

引用本文: 张振鹤, 刘丰年, 张国敬, 等. IQ 解调低通滤波器截止频率变化对 Φ -OTDR 系统性能的影响[J]. 光通信技术, 2025, 49(2): 34-39.

IQ 解调低通滤波器截止频率变化对 Φ -OTDR 系统性能的影响

张振鹤¹, 刘丰年^{2*}, 张国敬³, 赖 榕¹, 张竣凯¹, 黄逸轩¹, 钟 晴², 龙 晟²

(1. 湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007;

2. 湖南工业大学 空天技术学院, 湖南 株洲 412007; 3. 北京泛在云科技有限公司, 北京 100080)

摘要: 为了优化相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)系统的信号解调质量、空间分辨率及振动定位性能, 基于外差相干探测的 Φ -OTDR 系统通过欠采样和同相正交(IQ)解调技术, 研究了低通滤波器(LPF)截止频率对系统性能的影响。实验中采用窄线宽激光器、声光调制器、平衡探测器等搭建系统, 并设置 5 种不同截止频率(12.5、10、7.5、5、2.5 MHz)的 LPF 进行对比分析。实验结果表明: 当 LPF 截止频率为 7.5 MHz 时, 解调信号的信噪比(SNR)达到最高值(40 dB), 且不同采样点间的信号质量更稳定; 同时, LPF 截止频率对系统空间分辨率无显著影响, 但对振动定位存在一定误差(约 2~5 m)。

关键词: 相位敏感光时域反射仪; 同相正交解调; 低通滤波器

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0034-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of IQ demodulation low-pass filter cut-off frequency variation on Φ -OTDR system performance

ZHANG Zhenhe¹, LIU Fengnian^{2*}, ZHANG Guojing³,

LAI Rong¹, ZHANG Junkai¹, HUANG Yixuan¹, ZHONG Qing², LONG Sheng²

(1. School of Computer, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. School of Aerospace, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 3. Beijing Pan-cloud Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: To optimize the signal demodulation quality, spatial resolution, and vibration localization performance of the phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) system, this paper investigates the effect of the low-pass filter (LPF) cut-off frequency on system performance based on the heterodyne coherent detection of the Φ -OTDR system with under-sampling and in-phase and quadrature (IQ) demodulation techniques. In the experiment, the narrow linewidth laser, the acoustic optical modulator, the balanced photoelectric detector and other devices are used to construct the system, and five LPFs with different cut-off frequencies (12.5, 10, 7.5, 5, 2.5 MHz) are set for comparative analysis. The results show that when the LPF cut-off frequency is 7.5 MHz, the signal-to-noise ratio (SNR) of the demodulated signal reaches the highest value (40 dB), and the signal quality is more stable between different sampling points. Meanwhile, the LPF cut-off frequency has no obvious effect on the spatial resolution of the system, but there is an error on the vibration localization (about 2~5 m).

Key words: phase-sensitive optical time domain reflectometry, in-phase and quadrature demodulation, low-pass filter

收稿日期: 2024-11-22。

基金项目: 湖南工业大学研究生科研创新项目(CX2314)资助; 湖南省教育厅科学研究重点项目(23A0446)资助; 湖南省自然科学基金(区域联合)项目(2024JJ7654, 2024JJ7149)资助; 湖南省大学生创新训练计划项目(S202411535126)资助。

作者简介: 张振鹤(2000—), 男, 硕士生, 主要研究方向为光子技术、现代光通信和智能光纤传感。

*** 通信作者:** 刘丰年(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤激光技术、激光脉冲放大、光信号传输和光纤传感领域的研究工作。



0 引言

相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)系统利用光纤作为传感媒介, 具有长距离探测、高灵敏度和抗电磁干扰等显著优势, 被广泛应用于周界安防^[1-3]、管道监测^[4-6]、电力监测^[7-9]和结构健康检测^[10-12]等领域。然而, 为了进一步优化 Φ -OTDR 系统的信噪比(SNR)、探测距离及空间分辨率等核心性能指标, 当前研究主要沿 2 种技术路径推进: 1) 系统结构创新, 包括波长分集^[13]、

频率分集^[14-15]及空分复用技术^[16-19]; 2) 信号处理算法开发, 涉及块匹配三维滤波^[20]、自适应滤波^[21-22]以及深度学习^[23-24]/机器学习^[25-26]框架。然而, 此类改进常以系统成本增加与算法复杂度提升为代价, 制约了其实用化进程。

