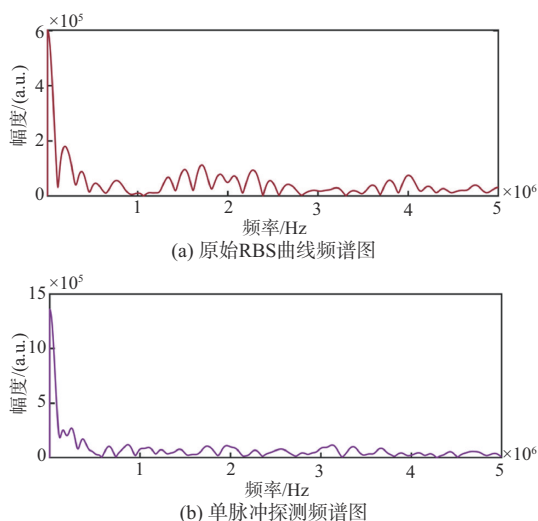


图7 原始RBS曲线频谱图和单脉冲探测频谱图

根据奈奎斯特采样定理,采样频率需高于差频的两倍,以避免混叠现象。本文中,拍频信号的频率为2MHz,因此理论上采样频率需大于4MHz。然而,如图7(a)所示,差频边带信号的频率分量扩展至3MHz,这表明仅满足最低采样频率要求可能无法完整提取信号的有效信息。为了更完整地捕捉差频边带信号的频率分量,并确保带通滤波的精度,将系统采样频率设定为10MHz,以确保振动信号能够被有效还原。

图8为50条RBS曲线叠加的结果,可以看到叠加曲线在160~230m处明显的不重叠现象,在其他位置处则高度重合,这一点可以从放大的示意图明显地观察到。进一步观察图9(a)中由1000条曲线构成的瀑布图。由于探测脉冲的重频为80kHz,即间隔时间为12.5 μ s,可以看到1000条曲线对应12.5ms。对1至4ms的时间区间进行局部放

大观察,如图9(b)所示,可以看到在3ms的时间内发生了3次振动事件,即振动周期是1ms,对应的频率为1000Hz。

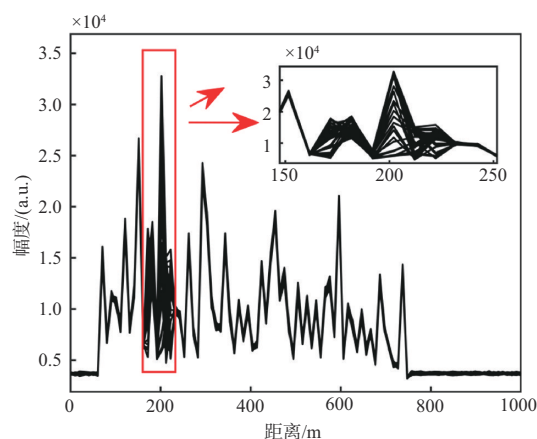


图8 多条RBS曲线叠加图

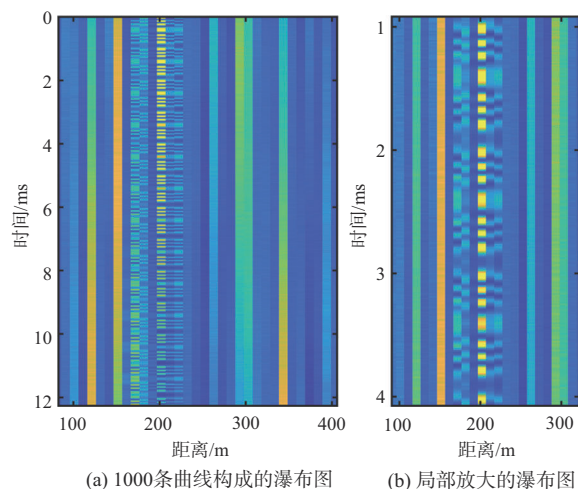


图9 瀑布图

采用正交解调算法进行数据处理,得到的结果如图10所示。图10(a)是解调后获得的相位曲线,可以看到规律的正弦信号波形,说明外部振动的时域变化可以通过解调后的差分相位结果很好地重建。对其进行傅里叶变换进一步观察其频率,结果如图10(b)所示。在放大的插图中可以看到频率成分为1000Hz,与实际所施加的正弦信号频率相符。

