

基于外差干涉的局部放电光纤传感系统

王睿智¹, 江军^{1*}, 史荣斌², 李晓涵³, 张潮海¹

- 江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省南京市 211106;
- 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏省南京市 211102;
- 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103)

Partial Discharge Optical Fiber Sensing System Based on Heterodyne Interference

WANG Ruizhi¹, JIANG Jun^{1*}, SHI Rongbin², LI Xiaohan³, ZHANG Chaohai¹

- Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Nanjing 211106, Jiangsu Province, China;
- China Energy Engineering Group Co., Ltd., Jiangsu Power Design Institute, Nanjing 211102, Jiangsu Province, China;
- State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Research Institute, Nanjing 211103, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Optical fiber sensing technology has significant advantages in partial discharge (PD) ultrasonic detection, but it is susceptible to the variations in parameters such as light intensity, which can lead to output instability and low signal-to-noise ratio (SNR). To address these issues, this paper constructs the heterodyne interferometric optical fiber sensing system that is independent from light intensity and polarization. The system's phase noise and its correlation with the laser linewidth and optical path difference are analyzed through simulations and experiments. The standard sensitivity testing platform and PD experimental platform are established, and the advantages of the heterodyne interferometric optical fiber sensor in terms of sensitivity and ultrasonic detection are compared and validated. By optimizing the system parameter combination, the average SNR in the ultrasonic frequency band is improved by 24.72 dB. Comparative tests show that the developed optical fiber sensing system exhibits a peak sensitivity improvement of more than 15 dB and an average sensitivity improvement of more than 13 dB over piezoelectric transducers (PZT) within the 20~120 kHz detection frequency band. For PD detection in insulation-defect models, the developed optical fiber sensor shows a peak SNR improvement of 12.37 dB compared to the R15 α sensor. This study identifies the key constraints on the performance of heterodyne interferometric PD optical fiber sensing systems and proposes parameter optimization methods and a new high-sensitivity PD optical fiber ultrasonic sensor.

KEY WORDS: partial discharge; heterodyne interference; optical sensing; phase noise; sensitivity

摘要: 光纤传感技术应用于局部放电超声检测具有显著优势, 但易受光强等参量影响, 导致输出不稳定、信噪比低等问题。为此, 该文构建光强/偏振无关的外差干涉光纤传感系统, 结合仿真与试验, 分析传感系统的相位噪声与激光光源线宽、光纤光程差的关联关系和变化规律; 搭建标准的灵敏度测试平台以及局部放电试验平台, 对比验证外差干涉型光纤传感器在灵敏度以及超声检测方面的优势。通过优化系统参数组合, 超声频段响应信噪比均值提升 24.72 dB; 经过对比测试, 所研制的光纤传感系统在 20~120 kHz 检测频段内相较于压电传感器的峰值灵敏度提升 15 dB 以上, 均值灵敏度提升 13 dB 以上; 针对于绝缘缺陷模型的局部放电检测, 所研制的光纤传感器相较于 R15 α 传感器的峰值信噪比提升 12.37 dB。研究结果明确了外差干涉型局部放电光纤传感系统性能的关键制约因素并提出参数优化方法, 研制出新型高灵敏度局部放电光纤超声传感器。

关键词: 局部放电; 外差干涉; 光纤传感; 相位噪声; 灵敏度

0 引言

电力设备在运行过程中长期受多应力综合作用, 其绝缘性能会逐渐退化并产生绝缘缺陷, 从而导致局部放电(partial discharge, PD)的发生^[1]。如果不及时维护将会影响电力系统正常运行, 甚至引发安全事故, 因此亟需开展可靠的局部放电检测技术保障电力设备的稳定安全运行^[2-3]。

目前, 局部放电的常规检测手段可以分为电测法与非电测法。脉冲电流法^[4]、超/特高频法^[5]作为

最常用的电学检测方法,其核心原理是通过电磁感应实现对局部放电信号的耦合和检测,而电力设备长时间工作在高电压大电流状态下,电磁干扰较为复杂,极易受到电磁干扰的影响。非电测法根据检测对象不同可以分为光测法^[6]、分解产物检测法^[7]以及超声波检测法^[8]。光测法将局部放电产生的光辐射作为测量依据,由于待测光信号极其微弱难以捕捉,目前只能局限在实验室环境中^[9];分解产物检测法通过检测新物质的组成成分和含量来检测局部放电^[10],存在着长期稳定性差及滞后性等问题。超声波检测法作为一种非侵入式的局部放电检测方法,便携且无破坏性,相较于其他方法具有抗电磁干扰能力强、稳定性好等优势。但传统的压电陶瓷传感器(piezoelectric transducer, PZT)存在灵敏度不足的问题。

在微弱信号检测领域,光纤传感检测更具优势^[11],常见的光纤检测方法有光纤布喇格光栅法^[12](fiber bragg grating, FBG)及双光路干涉法。FBG具有易于复用的优点,但光纤光栅声固耦合系数小,检测灵敏度低^[13];法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)结构的光纤传感器应用于非接触式测量有较好的灵敏度^[14],但其制造工艺复杂、成本高,并且光纤探头内部的空气腔在强电场环境下可能会发生局部放电^[15]。本征型光纤传感器相较于F-P式外源传感器,其传感探头由长距离的光纤绕制而成,绝缘性能更好、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)及灵敏度更高,对微弱超声信号的检测能力更强。

根据干涉结构的不同,本征型干涉型光纤传感器可以分为Sagnac干涉、Michelson干涉和Mach-Zehnder干涉3种^[16]。Qian S.等^[17]搭建了Sagnac干涉型局部放电光纤传感系统,检测性能相较PZT得到明显提升,但Sagnac型光纤传感器的传感光与参考光在同一光路中传输,会产生寄生噪声,并且该方法需要一段长距离的延迟光纤,导致其在现场的实用性变差。Michelson与Mach-Zehnder两种干涉结构相较于Sagnac干涉结构系统噪声水平更低,信噪比更高^[18]。Hao Y.等^[19]利用Mach-Zehnder干涉结构实现了交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆终端局部放电的检测并分析了其声波传感特性,但该研究没有对干涉信号进行精确解调,这样会使得环境噪声改变干涉光初始相位点,从而导致输出波形产生“幅值衰落”的现象。针对于这个问题,马国明等^[20]提出一种相位跟踪反馈的方

法,将其应用于Michelson干涉结构,消除了低频噪声的带来的“幅值衰落”,并利用此方法实现了变压器油中局部放电检测^[21];之后,将此方法应用于Mach-Zehnder干涉结构,并实现了变压器套管的局部放电检测^[22],但该方法并没有将目标声波引起的干涉光相位解调出来,因此输出信号容易受到光强影响。

目前,针对于光纤干涉传感结构的相位解调方法主要有3×3耦合器法^[23]、相位生成载波法^[24]和外差解调法^[25]。由于耦合器输出相位偏差的问题,3×3耦合器解调法的解调精度相对较差,相位生成载波法的检测频带又会受限于相位调制器的最大调制频率,利用外差干涉解调法可解决普通相位调制器调制频率不高的问题,并且将拍频信号的中心频率移离噪声集中的低频区,提升信噪比。一些研究者将外差干涉法应用于振动测量,例如文献[26]采用外差干涉结构测量出钢板的振动;文献[27]采用外差干涉仪对谐振频率约为1 GHz的谐振器进行了测量;文献[28]采用双声光调制器的组合搭建了一套外差干涉仪对MHz量级的超声换能器振动进行了测量;文献[29]设计了一种外差干涉传感器应用于微小振动的测量。上述研究明确了外差干涉结构在振动检测方面的效果,初步验证了外差干涉法在局部放电检测上的潜力。但相较于机械振动,局部放电产生的超声信号极其微弱,对传感系统检测灵敏度以及信噪比的要求更高,如何降低系统噪声从而提升信噪比和灵敏度是局部放电光纤传感器亟待攻克的关键难题。

针对以上问题,本文设计一种应用于局部放电检测的外差干涉传感系统。结合仿真与试验分析传感系统的相位噪声与激光光源线宽、光纤光程差的关联关系,优化参数组合,降低系统噪声。建立灵敏度测试平台,将优化后的光纤传感器与PZT进行对比。搭建局部放电检测平台,测试传感系统对于局部放电超声信号的检测水平。结果表明,所研制的光纤传感器可以明显提升检测的灵敏度以及信噪比,实现电力设备局部放电的有效检测。