此外, 已有研究表明数字同相正交(IQ)解调中的参数(采样率、模数转换器量化位数和脉冲宽度等)^[27]对系统性能有重要影响, 但针对 IQ 解调中低通滤波器(LPF)截止频率影响^[28]的研究却相对较少。

为了解决上述问题, 本文基于外差相干探测的 Φ -OTDR 系统对平衡探测器(BPD)信号进行欠采样和 IQ 解调, 利用 Matlab 工具研究 LPF 截止频率对信号解调质量(SNR、稳定性、空间分辨率和振动位置)的影响。

1 实验系统与原理

1.1 Φ -OTDR 系统的基本工作原理

Φ -OTDR 系统框图如图 1 所示, 主要包括窄线宽激光器(NLL)、80:20 光耦合器(OC)、声光调制器(AOM)、掺铒光纤放大器(EDFA)、环形器(CIR)、平衡探测器(BPD)和数据采集卡(DAQ)。具体原理如下: 探测光通过 AOM 产生 200 MHz 的移频, 同时经脉冲调制后生成脉冲光, 经 EDFA 放大, 再经 CIR 进入传感光纤。散射光经 CIR 反射后, 与本振光通过 50:50 的 OC 分束, 并输入至 BPD。随后, DAQ 采集 BPD 输出的拍频信号, 经 LPF 处理后, 通过 IQ 解调技术还原振动信号。

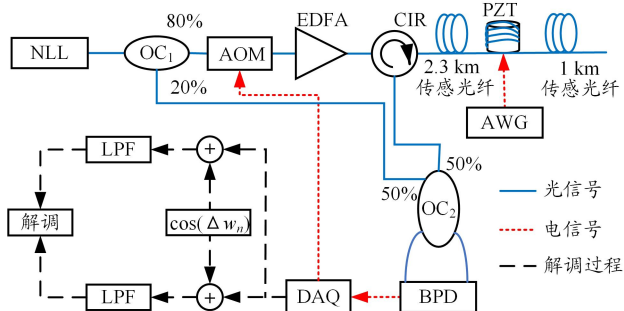


图 1 Φ -OTDR 系统框图

Φ -OTDR 系统通过检测传感光纤中的瑞利背向散射(RBS)信号来提取外界环境施加在光纤上的振动信息。RBS 信号可以表示为

$$E(t) = \sum_{k=1}^K a_k \exp(j2\pi f_c(t - \tau_k) + j\varphi_0) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{\tau_p}\right) \quad (1)$$

其中, K 为瑞利散射单元总数, a_k 为第 k 个散射单元的散射强度, τ_k 为光从入射端至第 k 个散射单元的往返时间, φ_0 为探测光初始相位, τ_p 为脉冲宽度, $\text{rect}(\cdot)$ 为

矩形函数。 f_c 为探测光经过 AOM 移频后的频率, $f_c = \nu_0 + \Delta f$, ν_0 为探测光的初始频率, Δf 为 AOM 的移频。经 BPD 后所得到的 RBS 信号中心频率位于 Δf , 其带宽为 $2/\tau_p$ ^[29]。

1.2 欠采样原理及其对信号频谱的影响

在欠采样的情况下, 高频带信号会被搬移到低频区段内。为了避免频谱重叠或丢失, $\Delta f'$ 、半带宽 f_b 和采样率 f_s 应满足以下条件:

$$\begin{cases} f_b \leq \Delta f' \leq \frac{f_s}{2} - f_b, \Delta f' > 0 \\ -\frac{f_s}{2} + f_b \leq \Delta f' \leq -f_b, \Delta f' < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, m 为正整数, 表示频移次数; $\Delta f' = \Delta f - mf_s$, 根据 $\Delta f'$ 的正负关系, 可判断拍频信号频谱是否发生翻转^[30]。

1.3 IQ 解调过程及低通滤波器的作用

BPD 输出的电信号经由 DAQ 进行欠采样并转换为数字信号。随后, 该信号与同频率的正交信号 $\cos(\Delta wn)$ 和 $\sin(\Delta wn)$ 相乘(其中 $\Delta w = 2\pi\Delta f/f_s$ 为数字角频率, n 为采样点序号), 从而生成 2 路正交信号。这 2 路信号经过 LPF 滤除混叠信号和二倍频信号后, 提取出基频信号。最终, 通过 IQ 信号实现对振幅和相位的解调。

