

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240194.

光传感与检测技术

胡胜,李莎莎,李景琦,等.基于FPGA的 Φ -OTDR衰落抑制与相位解调[J].光通信研究,2026(3):130-136.

Hu S, Li S S, Li J Q, et al. FPGA-based Φ -OTDR Fading Suppression and Phase Demodulation [J]. Study on Optical Communications, 2026(3):130-136.

基于FPGA的 Φ -OTDR衰落抑制与相位解调

胡 胜,李莎莎,李景琦,何怡婷,李莹莹,陈 璇,宋海娜,刘 聪

(湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室,武汉 430068)

摘要:【目的】基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的分布式声传感是当前学术与产业界的热点,但是系统信号衰落与海量数据处理负担限制了其实际应用。为解决信号可靠性和实时性问题,文章提出基于现场可编程门阵列(FPGA)实现适用于长距离传感的实时分布式光纤声传感系统。【方法】在典型 Φ -OTDR中,仅额外增加一个相位调制器来产生功率均衡的多频探测光,并通过矢量旋转求和(RVS)方式将多路传感信号合并,从而抑制衰落效应。采用FPGA处理器执行抑制干涉衰落和解调相位信号的算法,包括有限长单位冲激响应(FIR)滤波、希尔伯特变换、RVS、反正切、解卷绕和相位差分等步骤,来实现实时的信号处理。【结果】实验表明,该系统在不同频率(0.5、1.0、2.0和4.0 kHz)条件下实现振动相位解调,信号衰落得到抑制,底噪约为 $-50\text{ dB}\cdot\text{rad}^2/\text{Hz}$,并达到了20 dB以上信噪比。【结论】实验结果验证了该系统及方法的有效性与可行性。与传统方法相比,该系统结构更加简洁,减少了硬件资源的占用。采用FPGA实现实时相位解调,相比于离线处理,提升了相位解调效率;同时,实现了实时衰落抑制,提高了相位解调精度。此外,在实验测试中,文章所提方案实现了10 km实时传感能力,使得该系统能够适应长距离、高速的传感需求,尤其在对实时性和可靠性要求较高的应用场景中具备广泛的应用前景。

关键词:相位敏感光时域反射仪;干涉衰落;实时性;现场可编程门阵列

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

FPGA-based Φ -OTDR Fading Suppression and Phase Demodulation

HU Sheng, LI Shasha, LI Jingqi, HE Yiting, LI Yingying, CHEN Xuan, SONG Haina, LIU Cong

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: 【Objective】 Distributed acoustic sensing based on Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry (Φ -OTDR) is a hot topic in both academic and industrial fields. However, signal fading and the heavy burden of large-scale data processing limit its practical applications. To address the issues of signal reliability and real-time performance, a real-time distributed fiber optic acoustic sensing system suitable for long-distance sensing is proposed based on Field-Programmable Gate Array (FPGA) implementation. 【Methods】 In a typical Φ -OTDR, only an additional phase modulator is introduced to generate multi-frequency probe light with balanced power. The multiple sensing signals are combined through Vector Rotation Summation (RVS) to eliminate fading effects. An FPGA processor executes the algorithms for suppressing interference fading and demodulating phase signals, including steps such as Finite Impulse Response (FIR) filtering, Hilbert transform RVS, arctangent calculation, phase unwrapping, and phase differentiation, enabling real-time signal processing. 【Results】 Experimental results demonstrate that the system can achieve phase demodulation of vibration signals under different frequencies (0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 kHz). Signal fading is effectively suppressed, with a noise floor of approximately $-50\text{ dB}\cdot\text{rad}^2/\text{Hz}$ and a Signal-to-Noise Ratio (SNR) exceeding 20 dB. 【Conclusion】 The experimental results validate the effectiveness and feasibility of the system and method. Compared to traditional methods, the system has a more streamlined structure and less hardware resource consumption. Using FPGA, real-time phase demodulation is realized, which improves the phase demodulation efficiency compared with offline processing. At the same time, real-time fading suppression is realized, which improves the phase demodulation accuracy. In addition, in the experimental test, the scheme proposed in this paper realizes 10 km real-time sensing, which makes the system able to adapt to long-distance and high-speed sensing requirements, especially in the application scenarios with high requirements for real-time and reliability.