1 光纤传感系统超声测量原理

变压器、高压电缆、气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)等设备发生局部放电时,内部绝缘介质被击穿,气泡所受外部电场力以及内部弹性力平衡被破坏,气泡内部电荷发生转移形成电流并释

放热量，引起绝缘介质受热膨胀并在放电结束后冷却收缩，短时间内体积的膨胀和收缩会引起超声信号的产生。如图 1 所示，超声波自局部放电位置以球面波形式向外传播。光纤传感探头由 60m 的传感光纤绕制在聚醚醚酮芯轴上，弹性芯轴受到超声波的作用发生径向形变并带动光纤发生应变，光纤的物理长度、纤芯直径以及内部光密度会随之变化，进而改变传感光纤中的光相位和强度，传感光与参考光在耦合器内发生干涉，干涉光功率与超声信号的强度相关，通过探测光功率即可对实现对外部声波的检测。

基于外差干涉原理的光纤超声传感系统基本结构如图 2 所示。激光器发出的光通过 1×2 耦合器被分为两路，分别进入参考臂与传感臂。参考臂的光进入声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)，AOM 的核心部件是一块声光晶体，驱动模块的射频信号作用于晶体之上，使晶体率折射发生变化，对经过的光信号产生调制，本文选择驱动的频率为 200 MHz，因此参考光经过 AOM 后发生 200 MHz 的移频。传感臂的核心器件为光纤传感探头，传感光经过会受到超声信号的相位调制，两路光信号通

过 2×2 耦合器发生干涉，利用平衡光电探测器 (balanced photoelectric detector, BPD)对干涉光功率进行检测；BPD 由两个光电探测器及一个差分放大器组成，通过对两路光电探测器的输出信号进行差分处理，可以有效抑制来自环境的共模噪声。对 BPD 输出信号进行解调即可得到干涉光相位信息，从而实现超声信号的测量。

激光器输出的光信号^[30]可以表示为

$$E_0 = 2A \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中：2A 为激光器输出光的振幅； f_0 为激光器的中心频率。

激光器输出的光信号经过 1×2 耦合器后，被分为两路功率相位均相同的光信号，两路光信号可以表示为

$$E_1 = E_2 = A \cos(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

式中 A 为传感臂和参考臂信号的幅值。假设上路延迟光纤与 AOM 带来的时延为 τ_1 ，则参考光经过延迟光纤与 AOM 后的信号^[30]可以表示为

$$E_{11} = A \cos[2\pi(f_0 + f_1)t - 2\pi f_0 \tau_1] \quad (3)$$

式中 f_1 为声光调制器带来的移频量，数值为 200 MHz。传感臂的光信号经过传感探头时被待测信号调制，考虑绕制传感探头光纤的长度带来的时延 τ_2 ，输出信号^[30]可以表示为

$$E_{21} = A \cos[2\pi f_0(t - \tau_2) + \varphi(t)] \quad (4)$$

式中 $\varphi(t)$ 为超声信号对传感光带来的相位调制量。

参考光与传感光在耦合器中发生干涉，光电探测器检测到的干涉光强^[31]为

$$I \propto \psi \cos[2\pi f_1 t + 2\pi f_0(\tau_2 - \tau_1) - \varphi(t)] \quad (5)$$

式中 ψ 为光电探测器输出信号的幅值。

利用图 3 所示的微分交叉相乘(differential cross multiplication, DCM)算法对光电探测器信号进行解调即可得到干涉光的相位信息 $\varphi(t)$ ，实现对超声信号的精准测量^[31]：

$$\varphi(t) \propto \varphi(t) + 2\pi f_0 \cdot (\tau_1 - \tau_2) \quad (6)$$

相较于传统的干涉型光纤传感器，基于外差干涉原理的光纤传感器利用 AOM 引入 $f_1=200$ MHz 的移频量，将光电探测器输出信号的中心频率移离噪声集中的低频区，有效提升系统的抗干扰能力和信噪比。传统的干涉型光纤传感系统的输出^[30]可以表示为

$$\varphi'(t) = \psi \cos[\varphi(t) + 2\pi f_0(\tau_1 - \tau_2)] \quad (7)$$

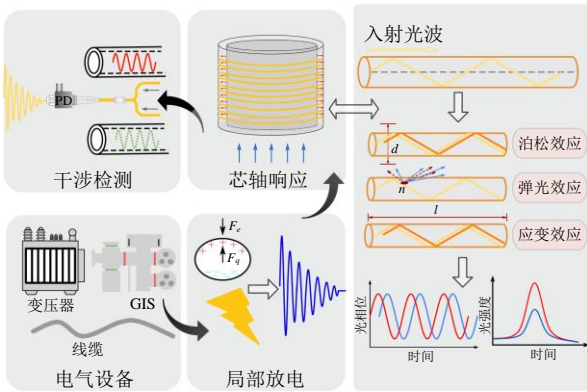


图 1 干涉型光纤传感系统局部放电检测原理

Fig. 1 Principle of PD-induced ultrasonic detection based on optical interference method

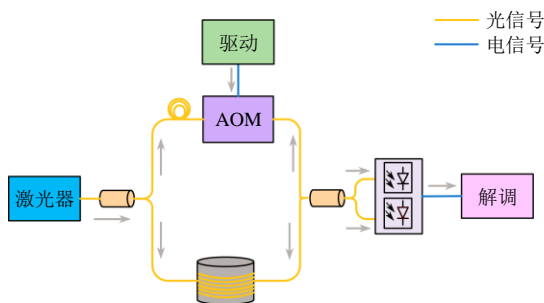


图 2 外差干涉型光纤传感系统基本结构

Fig. 2 Basic structure based on Heterodyne interferometric fiber ultrasonic sensing system

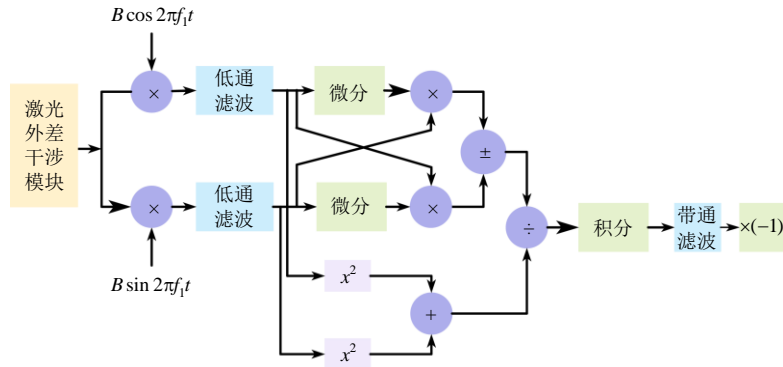


图 3 微分交叉相乘算法

Fig. 3 Differential cross multiplication algorithm

式中 ψ 为与光强相关的值。因此传统干涉型光纤传感系统输出会受到光强及偏振态的影响，且待测信号 $\varphi(t)$ 中的噪声会影响初始相位，使得传统干涉型光纤传感器出现“幅值衰落”的现象，而外差干涉型光纤传感器将探头感知的待测信号完全解调出来，规避光强和偏振态的影响，解决“幅值衰落”

问题，使输出信号更加稳定。

如图 4 所示，激光器输出的信号会随着时间出现相位抖动，在频域上表现为激光频谱变为有一定宽度的包络。线宽是激光器输出不稳定度的直观表征，在频域上定义为光功率峰值下降 3 dB 处(半高全宽)时所对应的频带宽度。