LPF 的主要功能是消除欠采样过程中产生的混叠信号, 同时保留基带信号。然而, LPF 的截止频率选择对信号解调质量具有显著影响。根据 SNR 的定义, 若 LPF 截止频率过高, 噪声功率将增加, 从而导致 SNR 下降; 而若 LPF 截止频率过低, 则可能导致基带信号的部分损失, 同样会对解调质量造成不利影响。因此, 在设计中需综合考虑 LPF 参数以优化解调性能。

2 实验结果及分析

实验中, 探测光脉冲宽度设置为 100 ns, 脉冲重复频率为 20 kHz, PZT 初始振动频率为 100 Hz。本文对 2 路正交信号的 LPF 设置不同截止频率, 具体参数设置如表 1 所示。

2.1 LPF 的不同截止频率对解调信号质量的影响

本文利用 5 种不同截止频率 f (12.5、10、7.5、5、2.5 MHz) 的 LPF 对正交信号进行了滤波处理。通过选取振动区间中的同一采样点, 还原振动信号, 并绘制了对应的功率谱密度(PSD)曲线, 结果如图 2 所示。实验结果表明, 随着 LPF 的截止频率从 12.5 MHz 逐步降低至 7.5 MHz, 传感系统还原振动信号的 SNR 呈现逐渐升高的趋势。然而, 当截止频率进一步降低时, 振动信号的 SNR 却开始下降。在所设定的 5 种

张振鹤, 刘丰年, 张国敬, 等: IQ 解调低通滤波器截止频率变化对 Φ -OTDR 系统性能的影响

表 1 LPF 参数设置

采样点	截止频率/MHz		滤波器阶数	频带权重	
	通带	阻带		通带	阻带
①	12.5	17.5	40	1	10
②	10	15	40	1	10
③	7.5	12.5	40	1	10
④	5	10	40	1	10
⑤	2.5	7.5	40	1	10

LPF 参数中, 当截止频率为 7.5 MHz 时, 振动信号的 SNR 达到最大值, 约为 40 dB。这一结果凸显了 LPF 截止频率选择对信号还原质量的关键影响, 同时也为优化传感系统的性能提供了重要的参考依据。

为进一步验证实验结果, 本文选用振动区间内 5 个相邻采样点的数据对振动信号进行还原, 得到的 SNR 结果如表 2 所示。基于这 5 个采样点的振动信号处理结果, 绘制了 PSD 曲线, 如图 3 所示。其中, 框图为 0~600 Hz 频率范围的局部放大图。从图 3 可以看出, 各截止频率 LPF 对应的 100 Hz 振动信号的峰值功率差异很小。然而, 经截止频率 $f_c=7.5$ MHz 的 LPF 处理后, 其平均 PSD 曲线在振动信号峰值两侧表现出更低的噪声功率, 整体噪声水平显著降低。这一现象的原因在于: 在对正交信号进行低通滤波时, 初始阶段的 LPF 不仅有效滤除了噪声, 还适度滤除了部分基带信号, 从而对还原振动信号的 SNR 产生了正向提升作用。当 LPF 的截止频率继续降低至某一临界点时, SNR 达到最大值; 但若继续降低截止频率, 则会导致基带信号被过度滤除, 进而引发信号失真, 最终对 SNR 产生抑制效应。

表 2 5 个相邻采样点经滤波后还原信号的 SNR

采样点	SNR/dB				
	f_c 12.5 MHz	f_c 10 MHz	f_c 7.5 MHz	f_c 5 MHz	f_c 2.5 MHz
①	31.140	32.012	34.176	23.665	22.423
②	34.158	35.545	39.014	27.322	22.453
③	35.956	37.368	39.251	30.637	22.304
④	36.162	38.230	40.011	32.434	24.109
⑤	34.315	41.422	40.676	32.873	23.955

根据表 2 中的数据可知, 采用 $f_c=7.5$ MHz 的 LPF 进行滤波后, 还原信号的 SNR 显著提高, 且不同采样点间的信号质量更加稳定。相比之下, 其它截止频率的 LPF 所对应的振动信号 SNR 波动较为明显。其中,