Key words: Φ -OTDR; interference fading; real-time performance; FPGA

0 引 言

分布式光纤传感(Distributed Optical Fiber Sensing, DOFS)技术利用光纤监测外界参数^[1-4]。

然而,基于相位敏感光时域反射仪(Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry, Φ -OTDR)的DOFS容易受到干涉衰落的影响,若不加处理,可能导致误报。此外,系统在检测外界振动时,需要

收稿日期:2024-09-09; 修回日期:2024-10-14; 纸质出版日期:2026-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62202148)

作者简介:胡胜(1982—),男,湖南宁乡人。讲师,博士,主要研究方向为智能光电信号处理。

通信作者:刘聪,副教授。E-mail: 20141109@hbut.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

采集和处理大量数据,离线处理会影响系统的实时性。为了解决干涉衰落问题,已有研究人员提出了多种技术,如 π 相移脉冲技术^[5-7]、频分复用技术^[8-13]、频域调控技术^[14-16]及不受衰落影响的信息提取方法^[17-19]。这些方法有效提升了 Φ -OTDR 性能,但增加了系统复杂度和对资源的要求,影响实时处理能力。例如,频分复用需要级联多个声光调制器,频域调控需要调制复杂的信号,这些方法增加了系统复杂度。同时,频率复用或调控导致信号通道数目的增加,系统数据量随之翻倍,加剧了实时处理负担。针对实时数据处理,研究人员已开发了基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)和其他处理器的 Φ -OTDR 系统,以优化信号采集、处理和传输^[20-25]。这些成果提高了系统性能,但通常忽略了信号衰落问题。因此,开发利于实际应用的衰落抑制和相位解调方案,并结合 FPGA 处理以提高实时性,具有重要意义。

本文提出了一种基于相位调制的无衰落系统及其信号解调算法,并在 FPGA 平台上成功实现。开发了基于 FPGA 的数据采集和实时处理系统,实现了高速数据采集、衰落抑制和相位解调以及快速数

据传输。通过实验验证了衰落抑制方法在长距离传感中的有效性,并验证了 FPGA 算法处理的可行性。最终,该系统成功实现了振动信号的相位解调和实时监测,满足了工程应用的需求。

1 衰落抑制原理

本文提出了一种基于相位调制的外差检测 Φ -OTDR 系统,其原理如图 1 所示。窄线宽激光器(NKT Basik E15 系列)通过耦合器被分为探测和本振支路。在探测支路中,连续光经过相位调制器(iXBlue MPZ-LN-10)和声光调制器(中国电科 SGTF80-1550-1P),调制成具有多个频率分量的脉冲光。掺铒光纤放大器(筱晓光子 EDFA-C-M-23-SA)用于增强光信号,带通滤波器(光迅科技 BPF-1550-0.8-BF)用于滤除放大器的自发噪声。再通过环行器进入 10 km 的传感光纤,尾端 10 m 光纤缠绕在压电换能器上以模拟振动。在本振支路中,本振光作参考光源。其与信号光经偏振分集探测器(筱晓光子 PDR-100M-A)接收,该探测器分别将两束光的正交偏振态进行相干,以解决偏振衰落的问题,再通过双通道数据采集卡实时采集处理。

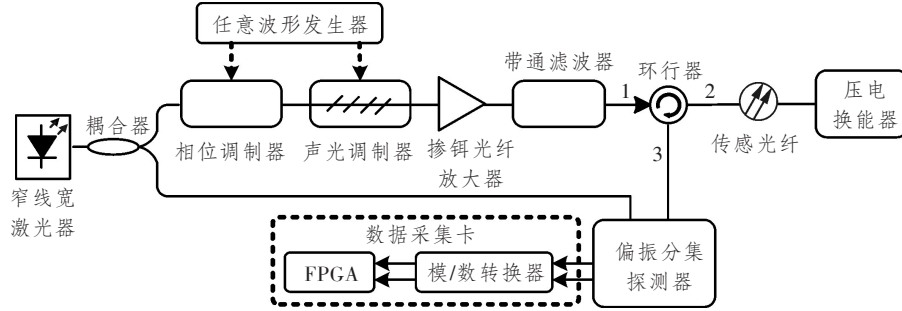


图 1 基于相位调制的 Φ -OTDR 系统框图

Figure 1 Block diagram of the phase modulation-based Φ -OTDR system

对于单脉冲 Φ -OTDR,散射光频谱呈 sinc 形。为了降低噪声,通常只保留 sinc 的主瓣,旁瓣会被滤掉。但实际上,旁瓣和主瓣都包含外部信息,滤掉旁瓣实际上导致了频带资源的浪费。通过引入相位调制器,调制旁瓣强度,使偏振分集探测器接收到的信号频谱如图 2 所示。相位调制器产生的 t 时刻调制信号 $\varphi(t)$ 可表示为^[26]

$$\varphi(t) = \frac{V}{V_\pi} \pi \cos(2\pi f_s t), \quad (1)$$

式中: f_s 为调制频率; V 为调制电压; V_π 为半波电压。由激光器发射并经相位调制器和声光调制器调制后的脉冲信号 $pulse$ 在时域上可以表示为^[14]

$$pulse = \exp[j2\pi f_A t + j\varphi(t)], \quad (2)$$

式中: f_A 为声光调制器的调制频率; j 为虚数单位。脉冲信号可以用贝塞尔函数 J_0, J_1 展开,得到如下公式:

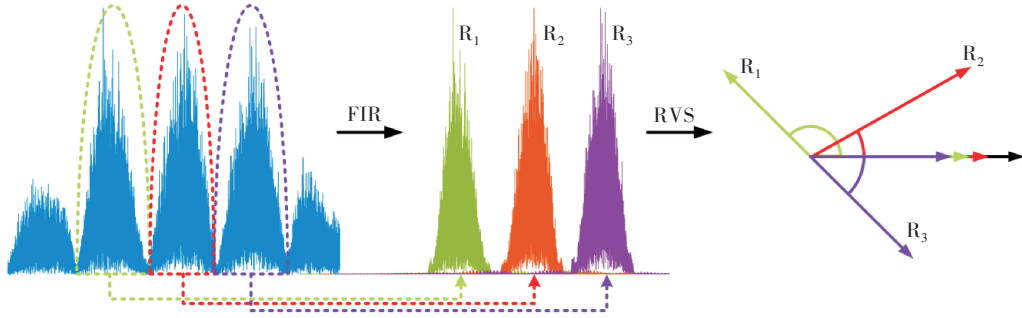
$$\begin{aligned} pulse &= \exp(j2\pi f_A t) \cdot \exp\left[j \frac{V}{V_\pi} \pi \cos(2\pi f_s t)\right] \\ &= \exp(j2\pi f_A t) \cdot \left[J_0\left(\frac{V}{V_\pi} \pi\right) + \right. \\ &\quad \left. 2jJ_1\left(\frac{V}{V_\pi} \pi\right) \cos(2\pi f_s t) \right] \\ &= J_0\left(\frac{V}{V_\pi} \pi\right) \exp(j2\pi f_A t) + 2jJ_1\left(\frac{V}{V_\pi} \pi\right) \times \\ &\quad \{ \exp[j2\pi(f_A - f_s)t] + \exp[j2\pi(f_A + f_s)t] \} \end{aligned} \quad (3)$$

如图 2 所示,在相位调制后,偏振分集探测器接收到的信号通过与主瓣宽度一致的滤波器,按间隔

均匀的频率依次提取出 3 个子带 R_1 、 R_2 和 R_3 。然后,利用旋转矢量求和 (Rotated - Vector - Sum, RVS)方法将这 3 个子带进行合并。考虑系统向光纤中注入 K 个探测脉冲,RVS 方法合成结果 $R(k,t)$ 可表示为^[27]

$$R(k,t) = \sum_{m=-1}^1 R_m(k,t) \cdot \frac{R_m^*(1,t)}{|R_m(1,t)|}, k=1, \dots, K, \quad (4)$$

式中, $R_m(k,t)$ 为第 m 边带对应的复信号, $R_m^*(1,t)$ 为第 1 个探测脉冲得到的信号 $R_m(1,t)$ 的共轭信号。



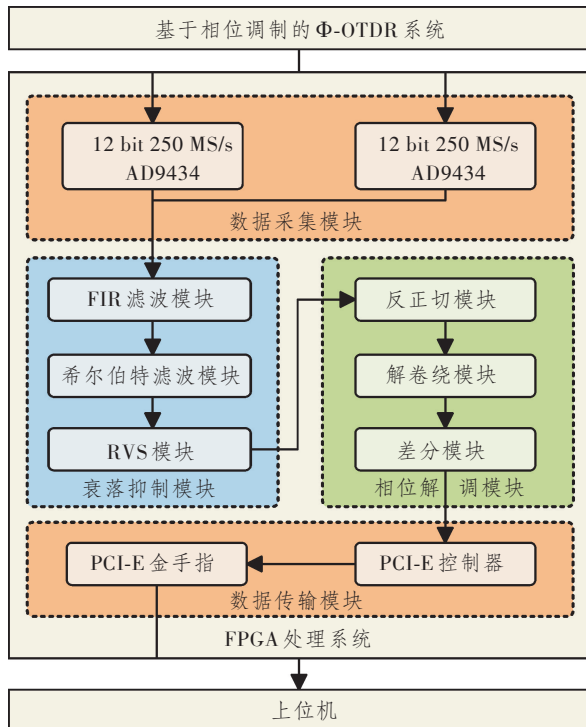
注:FIR 为有限长单位冲激响应。

图 2 衰落抑制方法原理图

Figure 2 Schematic diagram of the fading suppression method

2 实现框架

如图 3 所示,基于 FPGA 的处理系统包括数据采集、衰落抑制、相位解调和数据传输 4 大模块。衰落抑制模块进一步细分为 FIR 滤波、希尔伯特滤波和 RVS 模块;相位解调模块则包括反正切、解卷绕和差分模块。