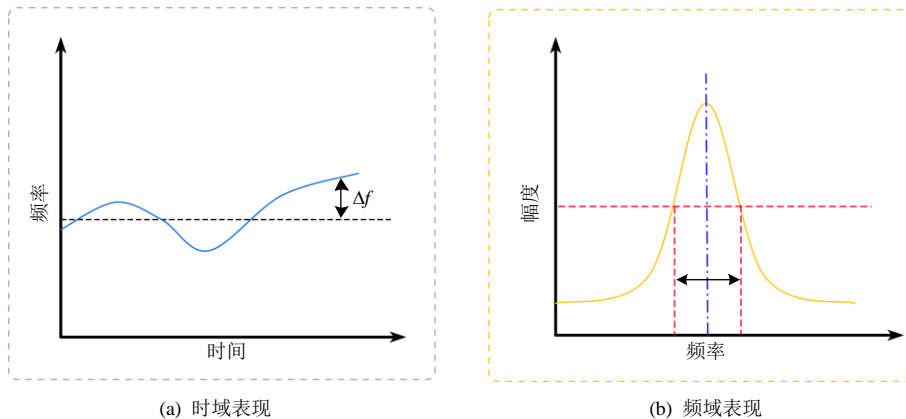


图 4 激光器输出光示意

Fig. 4 Schematic diagram of laser output light

基于以上分析，激光器输出光频率是随时间不断变化的，可以用 $f_0(t)$ 表示，因此系统输出信号可以表示为

$$\phi(t) \propto \varphi(t) + 2\pi f_0(t) \cdot (\tau_1 - \tau_2) \quad (8)$$

式中： $\varphi(t)$ 为系统检测到的信号； $2\pi f_0(t) \cdot (\tau_1 - \tau_2)$ 为系统的相位噪声。

2 光纤传感系统仿真

2.1 传感系统仿真模型

为了验证理论分析的准确性以及外差干涉型光纤传感系统的可行性，本文基于图 5 中的光学仿真平台，构建完整的光纤超声传感系统仿真模型。仿真模型由信号发射、声光移频、相位调制、信号接收、相位解调及信号观测几个模块组成。激光器发出连续光波(continuous wave, CW)，声光调制器

利用马赫增德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)和光滤波器(optical filters, OF)模拟，传感臂利用相位调制器(phase modulator, PM)模拟光纤探头，利用两个光电探测器加移相器 θ 组成平衡光电探测器，延迟光纤以及光纤探头带来的延时量由时延模块进行设置。

激光器中心波长 f_0 设置为 1550 nm，正弦信号发生器 1 模拟 AOM 驱动信号，其频率 f_1 设置为 200 MHz，正弦信号发生器 2 模拟待测信号 $\varphi(t)$ ，此处设置为频率为 100 kHz 的单频信号，BPD 输出的信号利用 DCM 算法进行解调，利用光谱仪、频谱仪和示波器对仿真过程量及结果进行监测。

从图 6(a)可以看出，参考臂信号相较于激光器的中心频率 f_0 实现了 $f_1=200$ MHz 的频移，传感臂的信号经过相位调制后在中心频率两侧出现 100 kHz

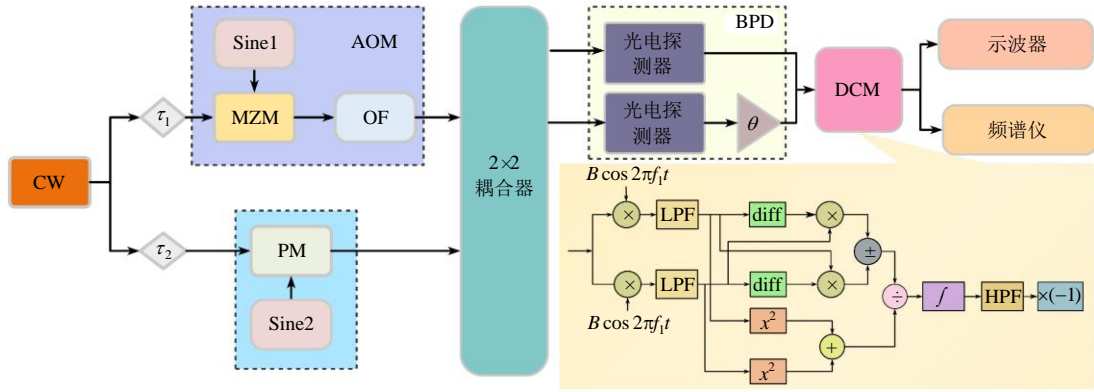
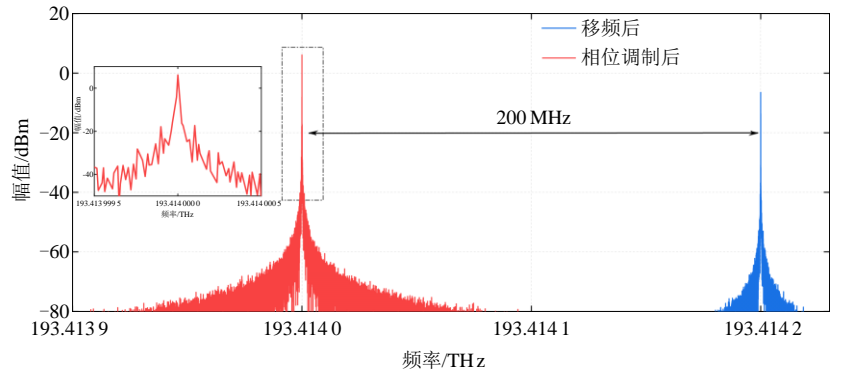
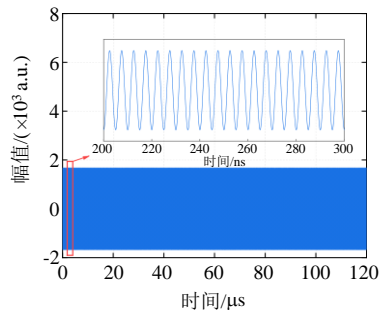


图 5 光纤传感系统仿真模型

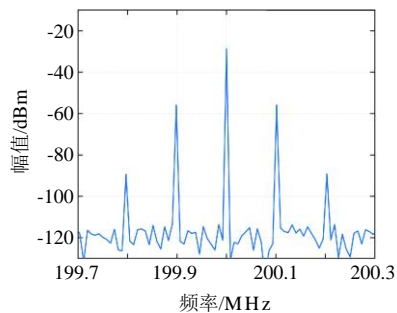
Fig. 5 Simulation model of optical fiber sensing system



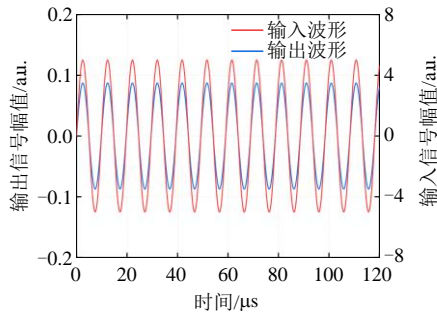
(a) 参考臂与传感臂输出光谱



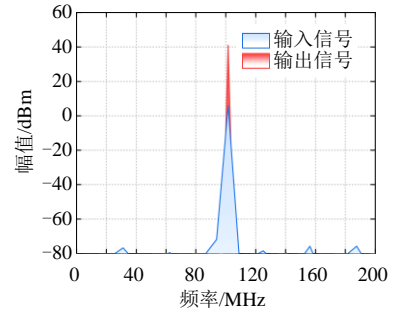
(b) BPD 输出信号波形



(c) BPD 输出信号频谱



(d) 解调输出信号波形



(e) 解调输出信号频谱

图 6 仿真结果

Fig. 6 Results of simulation

的一阶边带，100 kHz 即为待测信号 $\varphi(t)$ 的频率。从图 6(b)、(c) 可以看出，光电探测器输出的信号频率为 200 MHz，与声光调制器的移频量 f_1 同频，并且带有频率为 100 kHz 的相位，其频谱表现为 200 MHz 的中心频率且两侧有 100 kHz 的 n 阶边带。利

用 DCM 算法对 BPD 信号进行解调，图 6(d)、(e) 为输入输出信号的波形和频谱，受相位调制器调制深度的影响，输入输出信号在幅值上有差异，但在频率上具有一致性，仿真表明光纤传感系统能够实现对外界信号的有效检测。

2.2 系统噪声仿真

为了进一步研究激光器线宽以及上下两路光程差对系统噪声的影响,分别设置激光器线宽为100 Hz、1 kHz、10 kHz 以及 100 kHz,通过设置两路时延从而改变两路的光程差,在 0~50 m 范围内设置 500 个测点,相位调制器施加激励设置为 0,此时可以测得系统的噪声水平,如图 7 所示。

