

GIS 局放声发射信号光纤探测与噪声抑制方法研究

宋伟¹, 董曼玲², 詹振宇², 王思涵³, 苏迪^{1,4}, 陈志刚⁴, 辛伟峰², 马国明³

(1. 国网河南省电力公司, 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 3. 华北电力大学, 北京 102206; 4. 国网河南省电力公司郑州供电公司, 郑州 450052)

摘要: 超声信号测量是气体绝缘设备局部放电的有效在线检测方法之一。光纤干涉仪传感系统具有灵敏度高、抗电磁干扰等优点, 适合用于局放超声检测, 但易受环境噪声干扰, 影响信号测量。文中首先明确了光纤干涉仪超声信号传感原理, 在光纤干涉仪中引入了高频载波调制及下变频解调方法, 一方面克服了环境噪声对传感系统的影响, 消除了相位衰落造成的检测盲区, 另一方面降低了系统采样频率, 实现了超声信号的实时解调; 其次, 搭建超声检测平台, 验证下变频解调方法的有效性与准确性; 最后, 基于所研系统在某 1 000 kV 变电站 GIS 设备上进行现场检测实验, 捕捉到局放超声波形, 并通过 S 变换对现场检测中捕捉到的局放超声信号进行时频特征分析, 有效区分了局放信号与其他干扰信号。基于高频载波及下变频的光纤超声传感系统为气体绝缘设备局放超声监测提供了一种灵敏可靠的手段。

关键词: GIS; 局部放电; 超声传感; 光纤干涉仪; 下变频

Research on Optical Fiber Detection and Noise Suppression of GIS Partial Discharge Acoustic Emission Signal

SONG Wei¹, DONG Manling², ZHAN Zhenyu², WANG Sihan³, SU Di^{1,4}, CHEN Zhigang⁴, XIN Weifeng², MA Guoming³

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. State Grid Henan Electric Power Company Zhengzhou Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Ultrasonic signal measurement is one of the effective on-line detection methods of partial discharge in gas insulated equipment. The optical fiber interferometer sensing system has the advantages of high sensitivity and anti-electromagnetic interference, so it is suitable for partial discharge ultrasonic detection, but it is easily disturbed by environmental noise and affects the signal measurement. In this paper, firstly, the sensing principle of ultrasonic signal of optical fiber interferometer is defined, the phase change of sensing light under the action of ultrasonic signal is quantified, and the cause of phase fading is analyzed, secondly, the methods of high frequency carrier modulation and downconversion demodulation are introduced into the Michelson interferometer topology, which overcomes the influence of environmental noise on the sensing system and realizes the real-time demodulation of ultrasonic signal. Then, an ultrasonic measurement platform is built in the laboratory to verify the accuracy of the down conversion demodulation method. Finally, based on the research system, field testing experiments are carried out on the GIS equipment of a 1 000 kV substation, the partial discharge ultrasonic waveforms were successfully captured. The ultrasonic sensing system proposed in this paper offers a sensitive and reliable approach for detecting partial discharge in gas-insulated equipment.

Key words: GIS; partial discharge; ultrasonic sensing; optical fiber interferometer; frequency down conversion

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 以 SF₆ 作为绝缘介质, 具有传输损耗低、容性负载小、占地面积小、可靠性高等优点, 在电力系统中的占比逐年提高^[1-2]。然而, 在 GIS 安装或运行过程中, 设备内部极有可能存在金

属微粒、尖刺、气隙等杂质或缺陷, 对绝缘状态产生威胁^[3]。

绝缘故障早期表现为局部放电, 具有较大的随机性、偶发性^[4]。因此, 局部放电的在线监测有助于尽早发现气体绝缘设备内部缺陷, 避免其进一步发展为严重的绝缘故障, 提高运行可靠性^[5-6]。在运设备难以安装内置式传感器, 通常需要借助外置式测量手段实现局放监测。

基金项目: 国家电网河南省电力公司科技项目资助(521702230009)。

Project Supported by Science and Technology Project of Henan Electric Power Company of State Grid (521702230009).