注:PCI-E 为外设组件互连高速总线。

图 3 基于 FPGA 的衰落抑制和相位解调原理框图

Figure 3 Block diagram of FPGA-based fading suppression and phase demodulation principle

2.1 数据采集模块

Φ -OTDR 系统信号由两路 12 位、250 MS/s 的 AD9434 采集。系统用偏振分集探测模块解决相干偏振衰落。该模块能够将本振光与信号光的两个偏振态分别进行相干处理,再使用两路 AD9434 接收。AD9434 输出的数据和时钟信号传输至 FPGA。FPGA 接收到触发信号后,将传输一帧数据至衰落抑制模块进行计算。

2.2 衰落抑制模块

该模块先通过 FIR 滤波器将信号分解为不同频率成分,再使用希尔伯特变换获得各自正交分量,最后,通过 RVS 模块将这些分解后的频率成分重新组合。

2.2.1 FIR 滤波模块

FIR 滤波后的信号 $e_{\text{FIR}}(t)$ 可以描述为拍频信号与滤波系数卷积的过程:

$$e_{\text{FIR}}(t) \propto e_{\text{Beat}}(t) * \text{Filter}(t), \quad (5)$$

式中: $e_{\text{Beat}}(t)$ 为拍频信号; $*$ 为卷积符号; $\text{Filter}(t)$ 为 FIR 滤波系数。

数据采集模块接收的两路信号分别经过 3 个 FIR 滤波单元模块,被分解成 3 个频率段。FIR 滤波单元模块的通带宽度相同,由脉冲主瓣宽度决定;中心频率由声光调制器的频移决定。 Φ -OTDR 脉宽为 100 ns,其主瓣宽为 20 MHz,因此滤波的带宽定为 20 MHz。以声光调制器移频为 80 MHz 为例,3 个 FIR 滤波单元模块提取的频率分别为 50~70、70~90 和 90~110 MHz。为了获得更好的滤波性能,系统中采用了阶数为 251 的 FIR 滤波器。

考虑到 FIR 滤波系数呈偶对称, FIR 滤波单元模块可以将对称信号相加, 以减少乘法器的使用。再将滤波系数和对应的信号相乘。最后, 将所有乘法结果相加, 以高效完成滤波操作。

2.2.2 希尔伯特滤波模块

希尔伯特变换得到信号的正交分量, 用于分析信号的相位信息。实现方法同样是卷积滤波:

$$e_{\text{HIL}}(t) \propto e_{\text{FIR}}(t) * \text{Hilbert}(t), \quad (6)$$

式中: $e_{\text{HIL}}(t)$ 为滤波后的信号; $\text{Hilbert}(t)$ 为希尔伯特滤波系数。

希尔伯特滤波模块的处理过程与 FIR 滤波相似, 区别在于其系数是奇数对称。在计算过程中, 对对称信号相减后再与滤波系数相乘。

2.2.3 RVS 模块

利用 RVS 方法进行频谱再组合, 增强原信号的强度, 以抑制干涉衰落。

如图 4 所示, 对希尔伯特变换的输出执行复共轭乘法。参考帧根据配置的复共轭周期进行选择, 每周期的第 1 帧为参考帧。参考帧经过复共轭处理后存在缓存器中, 随后与其他帧相乘, 最后利用加法器将相乘结果相加, 得到同相分量 R_{q} 和正交分量 R_{i} 。

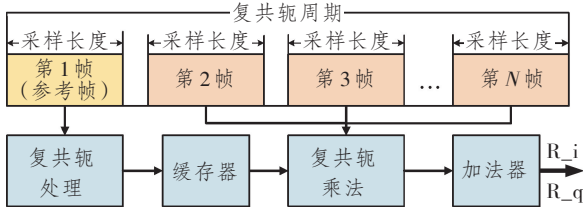


图 4 RVS 模块

Figure 4 RVS module

2.3 相位解调模块

相位解调模块进行反正切运算, 得到相位信息。由于反正切可能引起相位跳变, 需要进一步处理以获得平滑的相位曲线。此外, 通过计算相邻相位的差值, 最终成功解调出精确的相位信息。