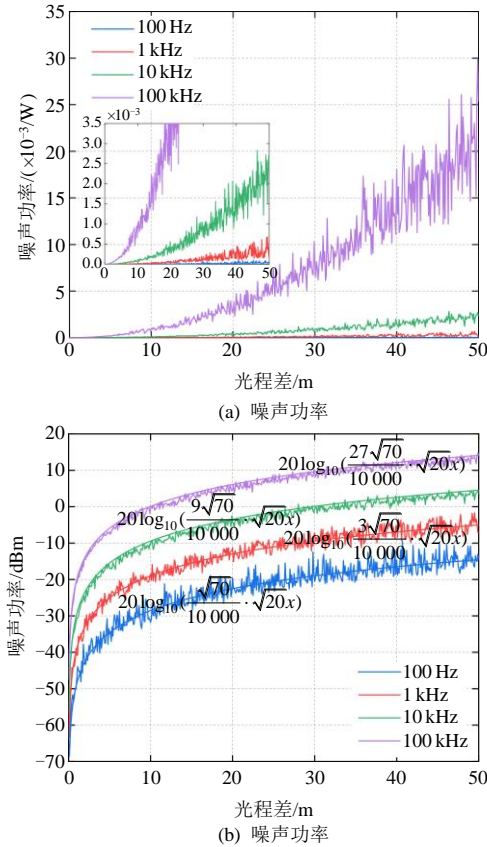


图 7 系统噪声功率仿真结果

Fig. 7 Simulation results of system noise power

根据上文分析,系统噪声均方根 N_{rms} 可以写为

$$N_{rms} = k \cdot s \tag{9}$$

式中: s 为光程差; k 为由激光器线宽决定的系数,因此噪声功率(单位 W)表示如下:

$$P_{noise(W)} = \frac{(ks)^2}{50} \tag{10}$$

式中 50 为标准电阻的阻值, Ω 。将噪声功率转化为对数形式(单位 dBm),如下:

$$P_{noise(dBm)} = 10 \log_{10} 1000 \cdot P_{noise(W)} = 10 \log_{10} 20(ks)^2 \tag{11}$$

如图 7(b)所示,对噪声功率曲线进行拟合求出 k 值。可知,线宽每增大 10 倍, k 值约增大 3 倍。将仿真中相位调制器的激励设置为幅值为 5 a.u. 的 100 kHz 正弦信号,记录每个测点下的系统响应并

计算信噪比,得到图 8 所示结果。

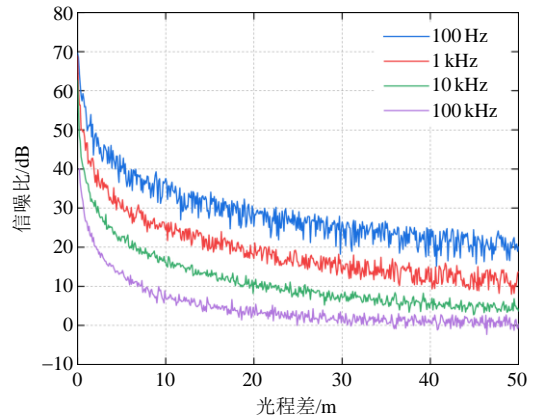


图 8 系统信噪比仿真结果

Fig. 8 Simulation results of SNR of the system

信噪比 I 定义为系统响应 $P_{response}$ 与系统噪声 P_{noise} 的比值,如下所示:

$$I = 10 \log_{10} \frac{P_{response(W)}}{P_{noise(W)}} = 20 \log_{10} \frac{R_{rms}}{N_{rms}} \tag{12}$$

式中 R_{rms} 为系统响应均方根。将图 7 中的 k 系数代入式(12)即可得到与仿真结果相对应的曲线。

3 光纤传感系统相位噪声测试

为了进一步探究光程差以及激光器光程差对于系统相位噪声以及信噪比的影响,本文搭建了如图 9 所示的试验拓扑。将声发射传感器及光纤探头放置于 30 cm×30 cm 的钢板之上,函数发生器驱动声发射传感器发出不同频率的单频超声信号,选择 100 与 3 kHz 线宽的两个激光器作为光纤传感系统的激励光源,设置两个激光器输出相同功率的光信号。改变延迟光纤长度,使上下两路光程差为 0、10、20、30、40、50 m。利用 LabVIEW 程序自动采集不同频率下 BPD 输出信号并进行解调。

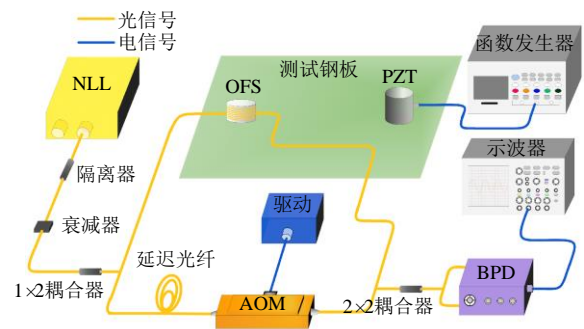


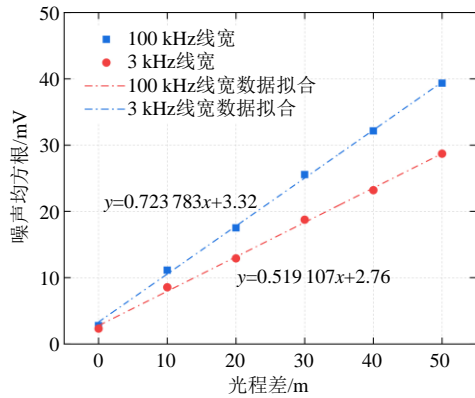
图 9 信噪比测试试验拓扑

Fig. 9 Experimental topology for SNR testing

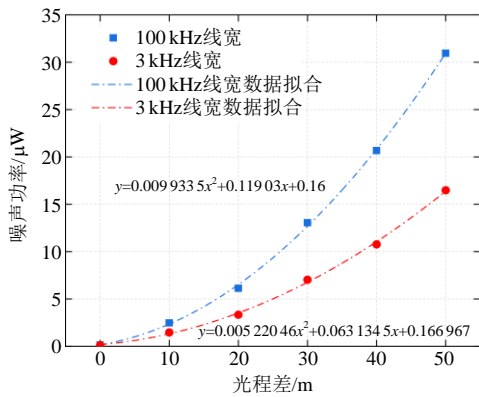
3.1 噪声水平测试

在未施加激励时测试不同测点下的噪声波形

均方根以及噪声功率，每个测点采集 10 组数据并求平均值，如图 10 所示。



(a) 噪声均方根



(b) 噪声功率

图 10 系统噪声水平测试结果

Fig. 10 Test results of system noise level

由图 10 可知，随着线宽以及光程差的增加，传感系统的噪声水平也会增加，噪声均方根值满足线性规律，并且 100 kHz 线宽下噪声均方根随光程差的增加速度大于 3 kHz 线宽，两者拟合曲线的斜率分别 0.72 与 0.52。噪声功率曲线满足二次函数规律，100 kHz 与 3 kHz 下的噪声功率拟合曲线表达式的二次项系数分别 0.01 和 0.005。

3.2 信噪比测试

设置函数发生器输出 80~140 kHz 的正弦信号，采集两种线宽及不同光程差下的波形并结合系统底部噪声计算出信噪比，得到如图 11 所示的结果。

3.2.1 光程差影响

为了更好的观察光程差对于信噪比的影响，分别绘制出 3 与 100 kHz 线宽下不同光程差的信噪比曲线，如图 12 所示。

由图 12 可知，随着参考臂与传感臂光程差的减小，光学传感检测系统的信噪比会逐渐增大，以峰值频率 115 kHz 下图 12(b)中的信噪比曲线为例，40、30、20、10、0 m 光程差下的信噪比分别较 50 m