特高频检测法与超声检测法是两种有效的局部放电外置式检测方法^[7]。但气体绝缘设备为全金属屏蔽，特高频信号难以传出，外置式传感器对内部局部放电灵敏度不佳。超声检测可外置使用、具有故障定位能力，可实现对气体绝缘设备局部放电的无损监测^[8]。

现场常将压电式超声换能器 (piezoelectric transducer, PZT) 作为传感器安装在设备外壳进行超声检测^[9-11]。然而，PZT 的检测灵敏度相对较低，无法完全满足现场对微弱超声的测量要求，且巡检式的检测效率较低，对于偶发放电信号检测效果不佳，难以实现异常信号的长期监测。

光纤传感技术具有灵敏度高、抗电磁干扰的优点^[12-15]，尤其在检测微弱声振信号方面展现出应用潜力，得到了国内外研究人员的高度关注^[16]。2015 年，德国柏林应用科学大学 Daniel Pepper 等以硅橡胶为局部放电模型，使用迈克尔逊光纤干涉仪进行了电缆绝缘放电的监测，光纤干涉仪的局放超声检测灵敏度与脉冲电流检测法相当^[17]。2019 年，华北电力大学马国明等提出了一种基于芯轴式光纤超声器与迈克尔逊干涉仪结构超声传感系统的 GIS 局放超声检测方法^[18]，在 126 kV GIS 上实现了为 82.5 dB 的平均灵敏度，比 PZT 传感器(R15a)高 18.7 dB。2022 年，该课题组提出声聚焦结构超声传感单元，局放检测的起始放电电压较 PZT 降低了 22.0%，信噪比较 PZT 提升了 24.5 dB^[19]。这些研究实现了高灵敏度局放超声检测，但是均为在实验室环境下进行试验测试，没有充分考虑现场噪声对传感系统的干扰。

光纤干涉仪具有较高的灵敏度，意味着更易受到环境噪声的干扰。由于基于光干涉原理，环境噪声在某些条件下会产生相位衰落，无法准确解调超声信号^[20]。因此，需要对干涉仪的抗干扰技术展开研究。

引入相位反馈机制是一种相位衰落问题的解决方案。2010 年，北京交通大学谢芳等在干涉仪的参考臂引入了一阶反馈电路驱动的压电陶瓷管，通过调节参考臂中相位补偿将环境干扰对传感臂的影响，但反馈电路的响应较慢，可用频带仅为 0~20 Hz，不满足气体绝缘设备局放超声检测需求^[21]。2020 年，华北电力大学马国明等提出基于 PZT 的快速相位跟踪反馈系统，有效抑制 1.8 kHz 以下低频干扰，实现了 GIS 局放超声的测量^[22]。但 PZT 具有迟滞特性，长期运行时相位跟踪反馈系统偏差

累加，工作点漂移，无法避免相位衰落^[23]。高频载波的方法同样可以消除相位衰落的影响^[19, 23]，但这种方法使数据量骤增，难以实现超声信号的实时解调，可能错过偶发信号，且对电信号采集设备频带要求高，增加了系统成本。论文[19]提出使用 RF 增益相位检波器对高频载波信号进行硬件解调，但该方法中相位检波器原理上无法解调超过 π 的相位变化，只适用于微小相位变化的测量。然而，现场检测中，GIS 可能存在以 100 Hz 为基频的机械振动，以及敲击、分合闸操作等振动信号干扰，导致声信号相位变化远超 $\pm\pi$ ，在此情况下，AD8302 无法正确解调相位信息。

为了抑制相位衰落，提高光纤干涉式超声传感系统在气体绝缘设备局部放电检测中的稳定性与解调速度，从而实现现场 GIS 局放超声信号的可靠监测，文中提出了一种基于高频载波与下变频检测的光纤干涉式超声传感方法，消除了相位衰落，降低了对信号采集设备的要求，实现了超声信号的快速采集和准确解调。

1 局放超声信号传感原理

光纤干涉仪的基本结构见图 1。激光源发出窄带激光，经 1×2 耦合器分为传感光和参考光两路，分别在传感光纤和参考光纤中传输。局部放电产生的超声信号直接作用在传感光纤上，对其中传输的传感光产生相位调制，而参考光未受到相位调制。因此，可以通过检测传感光与参考光的相位差来解调局放超声信号。

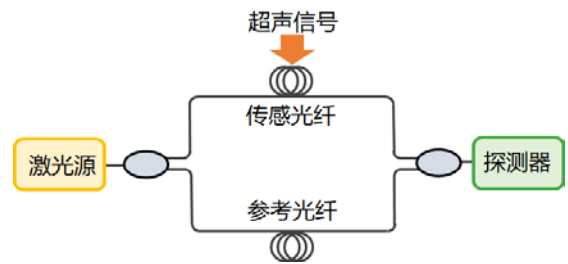


图 1 光纤干涉仪基本拓扑

Fig. 1 Basic structure of optical fiber interferometer

传感光相位变化 $\Delta\varphi$ 可表示为

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n \quad (1)$$

式(1)中： ΔL 是传感光纤长度变化量， m ； $\beta = 2\pi n/\lambda$ ， λ 为激光器中心波长， m ， n 为传感光纤纤芯的折射率； L 是传感光纤长度， m ； Δn 为光纤纤芯的折射率变化。