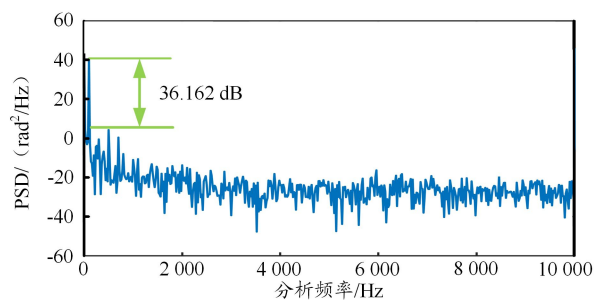
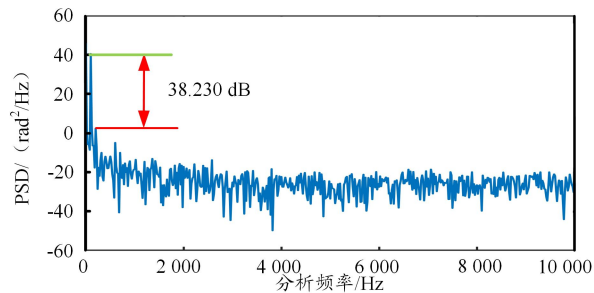
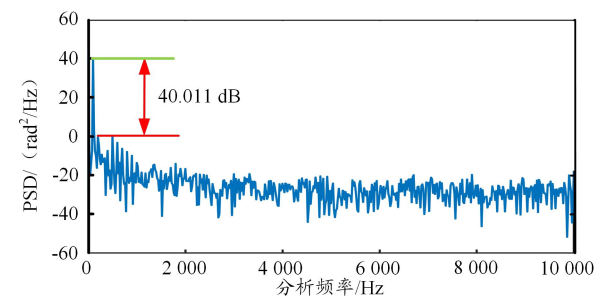
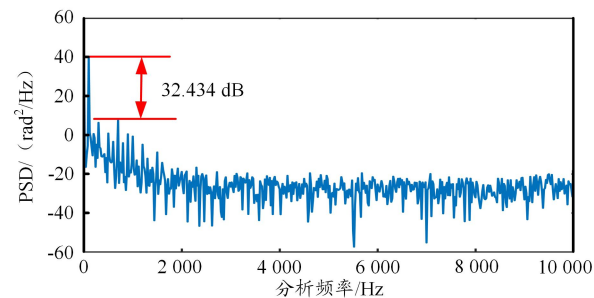
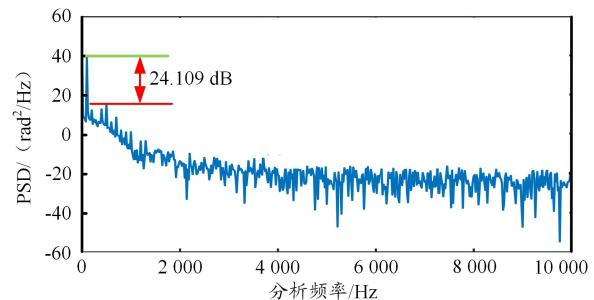
(a) $f_c=12.5$ MHz(b) $f_c=10$ MHz(c) $f_c=7.5$ MHz(d) $f_c=5$ MHz(e) $f_c=2.5$ MHz

图 2 5 种不同 LPF 滤波后振动信号 PSD 曲线

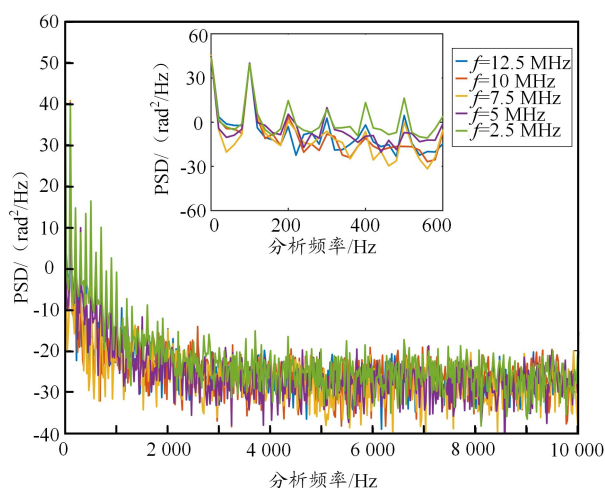


图3 5种滤波器处理后的振动信号平均 PSD 曲线

在 $f=7.5$ MHz 的 LPF 数据中, 第一个采样点的 SNR 明显低于其它采样点(约低 5~6 dB), 这可能与传感系统中存在的相干衰落效应有关。

本文采用 5 种不同截止频率的 LPF 对时长为 0.05 s 的 100 Hz 振动信号进行滤波处理, 得到对应的时域-相位曲线如图 4 所示。可以看出, f 为 12.5、10、7.5 MHz 的 LPF 均能较好地还原振动信号, 而当 $f=5$ MHz 时, 振动信号曲线开始出现变形; 当 $f=2.5$ MHz 时, 振动信号的时域曲线完全失真。