2.3.1 反正切模块

该模块采用 Xilinx 提供的 CORDIC 知识产权 (Intellectual Property, IP) 核进行反正切运算操作。为了降低资源消耗, 并满足 IP 核的位宽要求, 需对合并后的同相分量和正交分量进行归一化处理。此时, 获取的相位信号范围是 $[-\pi, \pi]$, 存在相位跳变, 还需要进一步解卷绕处理才能获得平滑的相位曲线。

2.3.2 解卷绕模块

解卷绕是对反正切相位信号加入或减去相应倍数的 2π , 从而得到平滑连续的相位信号。这一过程

可用公式表示为

$$\varphi_i(t) = \phi_i(t) + N, \quad (7)$$

式中: $\varphi_i(t)$ 为第 i 帧内第 t 个解卷绕相位信号; $\phi_i(t)$ 为第 i 帧内第 t 个反正切相位信号; N 为相位调节系数, 每一帧中第 1 个反正切相位信号的 N 为 0; 随着 t 向后推移, 根据下式确定相应点的 N :

$$N = \begin{cases} N + 2\pi, & \phi_i(t) - \phi_i(t-1) < -\pi \\ N - 2\pi, & \phi_i(t) - \phi_i(t-1) > \pi \end{cases}, \quad (8)$$

式中, $\phi_i(t) - \phi_i(t-1)$ 为第 i 帧内任意相邻两点的相位差值。

2.3.3 差分模块

为解调局部振动相位变化, 相位差值可表示为

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i(t) - \varphi_i(t-d), \quad (9)$$

式中: d 为差分间隔; $\Delta\varphi_i$ 为第 i 帧内一定差分间隔的相位差分信号。

通过直接在 FPGA 中进行衰落抑制和相位解调, 可以最大限度地减少计算过程中的“死时间”, 实现不受衰落影响的实时检测。在这种配置下, 实时监测的响应速度得到了提升。

2.4 数据传输模块

系统传感距离超过 10 km, 数据量大, 故选择 PCI-E 作为数据传输的方案。考虑到 PCI-E 的层次结构复杂, 选择 Xilinx 提供的 7 系列 FPGA PCI-E 集成块, 包括传输层、数据链路层、物理层和配置管理层。通过这些模块, 可以完成大部分协议层的处理任务。

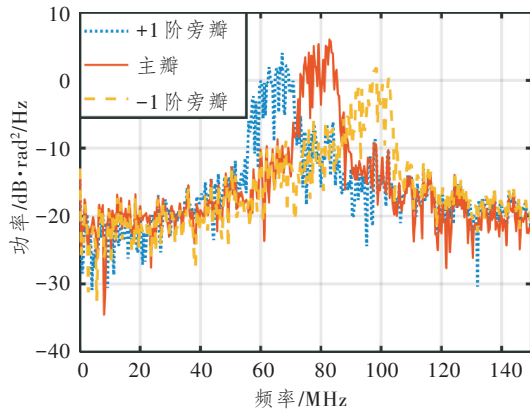
3 实验结果

3.1 衰落抑制与相位解调算法验证

在验证 FPGA 算法正确性的实验中, 采集了基于相位调制外差探测 Φ -OTDR 系统的信号, 输入到 FPGA 衰落抑制与相位解调模块进行仿真计算, 并导出每步算法的结果。图 5(a) 所示为原始数据经过 3 组 FIR 滤波器处理的频谱图, 主瓣与两个 1 阶旁瓣用不同颜色表示。观察到同一光纤位置, 信号强度不同, 实现相互补偿, 有效抑制了干涉衰落。

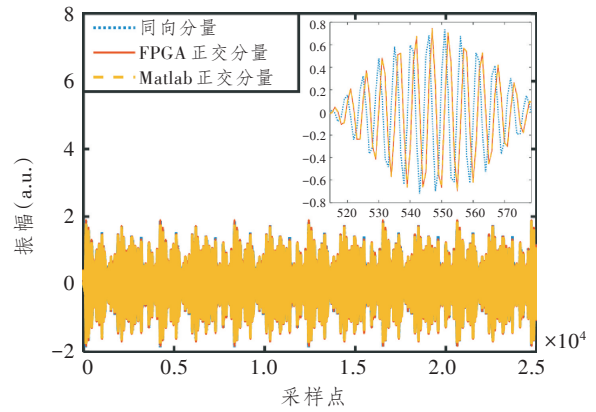
图 5(b) 所示为希尔伯特变换后的数据。在插图中, 观察到同相分量和正交分量之间存在相位差异, 而 FPGA 计算得到的正交分量与 Matlab 软件完全重合, 表明希尔伯特变换无误。