为了描述干涉仪的传感原理及信号解调过程，将传感光与参考光的光场表示为：

$$E_1 = A_1 e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi + \varphi_{n1})} \quad (2)$$

$$E_2 = A_2 e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_{n2})} \quad (3)$$

式(2)、(3)中， A_1 和 A_2 分别为传感光和参考光的振幅， W ； φ_0 为入射光初始相位，rad； φ_{n1} 、 φ_{n2} 分别为由外界干扰引起的传感光和参考光的相位变化，rad； f_0 为激光器中心频率，Hz。

传感光与参考光的干涉光强度 I 为

$$\begin{aligned} I &\propto (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \\ &\propto A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_n + \Delta\varphi) \\ &= I_{DC} + I_{AC} \cos(\varphi_n + \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中， I_{DC} 为干涉光直流分量， W ； I_{AC} 为干涉光交流分量幅值， W ； $\varphi_n = \varphi_{n1} - \varphi_{n2}$ ，rad。

由式(4)可知，传感光相位变化量 $\Delta\varphi$ 可表征为干涉光强 I 的变化。使用光电探测器对干涉光进行检测，测量时使用 AC 耦合滤除直流分量，探测器输出的电压为

$$u_{PD} \propto I_{AC} \cos(\Delta\varphi + \varphi_n) \quad (5)$$

然而，外界低频大幅干扰引发的相位漂移 φ_n 通常大于 π ，对微小超声信号解调产生影响。尤其当 $\varphi_n = m\pi$ (m 为整数) 时，超声传感系统的灵敏度急剧下降，称“相位衰落”^[20]。

为了消除外界低频大幅度噪声引起的相位衰落现象，保证灵敏度和可靠性，文中在参考光纤中引入声光调制器使参考光的频率移动 40 MHz。此时干涉仪拓扑见图 2。式(5)变为

$$u_{PD}' \propto I_{AC} \cos(2\pi f_1 t + \Delta\varphi + \varphi_n) \quad (6)$$

式(6)中， f_1 为声光调制器引入的频移量，文中使用的声光调制器频移为 $f_1 = 40$ MHz。

从式(6)可以看出，高频载波后的光电探测器输出电压 u_{PD}' 的载波频率为 f_1 ，通过解调 $\Delta\varphi$ 可以还原超声信号。

声光调制器的频移范围一般在几十到几百 MHz，因此高频载波后的 u_{PD}' 频带较高，对电信号

采集设备频带要求大大提高，增加了系统成本；高频采集带来的大数据量也时超声检测实时性大大降低，可能错过偶发局放信号。

为了降低检测系统频带、加快解调速度，文中提出了一种基于下变频的相位解调方案，使用电子混频器对探测器输出的电压信号进行混频，降低所需采集与解调的信号频率，见图 2。

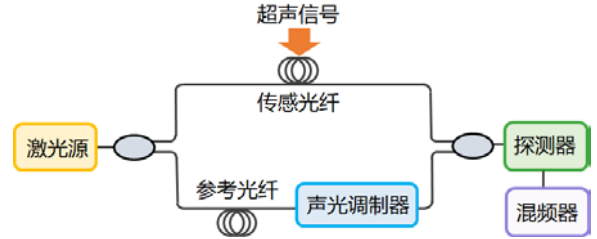


图 2 基于高频载波调制及下变频解调的干涉系统

Fig. 2 Interferometric ultrasonic sensing system based on high frequency carrier modulation and down conversion demodulation