本文通过改变 PZT 的振动频率, 进一步研究 LPF 的不同截止频率对不同振动频率信号的影响, 得到不同振动频率下的平均 PSD 曲线, 如图 5 所示。从图 5(a) 可以看出, 经过不同 LPF 处理后, 200 Hz 振动信号的峰

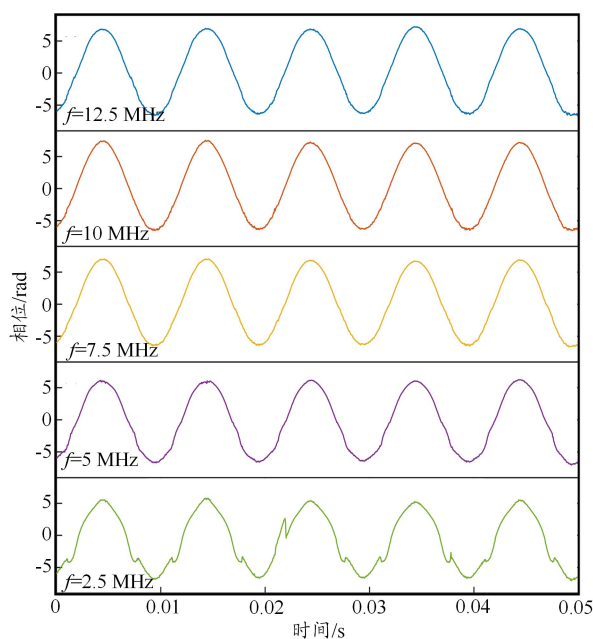
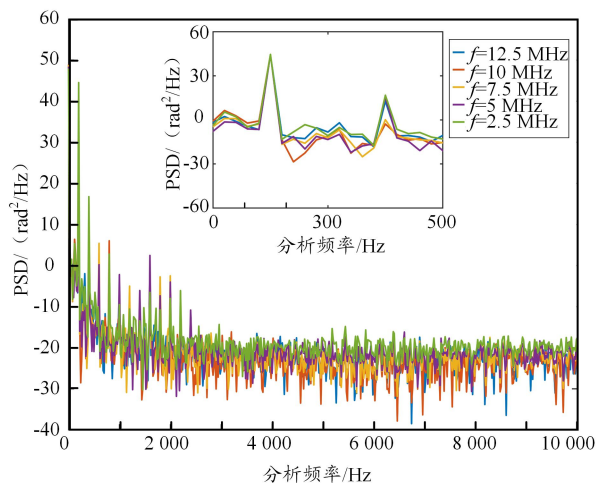
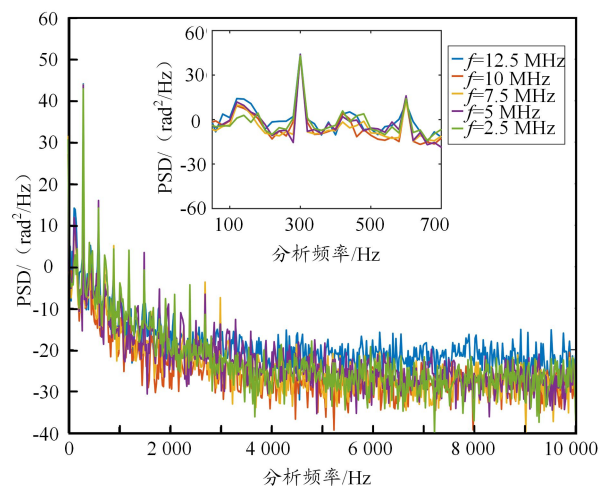