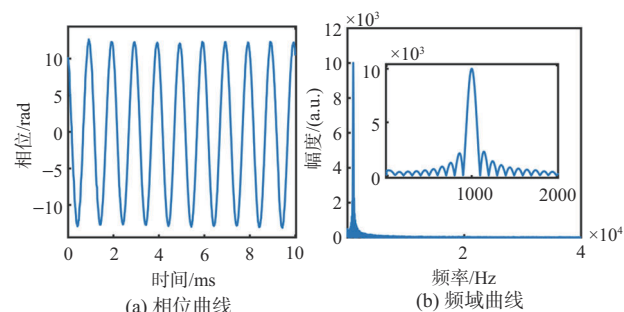


图10 1000Hz振动的解调结果

向 PZT 施加峰值电压为 10V 的不同频率正弦信号, 结果如图 11 和 12 所示。图 11 (a) 为 200Hz 振动信号的相位曲线, 图 12 (a) 的功率谱密度曲线 (Power Spectrum Density, PSD) 中 200Hz 处频率分量的信噪比为 9.47dB。图 11 (b) 为 500Hz 振动信号的相位曲线, 图 12 (b) 的 PSD 中 500Hz 处频率分量的信噪比为 11.94dB。图 11 (c) 为 1000Hz 振动信号的相位曲线, 图 12 (c) 的 PSD 中 1000Hz 处频率分量的信噪比为 12.80dB。图 11 (d) 为 2000Hz 振动信号的相位曲线, 图 12 (d) 的 PSD 中 2000Hz 处频率分量的信噪比为 13.04dB。由图 11 和图 12 可以看出, 此系统可以解调振动信号的相位, 且从 PSD 曲线可知每一个振动频率上信噪比均大于 9dB, 证明此方法可以精确还原所施加的振动信号。