使用混频器将光电探测器输出电压 u_{PD}' 下变频。用信号发生器给混频器输入频率为 f_2 的正弦参考信号 $u_{ref} = U_{ref} \cos(2\pi f_2 t)$ ，设光电探测器输出电压 $u_{PD}' = U_{PD} \cos(2\pi f_1 t + \Delta\varphi + \varphi_n)$ ，拍频电压信号 u_{beat} 可表示为

$$\begin{aligned} u_{beat} &= \overline{[u_{PD}'(t) + u_{ref}(t)]^2} \\ &= U_{PD}^2 \overline{\cos^2(2\pi f_1 t + \Delta\varphi + \varphi_n)} + U_{ref}^2 \overline{\cos^2(2\pi f_2 t)} \\ &\quad + U_{PD} U_{ref} \overline{\cos[(2\pi f_1 + 2\pi f_2)t + (\Delta\varphi + \varphi_n)]} \\ &\quad + U_{PD} U_{ref} \overline{\cos[(2\pi f_1 - 2\pi f_2)t + (\Delta\varphi + \varphi_n)]} \end{aligned} \quad (7)$$

u_{beat} 中的和频项与差频项中均包含相位信息，为了实现降低检测频率的目标，将差频项 $U_{PD} U_{ref} \cos[(2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t) + \Delta\varphi + \varphi_n]$ 作为待测量，以之为基础解调超声信号引起的相位变化 $\Delta\varphi$ 。

由于气体绝缘设备的超声信号频带范围集中在 20~80 kHz^[24]，混频器的参考信号频率 f_2 选择为 40.8 MHz，此时差频项的频率 $f_2 - f_1 = 800$ kHz。可以看出，混频器的引入使待测信号的频率由 40 MHz 降低至 800 kHz，将采样率要求降低了 500 倍。光电探测器输出为含有超声信息的高频信号，频带为 40 MHz ± 80 kHz。采用混频器降频后，获得的含有超声信息的信号频带为 800 kHz ± 80 kHz，为消除直流项以及更高频率噪声的干扰，同时考虑滤波器性

能, 使用 600~1 000 kHz 带通滤波器对混频器输出信号进行滤波。之后, 使用信号采集卡记录混频器输出信号。然后, 采用微分交叉相乘算法 (differential-cross multiply, DCM)^[25]对信号进行进一步解调, 获得 0~80 kHz 信号。最后, 使用 5 kHz 高通数字滤波滤除低频噪声信号, 获得 GIS 局放产生的超声信号。

相比使用 AD8302 的解调方法, 本方法解调信号幅值范围大, 在 GIS 存在 100 Hz 基频机械振动、以及敲击、分合闸操作等振动信号干扰的情况下仍然可以实现局放超声信号测量。

2 信号解调及系统响应标定实验

基于文中提出的高频载波超声传感拓扑及下变频解调方法, 在实验室中搭建了迈克尔逊结构的光纤干涉仪拓扑, 见图 3。迈克尔逊干涉仪可使用单模光纤作为传感光纤, 无需制备反射腔, 灵敏度和可靠性高^[26], 适合用于气体绝缘设备局放超声信号传感。

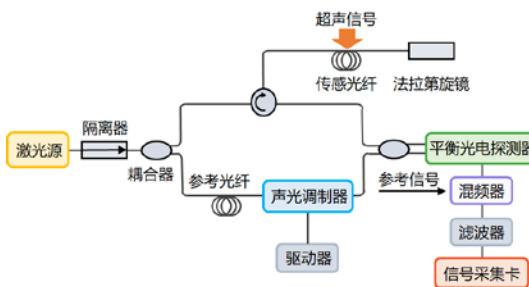


图 3 基于高频载波及下变频的超声传感拓扑

Fig. 3 Ultrasonic sensor topology based on high frequency carrier and down conversion demodulation

窄带激光器中心波长为 1 550 nm、带宽为 3 kHz, 经隔离器进入 1×2 耦合器被分为两路, 一路作为传感光经过环形器进入传感光纤, 并被法拉第旋镜反射; 另一路作为参考光进入参考光纤。参考光经过声光调制器产生后产生 40 MHz 频移, 然后进入 2×2 耦合器, 被法拉第旋镜反射。被反射回的传感光与参考光发生干涉, 由平衡光电探测器将干涉光交流分量转换为电信号, 并经混频器与出参考信号进行混频。混频后的电信号经滤波器滤除高频成分, 由采集卡采集, 然后进行 DCM 相位解调、高通滤波获得超声信号。

混频器引入可能会引入一些相位噪声, 降低检测精度。本研究通过 3 种方法降低了这一影响因素, 一是选择隔离度高、相位噪声低的混频器, 有效减少噪声的引入。二是优化混频信号源, 将声光调制器的驱动电信号引出一路作为混频器的参考信号, 三是设计屏蔽与滤波, 通过屏蔽降低外界干扰, 通过后续滤波措施抑制非信号频带噪声。