图 6(a)、图 6(b) 和图 6(c) 分别展示了反正切相位、解卷绕相位和差分相位。由图可知, 反正切相位存在跳变, 解卷绕相位平滑, 但是仍存在随机初始



(a) FIR 滤波后的频谱图

(a) Frequency spectrum after FIR filtering



(b) 希尔伯特变换计算出的同相分量和正交分量

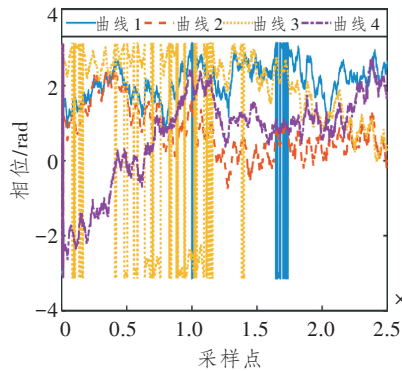
(b) In-phase and quadrature components calculated by Hilbert transform

图5 滤波模块的算法结果图

Figure 5 Diagram of the algorithmic results of the filtering module

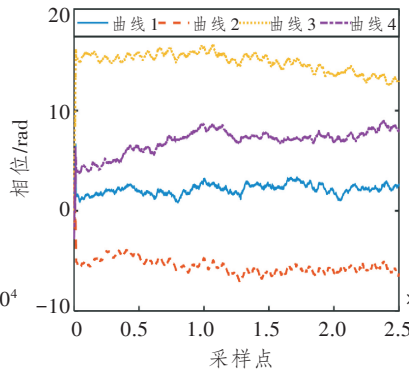
相位差。为了减小初始相位差对相位还原的影响,需要进行差分运算。如图 6(c)所示,每条曲线基本

重合,消除了相位噪声的影响。以上结果验证了 FPGA 实现算法的有效性。



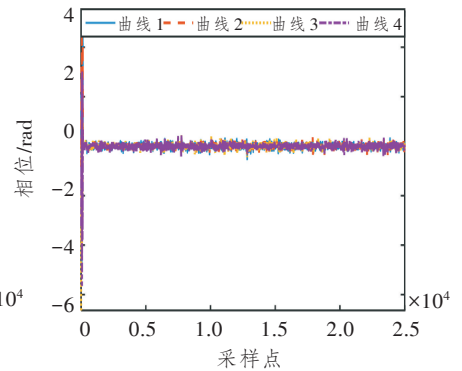
(a) 反正切处理后的相位信号

(a) Phase signal after arctangent processing



(b) 解卷绕后的相位信号

(b) Phase signal after unwrapping



(c) 差分相位信号

(c) Differential phase signal

图6 相位解调模块的算法结果图

Figure 6 Diagram of the algorithmic results of the phase demodulation module

3.2 外部振动信号重建

为验证振动信号能否被准确恢复,进行了振动探测实验。实验中测量不同频率的振动,并使用上述系统进行相位重建和频谱分析。压电换能器的驱动频率设定为 0.5、1.0、2.0 和 4.0 kHz,驱动电压为 100 mV。图 7(a)所示的时域振动波形图显示,0.5、1.0 和 2.0 kHz 频率下正弦波得到良好恢复,4.0 kHz 波形因脉冲重复频率(10 kHz)导致采样率不足而略有失真。图 7(b)所示为振动信号功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)图,峰值分别对应 0.5~4.0 kHz,与驱动频率一致。由图可知,系统平均本底噪声约为 $-50 \text{ dB} \cdot \text{rad}^2/\text{Hz}$ 。实验中振动信号精确恢复,信噪比超过 20 dB,证明系统能可靠

恢复不同频率的振动。系统可恢复最大频率由重频确定,重频设定为 10 kHz,根据奈奎斯特定律,可恢复最大频率为 5 kHz。根据可恢复最小频率以及频率分辨率由测量时间长度决定,一共测量了 10 ms,因此最小频率和频率分辨率为 100 Hz。具体可恢复的频率范围可根据实际需要调整。

最后,本文从传感距离、有无衰落抑制和数据处理机制 3 个方面,将本研究与现有文献方法进行了对比分析。如表 1 所示,与其他方法相比,本文所提方法不仅具备了衰落抑制能力,还实现了实时数据处理,并且能够支持较长距离的传感,具有更强的实际应用价值。