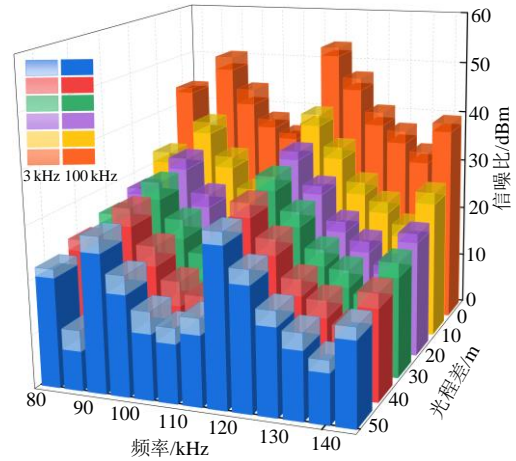
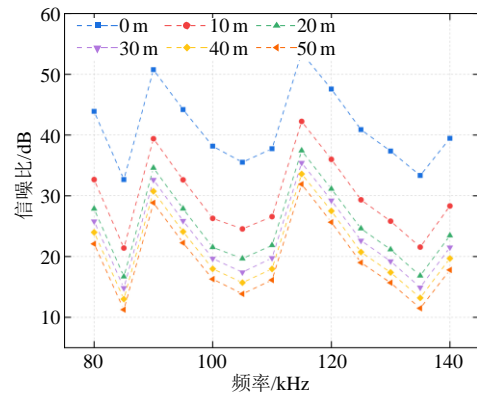
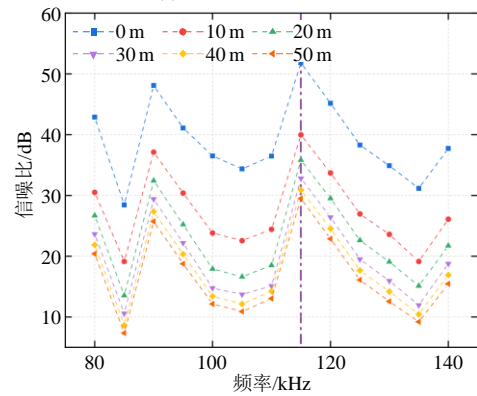


图 11 系统信噪比测试结果

Fig. 11 Test results of SNR of the system



(a) 3 kHz 线宽下信噪比曲线



(b) 100 kHz 线宽下信噪比曲线

图 12 不同光程差下的信噪比曲线

Fig. 12 SNR under different optical path difference

光程差下增加了 1.26、2.61、5.76、11.67 和 24.36 dB，且不同频率处改变光程差对信噪比的提升效果基本一致，如图 13 所示。

可知，上下路光程差越小，光程差对于信噪比的影响越明显，例如在 115 kHz 频率处，3 kHz 线宽下 40 与 50 m 两个光程差信噪比相差 1.67 dB，而 10 与 0 m 光程差下的信噪比相差 11.31 dB。

3.2.2 激光器线宽影响

为了更明显地观察线宽对于传感系统信噪比

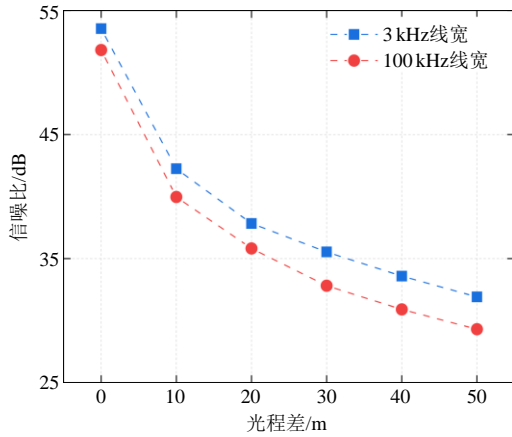
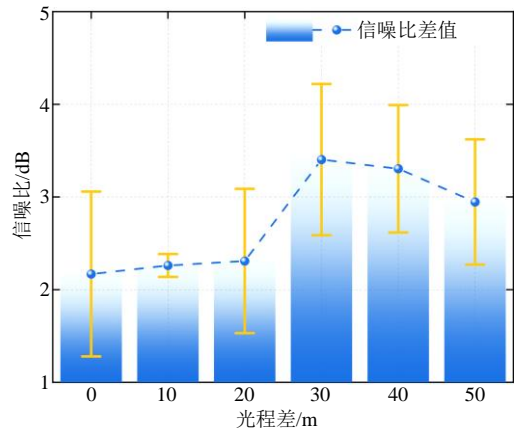


图 13 115 kHz 频率处不同线宽下的信噪比

Fig. 13 SNR of two linewidths at 115 kHz frequency

的影响,对比了 0、10 以及 50m 光程差下,应用不同线宽激光器作为激励时测试的信噪比数据,并计算所有频率点下 3 kHz 线宽相较于 100 kHz 线宽信噪比提升均值,如图 14 所示。

由图 14 可知,线宽对信噪比有一定的提升效果,在不同光程差下线宽对信噪比的提升效果呈现先增加后减小的趋势,这与图 8 的仿真结果相符合,



(b) 不同线宽下的信噪比差值

图 14 不同线宽下的信噪比

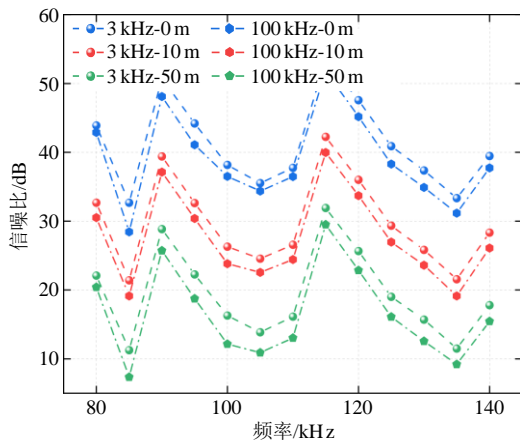
Fig. 14 SNR at different linewidths

在六种光程差下,所有频率下的信噪比平均值分别提升 2.17、2.21、2.31、3.40、3.30、2.95 dB。

3.3 局部放电测试

为了探究光程差以及激光器线宽两个参数对光纤传感系统局部放电超声检测效果的影响,将试验平台中的单频声发射激励换为球板放电模型,如图 15 所示。在金属球电极与测试钢板之间添加聚酰亚胺(polyimide, PI)薄膜,设置函数发生器的频率为 50 Hz,输出波形为正弦波,函数发生器连接 2000 倍功率放大器对球电极施加高压,当施加的电压达到聚酰亚胺薄膜的起始放电电压(partial discharge inception voltage, PDIV)后会产生局部放电,利用射频检波模块对 BPD 输出的信号进行硬件解调,实现对局部放电超声信号的检测。测试过程中将 PZT 作为对比传感器同时对局部放电进行检测。

设置两种不同线宽激光器输出相同功率的光信号,作为光纤传感系统的激励光,在不同线宽的



(a) 不同线宽下的信噪比曲线

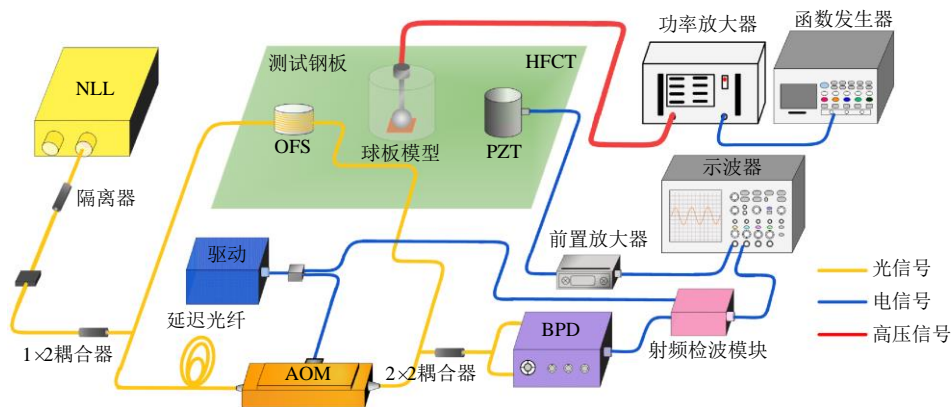


图 15 光学传感系统局部放电检测试验平台示意图

Fig. 15 Schematic diagram of partial discharge test platform for optical sensing system