基于文中提出传感拓扑与解调方案, 在实验室中进行了超声信号解调实验。为增加超声检测灵敏度, 50 m 长的传感光纤紧密缠绕在聚四氟乙烯芯轴上。如如图 4 所示。使用标准 PZT 作为超声信号源, 信号发生器给 PZT 施加 20 kHz 的正弦驱动信号, 使用所提出的光纤超声传感系统进行超声检测实验。

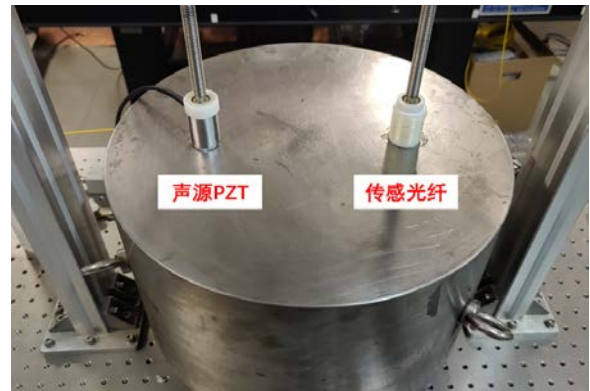


图 4 超声信号检测平台

Fig. 4 Ultrasonic signal measurement platform

DCM 解调结果见图 5, 能够实时准确复原所施加的 20 kHz 正弦波形。实验结果可知, 文中提出的下变频解调方法能够实现高频载波信号的实时相位解调, 准确还原超声信号。

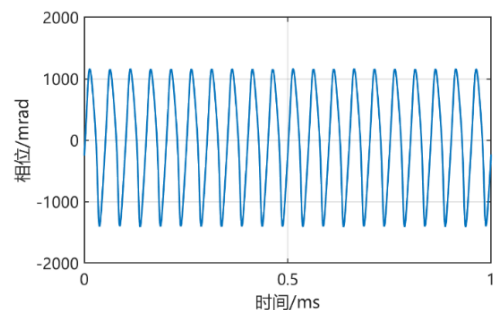
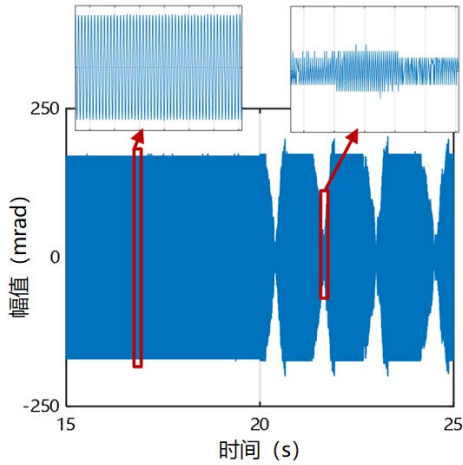


图 5 正弦超声信号测量结果

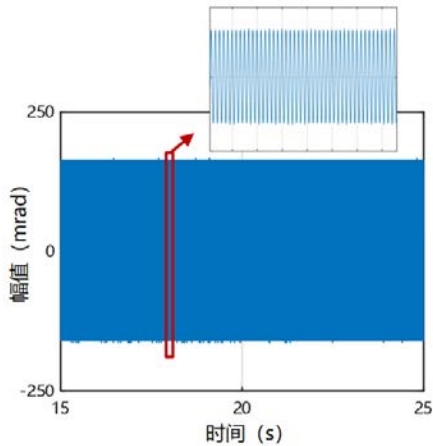
Fig. 5 Measurement results of sinusoidal ultrasonic signal

为了验证基于高频载波的超声传感系统的抗干扰性能, 用 PZT 施加正弦激励, 对比了采用本文

所提出拓扑和算法前后长时间对正弦信号的测量结果，见图 6。由图 6(a)可以看出，传统干涉仪拓扑在测量过程中存在相位衰落现象，导致信号解调失败，出现幅值接近 0 的波形。图 6(b)显示了采用文中方法后的测量结果，可以看出本文方法消除了外界噪声干扰对测量结果的影响，测量结果保持稳定。



(a) 传统干涉仪拓扑测量结果



(b) 文中拓扑及算法处理后的测量结果

图 6 超声传感系统正弦超声信号测量结果对比

Fig. 6 Comparison of measurement results of sinusoidal ultrasonic signals in ultrasonic sensing systems