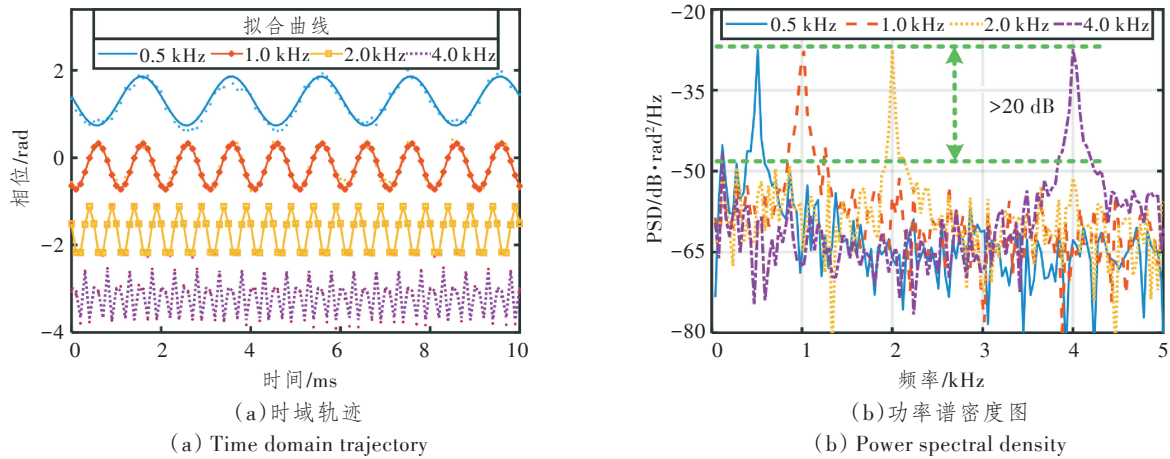


图 7 外部振动重建结果图

Figure 7 Results of external vibration signal reconstruction

表 1 现有文献方法与本实验方法的对比

Table 1 Comparison of existing literature methods with the present experimental method

关键技术	传感距离/km			衰落抑制	数据处理方式	参考文献
π 相移脉冲技术	4.0	5.0	10.0	有	离线	[5-7]
频分复用技术	1.5	1.6	5.4	有	离线	[9-11]
频域调控技术	2.2	10.0	2.0	有	离线	[14-16]
不受衰落影响下的信息提取	8.0	1.1	9.2	有	离线	[17-19]
基于 FPGA 的 Φ -OTDR 系统	3.0	4.0	40.0	无	实时	[22][23][25]
本文所提方法		10.0		有	实时	

4 结束语

针对外差检测 Φ -OTDR 系统中信号衰落和解调实时性不佳的问题,本文提出了一种基于相位调制的衰落抑制系统与解调优化算法。通过相位调制技术产生等强度边带,并在 FPGA 中设计、验证了衰落抑制和相位解调算法。结果表明,本文所提系统能准确恢复不同频率振动,并获得较高的信噪比。该方法有效地解决了信号衰落问题,实现了数据实时处理和振动精确恢复,具有很强的实用性和可靠性。

参考文献:

- [1] 章诗宇, 吴江, 李明, 等. 基于 ROPA 技术的超长跨距 ϕ OTDR 传感系统[J]. 光通信研究, 2024(2): 220076. Zhang S Y, Wu J, Li M, et al. Ultra Long Span ϕ OTDR Sensing System based on ROPA Technology[J]. Study on Optical Communications, 2024(2): 220076.
- [2] 张博智, 刘柯, 刘琨, 等. 基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究[J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220205. Zhang B Z, Liu K, Liu K, et al. Research on Dynamic Variance Threshold Algorithm based on Distributed Fiber Vibration Sensor System[J]. Opto-Electronic Engi-

neering, 2023, 50(2): 220205.

- [3] 张均伟, 蓝波, 黄嘉庚, 等. 基于分布式光纤传感的光缆防外破监测研究[J]. 光通信研究, 2022(5): 53-57. Zhang J W, Lan B, Huang J G, et al. Monitoring and Early Warning System for Anti-Breakage of Optical Cable based on Distributed Optical Fiber Vibration Sensing[J]. Study on Optical Communications, 2022(5): 53-57.
- [4] 刘紫娟, 李永倩, 张立欣, 等. 基于光纤传感的形状传感发展研究[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 760-766. Liu Z J, Li Y Q, Zhang L X, et al. Research on the Development of Shape Sensing based on Optical Fiber Sensing[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 760-766.
- [5] Pan Z, Liang K, Zhou J, et al. Interference-Free Phase-Demodulated OTDR System [C]// OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensor. Beijing, China: SPIE, 2012: 842129.
- [6] Wang X, Lu B, Wang Z, et al. Interference-Free Φ -OTDR based on Differential Phase Shift Pulsing Technology[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 39-42.
- [7] He H, Yan L, Qian H, et al. Suppression of the Interference Fading in Phase-Sensitive OTDR with Phase-Shift Transform[J]. Journal of Lightwave Technology,