图4 5种 LPF 对应的振动信号时域-相位曲线

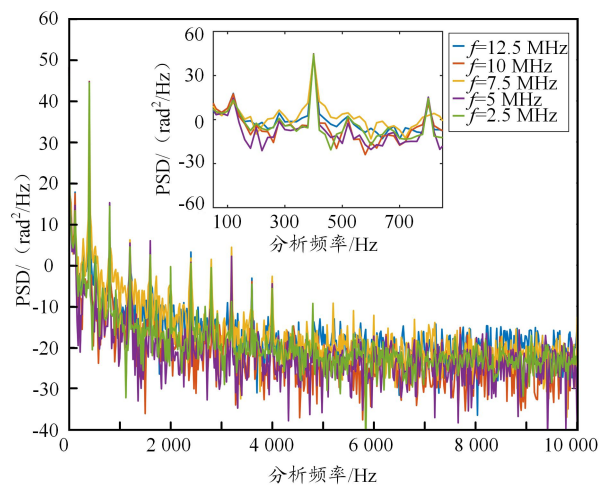
值功率差异较小。具体而言, 7.5 MHz 的 LPF 在振动信号峰值左侧的噪声功率低于 12.5、10、2.5 MHz 的 LPF, 而在峰值右侧的噪声功率则低于 12.5、5、2.5 MHz 的



(a) 振动频率为 200 Hz



(b) 振动频率为 300 Hz



(c) 振动频率为 400 Hz

图5 不同 PZT 振动频率的平均 PSD 曲线

张振鹤, 刘丰年, 张国敬, 等: IQ 解调低通滤波器截止频率变化对 Φ -OTDR 系统性能的影响

LPF。因此, 经 7.5 MHz LPF 处理后的信号整体噪声水平较低, 振动信号的 SNR 相对较高。

类似地, 通过分析图 5(b) 和图 5(c) 的结果可知, 7.5 MHz 的 LPF 在处理其它振动频率信号时表现出较优的性能。然而, 对于 400 Hz 振动信号, 尽管其峰值两侧的噪声水平相对较高, 但这并不会显著影响信号解调过程中振动信号的还原质量。这一结果表明, 选择合适的 LPF 截止频率对于保证信号质量和还原精度至关重要。

2.2 LPF 的不同截止频率对系统空间分辨率的影响

本文通过调整 LPF 的截止频率对正交信号进行滤波, 生成 IQ 信号, 并结合信号解调算法对传感光纤上的 PZT 振动位置进行定位。实验中使用的光纤长度为 2.3 km, 本文分别测试了脉冲宽度为 100、200 ns 时, 5 种不同 LPF 截止频率对振动位置的空间-相位曲线的影响。测试结果表明, 在脉冲宽度为 100 ns 的情况下, 当 LPF 截止频率为 12.5、10 MHz 时, 振动起始位置位于 2 341.6 m; 而当截止频率为 7.5、5、2.5 MHz 时, 振动起始位置则为 2 344.0 m。其中, 12.5 MHz 的 LPF 对应的空间分辨率为 9.6 m, 其余截止频率 LPF 对应的空间分辨率均为 10.4 m。在脉冲宽度为 200 ns 时, 5 种 LPF 对应的振动起始位置分别为 2 344.0、2 339.2、2 340.0、2 344.0、2 343.2 m; 此外, 12.5、10、7.5 MHz 的 LPF 对应的空间分辨率为 20.8 m, 而 5、2.5 MHz 的 LPF 对应的空间分辨率为 21.6 m。综上所述, LPF 截止频率的变化对系统的空间分辨率影响较小, 但对振动定位存在一定的误差, 实验结果显示该误差为 2~5 m。

2.3 LPF 截止频率选择方法在过采样条件和其它扰动行为监测下的适用性分析

为研究 LPF 截止频率选择方法在过采样条件下的实用性, 本文在 Matlab 中对 Φ -OTDR 系统进行仿真建模。仿真实验的具体设置如下: 系统采样率分别为 500、750、1 000 MHz, AOM 频移为 200 MHz, 脉冲宽度为 100 ns, 脉冲重复频率为 20 kHz, 传感光纤长度为 3 km, PZT 振动频率为 100 Hz 且位于距离 PZT 2 km 处, LPF 的阶数为 100, 其它参数与表 1 相同, 引入的噪声类型为高斯白噪声^[27], 测得连续 3 个采样点的 PSD 曲线并计算 SNR, 得到不同系统采样率下不同 LPF 截止频率对应的 SNR 如图 6 所示。可以看出, 在不同采样率条件下, LPF 截止频率的选择对信号 SNR 有显著影响。具体而言, 当采样率为 500 MHz 或 750 MHz 时, 10 MHz 截止频率的 LPF 可显著提升信号恢复的