光激励下，分别设上下两路光程差为 50 与 0m，对比不同线宽以及光程差下光纤传感系统对于球板

模型局部放电超声信号的检测效果，对球电极施加的电压幅值设置为 2kV，如图 16 所示。

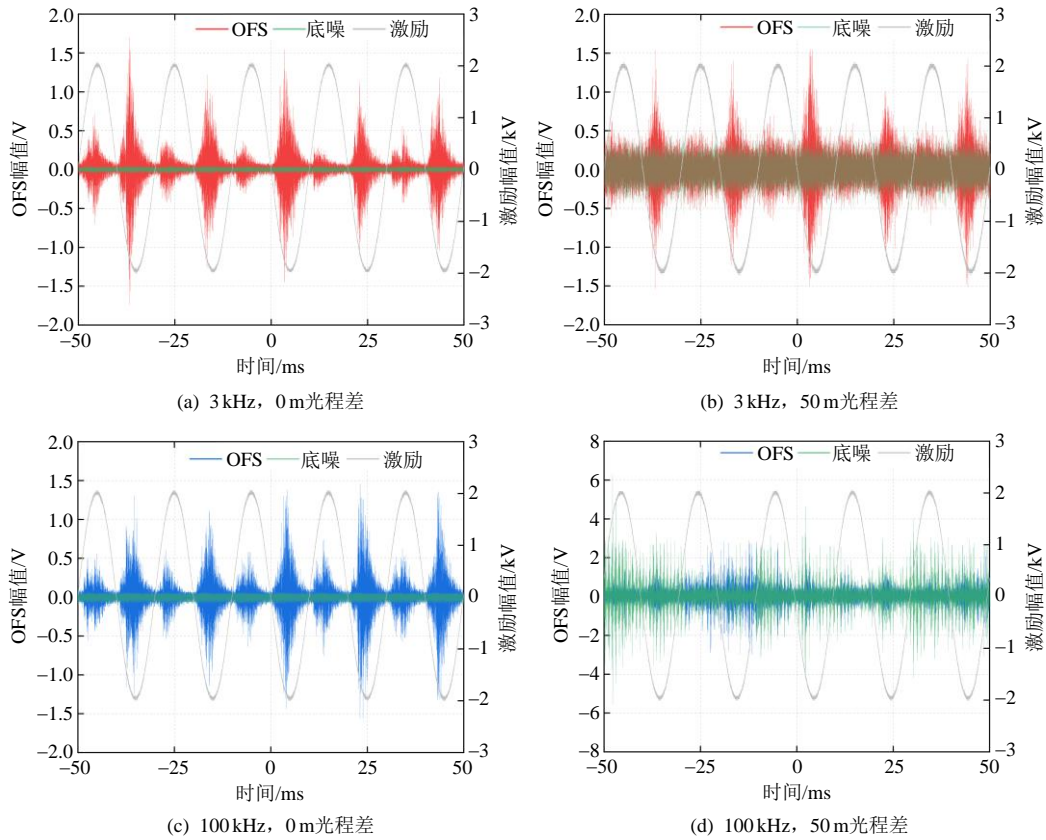


图 16 不同参数组合下的局部放电检测波形

Fig. 16 Waveform of partial discharge detection under different parameter combinations

在 0m 光程差下，图 16(a)中的底部噪声较图 16(c)中略微有所下降；在 50 m 光程差下，图 16(b)、(d)的底部噪声较图 16(a)、(c)有明显上升，在不同组合下检测出的局部放电的超声信号幅值基本不变。图 16(b)中底部噪声水平的增加使得部分局部放电信号波形被噪声淹没，图 16(d)中噪声幅值大于局部放电信号幅值，无法观察到局部放电信号。为了对局部放电检测效果进行量化，计算 200 个周期内局部放电检测信号峰值信噪比的平均值进行对比，其中峰值信噪比 H 的计算方式为：

$$H = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_{\max}}{N_{\text{rms}}} \right) \quad (13)$$

式中： R_{\max} 为响应的最大值； N_{rms} 为噪声的均方根值。测试得出，采用 3kHz 线宽且匹配两路光程差的情况下，信噪比相较于图 16(b)—(d)，3 个组合分别提升了 21.92、1.5 与 30.16 dB。通过减小激光器线宽以及匹配上下路光程差可以有效提升信噪比，提升局部放电信号检测效果。

4 传感器对比测试

4.1 灵敏度对比

为了比较光纤传感器相较于 PZT 的检测性能，本文参照《GB/T19801-2005 无损检测声发射检测声发射传感器的二级校准》^[32]，搭建了如图 17、18 所示的超声传感器灵敏度测试平台。

该平台以内部结构均匀且表面平整的钢性圆柱作为超声传递平台，声发射传感器选择 OLYMPUS 公司的 V103-RM 传感器，参考传声器选择在宽频范围内灵敏度曲线平坦的富士 REF-VL 传感器。待

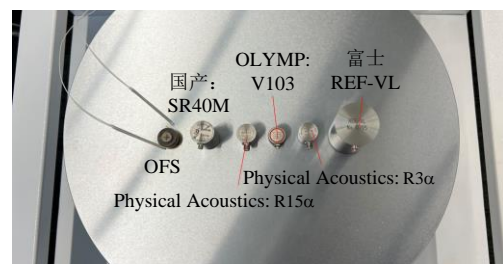


图 17 超声传感器型号

Fig. 17 Model number of the ultrasonic sensors

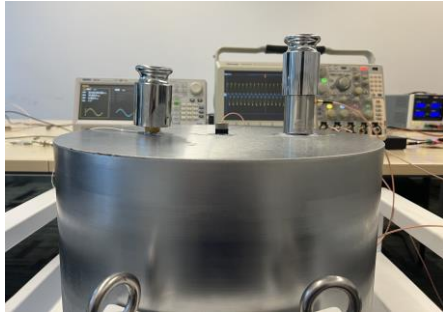


图18 传感器灵敏度测试平台

Fig. 18 Ultrasonic sensor sensitivity test platform

测传感器选择 SR40M 传感器、美国声学 R3 α 、R15 α 以及光纤传感器(Optical Fiber Sensor, OFS)。声发射传感器与函数发生器连接并放置于钢块中心位置,用以发出频率可调的单频超声信号,参考传感器与待测传感器对称放置于声发射传感器的两侧,从而保证两个传感器受到的声压一致。根据参考传感器以及待测传感器的频率响应即可计算出待测传感器的标准灵敏度:

$$D(f) = \frac{U(f)}{S(f)} \cdot S_0(f) \quad (14)$$

式中: $U(f)$ 为待测传感器的频率响应; $S(f)$ 为参考传感器的频率响应; $U_0(f)$ 为参考传感器的标定灵敏度。

灵敏度测试结果如图 19、表 1 所示。可以看出,在检测频段内 OFS 的灵敏度明显高于 3 种 PZT。在 20~120 kHz 频率范围内, OFS 相较于 R3 α 、R15 α 、SR40M 传感器, 3 种压电传感器在峰值灵敏度 S_p

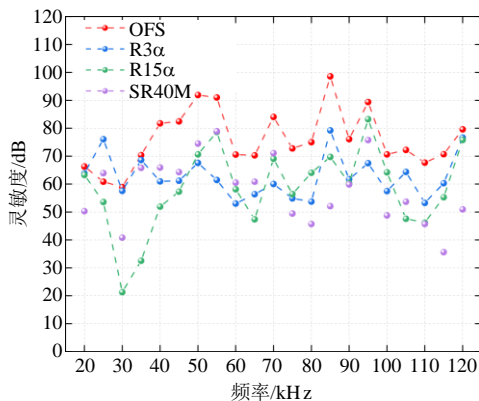


图19 超声传感器灵敏度曲线

Fig. 19 Sensitivity curve of ultrasonic sensors

表1 不同传感器物理参数及灵敏度

Table 1 Physical parameters and sensitivity of sensors

传感器	S_p /dB	S_m /dB	D/mm	H/mm	M/g
R3 α	79.20	62.65	19	22.4	41
R15 α	83.23	58.39	19	22.4	34
SR40M	78.91	57.82	22	36.8	82
OFS	98.58	76.24	15	12	4.1

分别提升了 19.38、15.35、19.67 dB, 均值灵敏度 S_m 分别提升了 13.59、17.85、18.42 dB。并且相较于压电传感器, 本文研制的光纤传感器的体积更小、重量更轻。

4.2 局部放电检测对比

基于图 15 所示的试验平台, 将所研制的光纤超声传感器与现场检测最常用的 R15 α 传感器作对比。为了模拟干式变压器的匝间的多层绝缘单元, 设计了绝缘缺陷模型(见图 20), 将聚酰亚胺薄膜裁剪为 15 cm \times 5 cm 的薄膜, 折叠为 3 层层压样品, 并在中间层的中心设计直径为 0.2 mm 的圆形孔。通过绝缘胶将各层粘合在一起, 模拟干式变压器匝间绝缘错位或者损坏时产生的内部气隙, 试验前用无水乙醇对 PI 薄膜的表面进行擦拭, 并置于 60 $^{\circ}$ C 恒温干燥箱中, 从而确保样品表面的干燥与清洁。为了防止空气中的电晕放电, 选用柱电极作为高压电极并利用环氧树脂对样品、电极与钢板进行密封, 在树脂固化过程中进行抽真空处理以去除气泡。