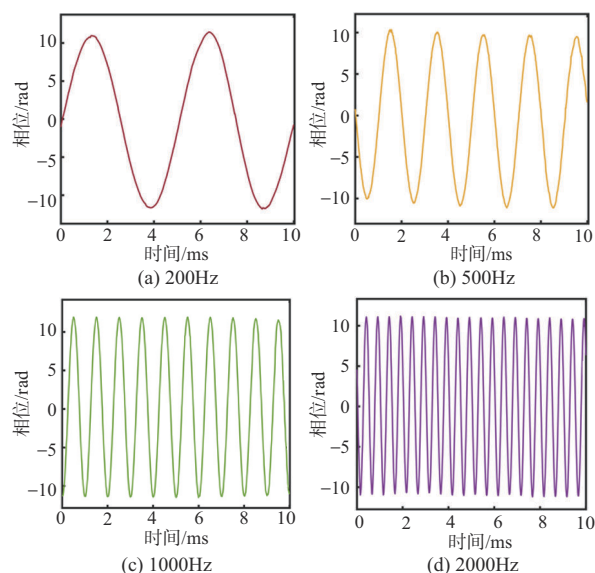


图 11 不同频率振动信号的相位曲线

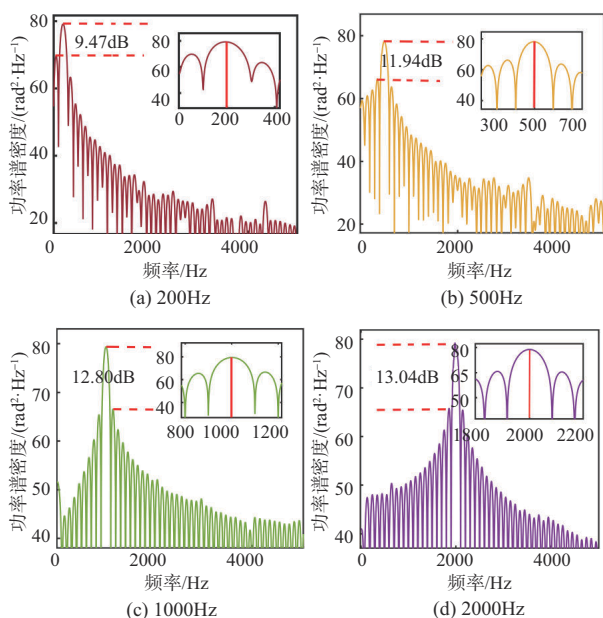


图 12 不同频率振动信号的功率谱密度曲线

随后, 幅度从 1V 到 10V 且以 1V 间隔变化的正弦信号依次驱动 PZT, 频率为 1000Hz, 并通过信号解调获取的相位曲线以进行线性拟合分析。图 13 展示了相位幅度与驱动信号幅度的关系图, 当正弦信号的幅度在 1V 至 10V 变化时, 相位曲线幅度在 1.60rad 至 10.48rad 变化, 线性系数 R^2 为 0.9989。由实验结果可得, 相位幅度与驱动信号幅度成正比, 该系统具有线性稳定的振动信号解调能力。

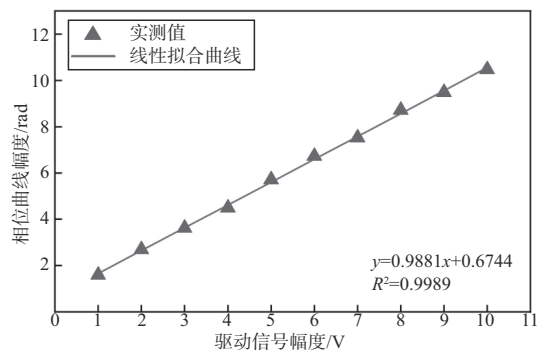


图 13 相位幅度拟合结果

4 结 论

单脉冲探测方案的 RBS 信号包含 1MHz 以下的低频噪声, kHz 级别的差频信号容易与低频噪声混叠, 给后续的解调分析带来困难。针对这一问题, 本文提出了一种移频双脉冲调制 Φ -OTDR 系统, 产生频移量分别为 79MHz 和 81MHz 的移频双脉冲光, 将 RBS 信号调制到 2MHz 的差频边带, 避免了低频噪声的干扰。结合双脉冲外差探测方法, 在 10MHz 的采样频率下, 对 200Hz、500Hz、1000Hz 和 2000Hz 的振动波形进行了解调, 相位幅度与驱动信号幅度的线性拟合系数达到 0.9989, 验证了系统在低采样频率下的振动检测能力。

参考文献:

- [1] Li P H, Wang Y, Wang P F, et al. Pulse coding in distributed optical fiber vibration sensor: A Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 22371—22387.
- [2] Chen J F, Li H, Xiao X P, et al. Fully distributed fiber-optic streamer with small channel spacing for marine seismic acquisition[J]. Ocean Engineering, 2024, 294:116852.
- [3] Duan Y X, Liang L, Tong X L, 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.
- [4] Fu S C, Zhang D, Peng Y, et al. A simulation of gas pipeline leakage monitoring based on distributed acoustic sensing[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(9):095108.
- [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] Ding Z W, Zhang X P, Zou N M, et al. Phi-OTDR based on-