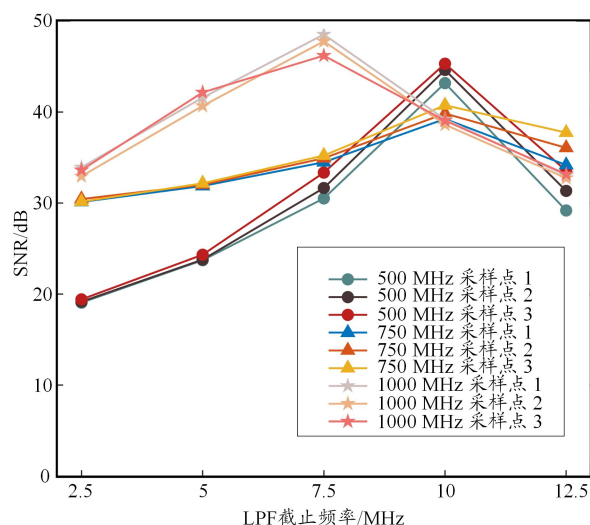


图 6 不同系统采样率下不同 LPF 截止频率对应的 SNR

SNR; 而当采样率提升至 1000 MHz 时, 7.5 MHz 截止频率的 LPF 则展现出更优的 SNR 性能。

为进一步验证该方法在监测其它扰动行为中的适用性, 实验将脉冲重复频率调整为 2 kHz, LPF 截止频率设置为 7.5 MHz, 并对持续时间为 5 s 的人为敲击信号进行了测试。测试结果显示, 该方法能够有效监测不规则扰动行为。

综上所述, LPF 截止频率选择方法不仅适用于过采样条件下的信号处理, 还能够在其它类型的扰动行为监测中展现出良好的适用性。

3 结束语

本文以 Φ -OTDR 系统为基础, 深入探讨了 LPF 截止频率在 IQ 解调过程中的关键作用, 分析其对信号解调质量、空间分辨率以及振动定位的影响。研究表明, 当 LPF 截止频率设置为 7.5 MHz 时, 解调信号的质量达到最优水平, 且不同采样点之间的信号稳定性显著提升。此外, 实验数据证实, LPF 截止频率的变化对系统的空间分辨率影响较小, 但会对振动定位引入一定误差, 该误差范围约为 2~5 m。进一步的研究显示, 所提出的方法不仅适用于过采样条件下的信号处理, 还能够有效监测不规则扰动行为, 展现出良好的适用性和普适性。然而, 本研究仍存在一定的局限性, 未来可通过缩小步长进一步优化 LPF 参数的选择, 并探索该方法在更多应用场景中的表现。

参考文献:

- [1] LI S C, LIU K, JIANG J F, et al. A denoising and positioning method of long-distance fiber optic perimeter security system based on Φ -OTDR[C]//