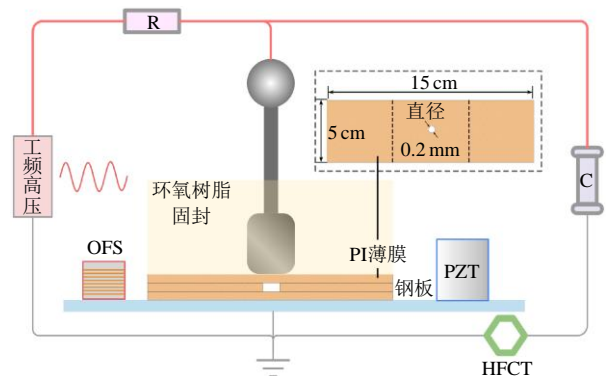


图20 绝缘缺陷构建及测试

Fig. 20 Insulation defect construction and testing

光纤探头与 PZT 对称放置于电极两侧, 将 HFCT 耦合在测试电路的接地侧, 避免超声传感器在检测过程中出现错检漏检的情况。对柱电极施加工频正弦波电压, 电压幅值为 3.5 kV, 利用 3 种传感器对同一时刻的放电进行检测, 如图 21 所示。

由图 21 可以看出, OFS 灵敏度明显更高, 检测幅值较 PZT 提升明显。在更高的检测幅值下, OFS 的局部放电超声波形在相较于底部噪声更加突出, PZT 的峰值信噪比为 20.12 dB, OFS 传感器的峰值信噪比为 32.49 dB, 比 PZT 高 12.37 dB。结果表明, OFS 在时域波形上具有更好的检测效果。为进一步验证 OFS 相较于 PZT 的检测能力, 对传感器检测到的超声信号进行傅里叶变换, 获取两种传感器检测波形的频率-幅度分布信息, 如图 22 所

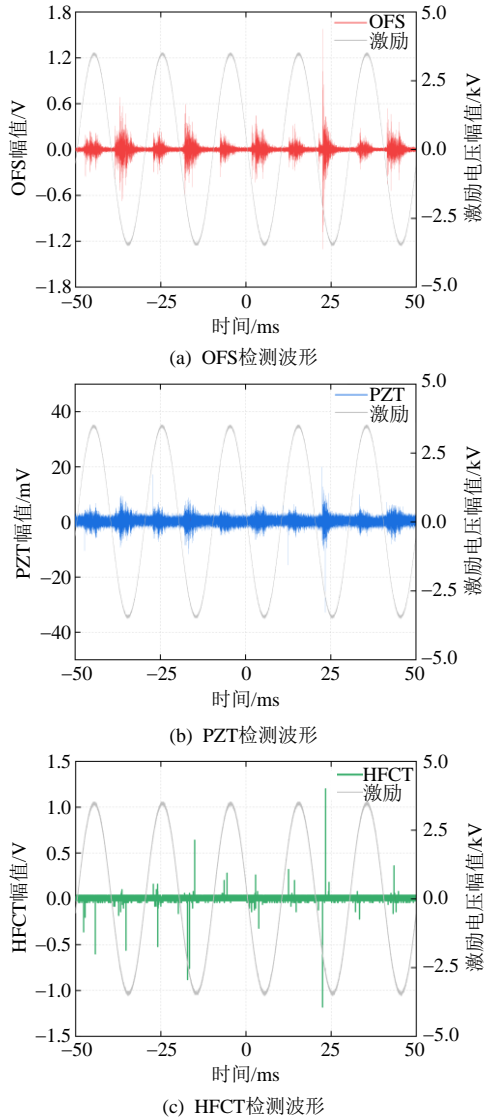


图 21 不同传感器局部放电检测波形

Fig. 21 PD detection waveforms of different sensors

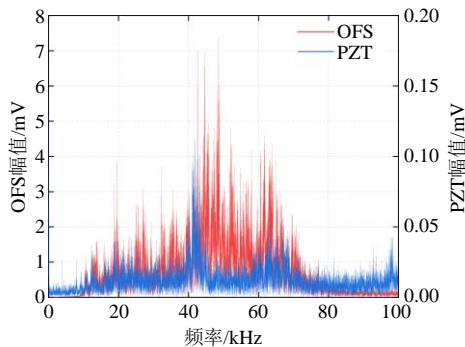


图 22 传感器检测信号频率-幅度分布

Fig. 22 The frequency-amplitude distribution of the signal detected by the sensors

示。可知，两种传感器测得局部放电超声信号的频段集中在 40~70 kHz 范围。相比之下，OFS 的局部放电超声信号更加集中和突出，检测频段更宽，局部放电超声频率信息更加丰富。

对于变压器、线缆、GIS 等设备的局部放电超

声检测，国家电网公司规定入网传感器的工作频带为 20~80 kHz^[33]，在灵敏度测试阶段已经证实超声传感器在该频段内的灵敏度显著高于压电传感器，对于局部放电的检测，同样表现优异的灵敏度及信噪比。相较于压电传感器，光纤探头由温度稳定性良好的光纤绕制而成，受温度影响极小，且温度带来的静态变化可以通过高通滤波器滤除，同时滤除设备低频振动的影响。与此同时，更小体积、更轻量化以及高绝缘的光纤探头保证了安装过程中的普适性、便捷性以及可靠性。

在同一电压下采集 150 个周期内放电信号，绘制出局部放电相位分辨谱图(phase resolved partial discharge, PRPD)，如图 23 所示。

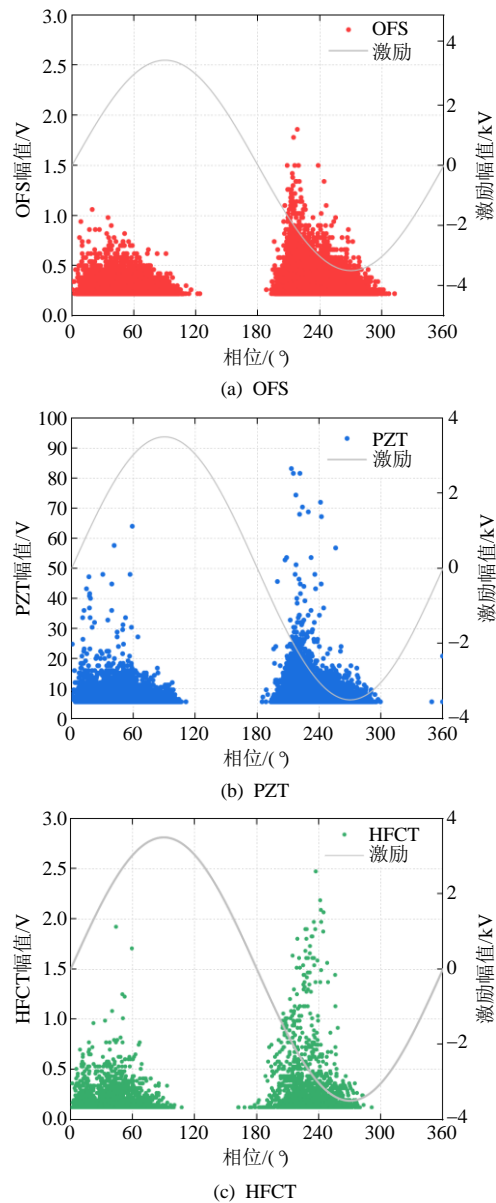


图 23 不同传感器的 PRPD 谱图

Fig. 23 PRPD spectra of different sensors

可知, 3种传感器的PRPD呈山峰状分布, 检测信号在正弦激励负半周下的放电幅值均大于正半周, 放电相位基本一致。可以看出, 光纤传感器检测波形可以很好地反映放电幅值、放电相位以及放电频次等信息。

5 结论

本文设计了一种高灵敏度的基于外差干涉的光纤超声传感系统, 主要结论如下:

1) 外差干涉型光纤传感系统在传感臂通过声光调制器实现百MHz的频移, 可规避低频噪声影响, 同时提升系统抗干扰能力。传感系统输出不受偏振态以及光强的影响, 较常规干涉型拓扑更加稳定。

2) 外差干涉型光纤传感器的相位噪声与激光器线宽以及双干涉臂光程差呈正相关关系, 通过匹配光程差并减小线宽, 光纤传感系统测量单频超声的信噪均值提升 24.72 dB, 测量局部放电超声信号的信噪比提升 30.16 dB。