- line monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15):5163—5169.
- [7] 王大伟, 封皓, 杨洋, 等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(04): 830—837.
- Wang Dawei, Feng Hao, Yang Yang, et al. Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(04):830—837.
- [8] Liu X, Jin B Q, Bai Q, et al. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection[J]. Sensors, 2016, 16(8):1164.
- [9] He H J, Shao L Y, Li H C, et al. SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3):6802610.
- [10] Lu Y L, 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.
- [11] 王宇, 王俊虹, 梁斌, 等. 基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 信号衰落抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11):23—30.
- Wang Yu, Wang Junhong, Liang Bin, et al. Fading suppression method of Φ -OTDR signal based on optical fiber frequency-shifted delay loop[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11):23—30.
- [12] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(28):7810—7815.
- [13] He H J, Yan L S, Qian H, et al. Enhanced range of the dynamic strain measurement in phase-sensitive OTDR with tunable sensitivity[J]. Optics Express, 2020, 28(1):226—237.
- [14] Li H, Sun Q Z, Liu T, et al. Ultra-high sensitive quasi-distributed acoustic sensor based on coherent OTDR and cylindrical transducer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4):929—938.
- [15] Zhang L, Chen L, Bao X Y. Unveiling delay-time-resolved phase noise statistics of narrow-linewidth laser via coherent optical time domain reflectometry[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6719—6733.
- [16] 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.
- [17] Liu S Q, Shao L Y, Yu F H, 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.
- [18] He X G, Xie S R, Liu F, 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] 方欣栋. 分布式光纤地震波传感系统及勘探应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
- Fang Xindong. Distributed optical seismic wave sensing system and its application in exploration[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [20] Ju Z W, Yu Z J, Hou Q K, et al. Low-noise and high-sensitivity Φ -OTDR based on an optimized dual-pulse heterodyne detection scheme[J]. Applied Optics, 2020, 59(7):1864—1870.

(上接第496页)

- [10] Qiu L, Su Y, Xu K M, et al. A high-precision multi-dimensional microspectroscopic technique for morphological and properties analysis of cancer cell[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1):129.
- [11] Zhao W, Du S. Spectral - spatial feature extraction for hyperspectral image classification: A dimension reduction and deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8):4544—4554.
- [12] Mei X, Pan E, Ma Y, et al. Spectral-spatial attention networks for hyperspectral image classification[J]. Remote Sensing, 2019, 11(8):963.
- [13] Yu W, Zhang M, He Z, et al. Convolutional two-stream generative adversarial network-based hyperspectral feature extraction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60:1—10.
- [14] Wei L, Wang K, Lu Q, et al. Crops fine classification in airborne hyperspectral imagery based on multi-feature fusion and deep learning[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15):2917.
- [15] 郑宗生, 刘海霞, 王振华, 等. 改进3D-cnn的高光谱图像地物分类方法[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2):105—111.
- Zheng Zongsheng, Liu Haixia, Wang Zhenhua, et al. Improved 3D-CNN-based method for surface feature classification using hyperspectral images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2):105—111.
- [16] Hu W S, Li H C, Pan L, et al. Spatial-spectral feature extraction via deep ConvLSTM neural networks for hyperspectral image classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(6):4237—4250.
- [17] Chen H, Li J, Zhang J, et al. HSI-IPGAN: Hyperspectral image inpainting via generative adversarial network[A]. Research Square, 2023.
- [18] Hou J, Zhu Z, Hou J, et al. Deep posterior distribution-based embedding for hyperspectral image super-resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2022, 31:5720—5732.
- [19] Qu J, He J, Dong W, et al. S2CycleDiff: Spatial-Spectral-Bilateral Cycle-Diffusion Framework for Hyperspectral Image Super-resolution[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2024, 38(5):4623—4631.
- [20] Zhang Y, Li K, Li K, et al. Image super-resolution using very deep residual channel attention networks[M]. Ferrari V, Herbert M, Sminchisescu C, et al. Computer Vision - ECCV 2018. Cham: Springer International Publishing, 2018:294—310.
- [21] Horgan C C, Jensen M, Nagelkerke A, et al. High-throughput molecular imaging via deep-learning-enabled raman spectroscopy[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(48):15850—15860.
- [22] Zhang Y, Tian Y, Kong Y, et al. Residual dense network for image super-resolution[A]. arXiv, 2018.
- [23] Wang T D, Mandella M J, Contag C H, et al. Dual-axis confocal microscope for high-resolution in vivo imaging[J]. Optics Letters, 2003, 28(6):414—416.
- [24] Zhao W, Sun Y, Wang Y, et al. Three-dimensional super-resolution correlation-differential confocal microscopy with nanometer axial focusing accuracy[J]. Optics Express, 2018, 26(12):15759—15768.