- SPIE. Proceedings of 2021 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications. Bellingham: SPIE, 2022: 190–200.
- [2] LI Z X, WANG Z Q, LI J H et al. Technology research of Φ -OTDR fiber perimeter intrusion system based on CNN-LSTM algorithm[C]//SPIE. Proceedings of Third International Conference on Advanced Algorithms and Neural Networks (AANN 2023). Bellingham: SPIE, 2023: 98–105.
- [3] TOMASOV A, ZAVISKA P, SPURNY V, et al. Enhancing perimeter protection using Φ -OTDR and CNN for event classification [C]//Optica Publishing Group. Proceedings of 28th International Conference on Optical Fiber Sensors. Washington: Optica Publishing Group, 2023: W4.39-1–W4.39-4.
- [4] LI G, ZENG K H, ZHOU B, et al. Vibration monitoring for the west-east gas pipeline project of China by phase optical time domain reflectometry (phase-OTDR) [J]. Instrumentation Science & Technology, 2021, 49(1): 65–80.
- [5] LALAM N, WESTBROOK P, NAEEM K, et al. Pilot-scale testing of natural gas pipeline monitoring based on phase-OTDR and enhanced scatter optical fiber cable[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 14037-1–14037-12.
- [6] ZHANG S, XIONG Z J, JI B Y, et al. Water pipeline leakage detection based on coherent Φ -OTDR and deep learning technology [J]. Applied Sciences, 2024, 14(9): 3814–3826.
- [7] ZHU P, WEN H Q, CHE Q, et al. Disturbed partial discharge detection system based on an improved Φ -OTDR assisted by a FBG array [J]. Applied Optics, 2020, 59(14): 4367–4370.
- [8] 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.
- [9] LIU Z H, YANG S, CHEN Q, et al. Partial discharge distributed locating in power cable joints using Φ -OTDR optical fiber system [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9): 14404–14412.
- [10] FILOGRANO M L, RIZIOTIS C, KANDYLA M A. A low-cost phase-OTDR system for structural health monitoring: design and instrumentation [J]. Instruments, 2019, 3(3): 46–62.
- [11] ZAHOO R, CERRI E, VALLIFUOCO R, et al. Lamb wave detection for structural health monitoring using a Φ -OTDR system [J]. Sensors, 2022, 22(16): 5962–5972.
- [12] VALLIFUOCO R, CERRI E, MINARDO A, et al. Lamb waves detection through phi-OTDR for structural health monitoring [C]//IEEE. Proceedings of 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). New York: IEEE, 2022: 346–350.
- [13] GU J F, LU B, YANG J Q, et al. High SNR Φ -OTDR based on frequency and wavelength diversity with differential vector aggregation method [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 1–12.
- [14] QIAN H, LUO B, HE H J, et al. Fading-free Φ -OTDR with multi-frequency decomposition [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(3): 2160–2166.
- [15] ZABIHI M, KREBBER K. Laser source frequency drift compensation in Φ -OTDR systems using multiple probe frequencies [J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19990–19998.
- [16] ZHAO Z Y, WU H, HU J H, et al. Interference fading suppression in Φ -OTDR using space-division multiplexed probes [J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15452–15462.
- [17] ZHANG Y X, LIU J X, XIONG F, et al. A space-division multiplexing method for fading noise suppression in the Φ -OTDR system [J]. Sensors, 2021, 21(5): 1694–1709.
- [18] WANGT Y, MA Z, ZHANG J Z, et al. Performance improvement of Φ -OTDR systems by 3×3 coupler dual-end detection scheme [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024.
- [19] YUAN Q, WANG F, LIU T, et al. Using an auxiliary Mach-Zehnder interferometer to compensate for the influence of laser-frequency-drift in Φ -OTDR [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 11(1): 1–9.
- [20] ZHANG J M, YAN Y X, LIU S Q, et al. Signal-to-noise ratio enhancement of Φ -OTDR based on block-matching and 3D filtering [C]//IEEE. Proceedings of 2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). New York: IEEE, 2023: 1–3.
- [21] MA Q L, GAO X, GAO Y, et al. A study on noise reduction of Φ -OTDR system based on VSS-NLMS algorithm [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7648–7656.
- [22] CHEN Y F, ZHU S H, YU K M, et al. Quantitative analysis of Φ -OTDR spatial resolution influenced by NLM parameters [J]. Photonics, 2023, 10(5): 529–538.
- [23] WANG P F, LV Y J, WANG Y, et al. Adaptability and anti-noise capacity enhancement for Φ -OTDR with deep learning [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(23): 6699–6706.
- [24] LI S C, LIU K, JIANG J F, et al. An ameliorated denoising scheme based on deep learning for Φ -OTDR system with 41-km detection range [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20): 19666–19674.
- [25] LI J C, WANG Y, LIU X, et al. SNR improvement for Φ -OTDR with sparse representation denoising method [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 76: 103231-1–103231-9.
- [26] ZHANG Y X, ZHOU T, DING Z W, et al. Classification of interference-fading tolerant Φ -OTDR signal using optimal peak-seeking and machine learning [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(3): 030601-1–030601-5.
- [27] ZHAO L J, ZHANG X Z, XU Z N, et al. Influencing Factors of IQ demodulation method in distributed acoustic sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1428001-1–1428001-16.
- [28] WANG X, LIU M H, YU M, et al. Analysis and improvement for digital quadrature demodulation algorithm on phase-sensitive optical time-domain reflectometric system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1210002-1–1210002-7.
- [29] WU Y, WANG Z N, XIONG J, et al. Interference fading elimination with single rectangular pulse in Φ -OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3381–3387.
- [30] QIAN H, CUI M J, LI Y N, et al. Phase demodulation under ultra-low sampling rate in heterodyne coherent Φ -OTDR [J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 143: 105597-1–105597-7.
- [31] AMOROSO F. The bandwidth of digital data signal [J]. IEEE Communications Magazine, 1980, 18(6): 13–24.