- 2021, 39(1): 295–302.
- [8] Hartog A H, Liokumovich L B. Phase Sensitive Coherent OTDR with Multi-Frequency Interrogation: Canada, CA2854124A1 [P]. 2026-02-05.
- [9] Hartog A H, Liokumovich L B, Ushakov N A, et al. The Use of Multi-Frequency Acquisition to Significantly Improve the Quality of Fibre-Optic-Distributed Vibration Sensing [J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(S1): 192–202.
- [10] Zabihi M, Chen Y, Zhou T, et al. Continuous Fading Suppression Method for Φ -OTDR Systems Using Optimum Tracking over Multiple Probe Frequencies [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37 (14): 3602–3610.
- [11] Yang S, Zou W, Long X, et al. Pulse-Compression Optical Time Domain Reflectometer[C]// 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. Santander, Spain: SPIE, 2014: 915736.
- [12] Zhang J, Wu H, Zheng H, et al. 80 km Fading Free Phase-Sensitive Reflectometry based on Multi-Carrier NLFM Pulse without Distributed Amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37 (18): 4748–4754.
- [13] Jiang J, Wang Z, Wang Z, et al. Continuous Chirped-Wave Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 685–688.
- [14] Wu Y, Wang Z, Xiong J, et al. Interference Fading Elimination with Single Rectangular Pulse in Φ -OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3381–3387.
- [15] Wu Y, Wang Z, Xiong J, et al. Bipolar-Coding Φ -OTDR with Interference Fading Elimination and Frequency Drift Compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6121–6128.
- [16] Cui K, Liu F, Wang K, et al. Interference-Fading-Suppressed Pulse-Coding Φ -OTDR Using Spectrum Extraction and Rotated-Vector-Sum Method[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(6): 6800206.
- [17] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, et al. Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing with very High Measurand Resolution over Long Range Using Coherent OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9): 1142–1146.
- [18] Ma Z, Jiang J, Wang S, et al. Phase Drift Noise Suppression for Coherent-OTDR Sensing based on Heterogeneous Dual-Sideband LFM Pulse[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(8): 082002.
- [19] Xiong J, Wang Z, Jiang J, et al. High Sensitivity and Large Measurable Range Distributed Acoustic Sensing with Rayleigh-Enhanced Fiber [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2569–2572.
- [20] 吴舒辞, 陈珍, 夏显忠, 等. 基于FPGA和DSP的光纤信号实时处理系统[J]. *微计算机信息*, 2009, 25(2): 203–204.
- Wu S C, Chen Z, Xia X Z, et al. A Real-Time Processing System of Optical Fiber Sensor based on DSP and FPGA Architecture [J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(2): 203–204.
- [21] 赵兴群, 薛冬青. 分布式光纤振动传感信号数据采集系统设计[J]. *科技导报*, 2012, 30(18): 45–49.
- Zhao X Q, Xue D Q. System Design for Data Acquisition for Distributed Optical Fiber Vibration Sensing Signal[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(18): 45–49.
- [22] 李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于FPGA的分布式光纤传感系统偏振控制研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510002.
- Li P C, Liu K, Jiang J F, et al. Research on Polarization Control of Distributed Optical Fiber Sensing System based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510002.
- [23] 陈博, 葛伟青, 姜涛. 基于FPGA和ARM架构的嵌入式DTS系统设计方案[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(7): 94–97.
- Chen B, Ge W Q, Jiang T. Design of Embedded DTS System based on FPGA and ARM Architecture [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 37(7): 94–97.
- [24] 王莉, 申雅峰. 基于FPGA的光纤传感解调数据处理系统[J]. *计测技术*, 2022, 42(2): 79–84.
- Wang L, Shen Y F. Optical Fiber Sensing Demodulation Data Processing System based on FPGA [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42 (2): 79–84.
- [25] 李沛峰, 刘丽, 王宇, 等. 基于FPGA的 Φ -OTDR系统数字正交解调方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(5): 19–28.
- Li P F, Liu L, Wang Y, et al. Φ -OTDR System Digital Quadrature Demodulation Method based on FPGA [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(5): 19–28.
- [26] Dong Y, Lu Z, Li Q, et al. Broadband Brillouin Slow Light based on Multi-Frequency Phase Modulation in Optical Fibers [J]. *the Optical Society of America B*, 2008, 25(12): C109–C115.
- [27] Chen D, Liu Q, He Z. Phase-Detection Distributed Fiber-Optic Vibration Sensor without Fading-Noise based on Time-Gated Digital OFDR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8315.