3) 基于外差干涉的光纤传感器可以在探头体积更小、重量更轻的前提下实现更高的检测灵敏度, 在 20~120 kHz 检测频段内相较于 3 种压电传感器的峰值灵敏度提升 15 dB 以上, 均值灵敏度提升 13 dB 以, 对于局部放电超声信号的响应信噪比相比于 R15 α 提升 12.37 dB。

在此基础上, 所研光纤传感器与电力设备的融合安装以及长期运行下的可靠性问题需进一步进行研究, 以实现传感器在实际电力装备中的长期可靠应用。

参考文献

- [1] 邵梦雨, 齐波, 郑书生, 等. 换流变压器阀侧套管局部放电电磁波传播规律的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5398-5408.
SHAO Mengyu, QI Bo, ZHENG Shusheng, et al. Simulation study on electromagnetic wave propagation law of valve side bushing partial discharge in converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5398-5408(in Chinese).
- [2] 孔凡珺, 马径坦, 谌珉灏, 等. SF₆压力对GIS典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 233-241.
KONG Fanjun, MA Jingtan, CHEN Minhao, et al. Effect of SF₆ pressure on the sensitivity of partial discharge detection of typical defects in GIS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 233-241(in Chinese).
- [3] 居来提·阿不力孜, 刘琪, 余亮亮, 等. 高压电缆局部放电甚高频传感检测技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(S1): 27-31.
ALBUNZI K, LIU Qi, YU Liangliang, et al. VHF sensing and detection technology of partial discharge in high voltage cable[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(S1): 27-31(in Chinese).
- [4] 苏志雄, 孙康, 丁浩, 等. 基于脉冲电流和紫外脉冲的多源局部放电诊断方法[J]. 绝缘材料, 2024, 57(1): 101-108.
SU Zhixiong, SUN Kang, DING Hao, et al. Multi-source partial discharge detection method based on pulse current method and ultraviolet pulse method[J]. Insulating Materials, 2024, 57(1): 101-108(in Chinese).
- [5] WANG Haotian, CHEN Huan, ZHANG Zhaoyu, et al. Design and optimization for GIS UHF-Overvoltage composite sensor[J]. Measurement, 2025, 242: 115846.
- [6] 芮逸凡, 王亚林, 周明瑜, 等. 基于柔性馈电螺旋天线和硅光电倍增管的GIS局部放电联合传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3610-3620.
RUI Yifan, WANG Yalin, ZHOU Mingyu, et al. Partial discharge optic-electric integrated sensing technology based on helical antenna attached flexible feeding network and silicon photomultiplier in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3610-3620(in Chinese).
- [7] ALI M S, BAKAR A H A, OMAR A, et al. Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216: 109064.
- [8] 张丽娜, 黄恽, 汪良杰, 等. 高灵敏硅凹槽膜片型光纤F-P局部放电超声传感器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 2-9.
ZHANG Lina, HUANG Yi, WANG Liangjie, et al. High sensitivity fiber optic F-P partial discharge ultrasonic sensor based on a grooved silicon diaphragm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 2-9(in Chinese).
- [9] CHENG Yongkang, WANG Taiqi, XU Chao, et al. Measurement and simulation of partial discharge using optical signal based on crystal fluorescent fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 82: 103626.
- [10] 江军, 吴雪瑞, 赵晓林, 等. 基于光纤S锥的电力变压器油中微水传感研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 425-433.
JIANG Jun, WU Xuerui, ZHAO Xiaolin, et al. Research on moisture sensing in power transformer oil based on

- s-shape optical fiber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 425-433(in Chinese).
- [11] 史荣斌, 王思涵, 马国明, 等. 基于声聚焦结构的局部放电光纤超声传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8518-8526.
- SHI Rongbin, WANG Sihan, MA Guoming, et al. Optical fiber ultrasonic sensing for partial discharge based on acoustic focusing structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8518-8526(in Chinese).
- [12] TIAN Tian, ZHOU Xiu, WANG Sihan, et al. A π -phase-shifted fiber Bragg grating partial discharge sensor toward power transformers[J]. Energies, 2022, 15(16): 5849.
- [13] MEITEI S N, BORAH K, CHATTERJEE S. Partial discharge detection in an oil-filled power transformer using fiber Bragg grating sensors: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10304-10316.
- [14] LI Shuai, ZHANG Yabin, MA Chunqiang, et al. MEMS optical fiber F-P hydrophone based on corrugated PET diaphragm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.
- [15] GAO Chaofei, WANG Wei, SONG Shu, et al. Localization of partial discharge in transformer oil using Fabry-Pérot optical fiber sensor array[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2279-2286.
- [16] 张猛, 周宏扬, 马国明, 等. 光纤 GIS 局放超声检测系统相位反馈控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4138-4145.
- ZHANG Meng, ZHOU Hongyang, MA Guoming, et al. Phase feedback control of optical fiber GIS partial discharge ultrasonic testing system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4138-4145(in Chinese).
- [17] QIAN Sen, CHEN Hao, XU Yang, et al. High sensitivity detection of partial discharge acoustic emission within power transformer by SAGNAC fiber optic sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2313-2320.
- [18] DANDRIDGE A. Fiber optic sensors based on the Mach-Zehnder and Michelson interferometers[M]//UDD E, JR W B S. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. New York: Wiley, 2024: 213-248.
- [19] HAO Yanpeng, CHEN Yanwen, CHEN Yun, et al. A partial discharge detection system for XLPE cable terminals and acoustic wave sensing characteristics based on fiber optic Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21782-21790.
- [20] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6452-6459.
- ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the Michelson fiber optic interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6452-6459(in Chinese).
- [21] ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. A high sensitivity optical fiber interferometer sensor for acoustic emission detection of partial discharge in power transformer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 24-32.
- [22] SHI Rongbin, WANG Sihan, LIN Zhongqin, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection in transformer bushing based on Mach-Zehnder fiber optic interferometer[C]//2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Chengdu: IEEE, 2021: 1-5.
- [23] LIU Tingting, CUI Jie, CHEN Desheng, et al. A new demodulation technique for optical fiber interferometric sensors with $[3 \times 3]$ directional couplers[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(1): 12-15.
- [24] WEI Shuangjiao, LI Bin'ai, XUE Min, et al. Research on an improved phase generation carrier demodulation algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2219: 012033.
- [25] 张楠. 基于外差检测的干涉型光纤水听器阵列系统若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- ZHANG Nan. Study on several key technologies of interferometric fiber optic hydrophone array system based on heterodyne detection scheme[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013(in Chinese).
- [26] MONCHALIN J P. Heterodyne interferometric laser probe to measure continuous ultrasonic displacements[J]. Review of Scientific Instruments, 1985, 56(4): 543-546.
- [27] KOKKONEN K, KAIVOLA M. Scanning heterodyne laser interferometer for phase-sensitive absolute-amplitude measurements of surface vibrations[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 063502.
- [28] MARTINUSSEN H, AKSNES A, ENGAN H E. Wide frequency range measurements of absolute phase and amplitude of vibrations in micro- and nanostructures by optical interferometry[J]. Optics Express, 2007, 15(18): 11370-11384.
- [29] CHANG Xinyu, YANG Yuan, LU Junsheng, et al. A versatile heterodyne interferometer for vibration

- measurement and analysis of micro-structures[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(2): 026507.
- [30] 王巍, 丁东发, 夏君磊. 干涉型光纤传感用光电子器件技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- WANG Wei, DING Dongfa, XIA Junlei. Optoelectronic device technology of interferometric fiber sensing [M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese).
- [31] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, et al. Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 2467-2486.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 无损检测声发射检测声发射传感器的二级校准: GB/T 19801-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Nondestructive testing acoustic emission testing secondary calibration of acoustic emission sensors: GB/T 19801-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005(in Chinese).
- [33] 国家电网有限公司. 局部放电超声波检测仪技术规范: Q/GDW 11061-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- State Grid Corporation. Technical specification for partial discharge ultrasonic detector: Q/GDW 11061-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).



王睿智

收稿日期: 2024-05-06。

作者简介:

王睿智(1999), 男, 博士研究生, 主要从事先进光学传感、电气设备状态检测与故障诊断方面的研究工作, neunuaa@163.com;

*通信作者: 江军(1988), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事智能传感、电力设备的运行状态检测以及绝缘状态诊断方面的研究工作, jiangjun0628@163.com。

(责任编辑 胡琳琳)