为了验证所设计的超声传感系统在 GIS 局放超声频率范围内的响应特性，基于图 4 所示平台，利用比较法进行了系统的响应校准实验。将宽频 PZT 放置在图 4 所示超声检测平台的中心位置作为声源，将光纤超声传感器与参考传感器分置超声传递平台两侧，平台中心声源与二者之间的距离为 10 cm。标定时，声发射换能器、参考传感器和光纤超声传感器均通过超声耦合剂与平台进行耦合，声

发射传感器在重复频率 1 Hz、脉冲宽度为 1 μ s 的方波脉冲激励下发射宽频超声波，通过与参考传感器出厂时标定的响应曲线进行比对校准，得到光纤超声传感器的响应曲线。所提出超声传感系统在 20 kHz 到 80 kHz 频率范围内的相位响应结果见图 7。实验数据表明，系统在所测试的频率范围内具有良好的灵敏度。

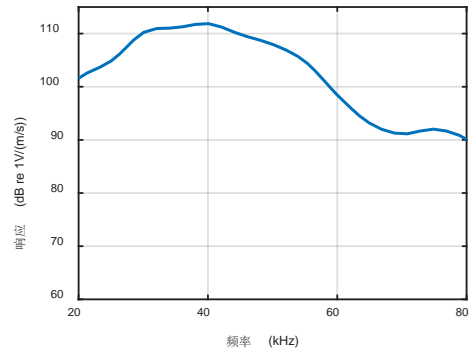


图 7 超声传感系统响应标定结果

Fig. 7 Calibration of ultrasonic sensing system response

3 现场试验

基于文中所述方法，在某 1 000 kV 变电站的在运 GIS 上开展了带电局放检测工作，排查异常超声波放电。现场布置见图 8。为增加超声传感的灵敏度，将传感光纤缠绕在圆柱形芯轴上，并进行封装以提高可靠性，并利用 20 m 传输光纤将传感器与解调系统相连。



图 8 光纤超声传感器布置

Fig. 8 Arrangement of optical fiber ultrasonic sensor

A 相 GIS 外壳的测量结果见图 9。在 GIS 盆子下方监测到了偶发局放信号，验证了文中提出方法

的超声检测灵敏度。

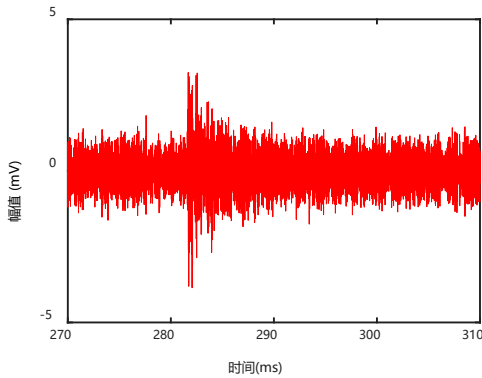


图 9 偶发局放超声信号

Fig. 9 Occasional partial discharge ultrasonic signal

除偶发性局放超声信号外，超声传感器捕捉到了雨点滴落在 GIS 上的超声信号，见图 10。

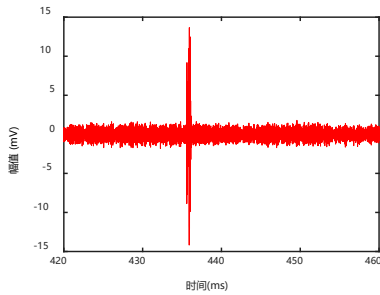
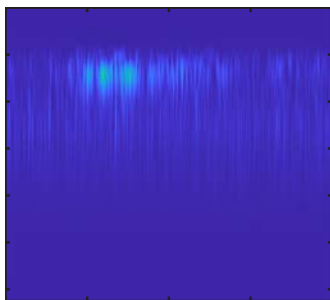


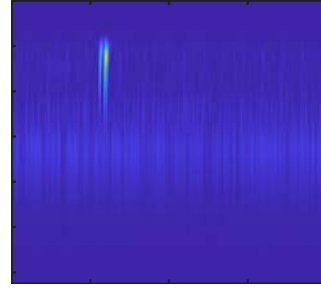
图 10 雨滴产生的超声信号

Fig. 10 Ultrasonic signal produced by raindrop

区分内部绝缘缺陷产生的局放超声信号与外部雨滴敲击设备外壳产生的超声信号，需要对信号时频特征进行综合分析。S 变换具有良好的时频局部化能力，能够同时提供时间和频率信息。对现场测量波形进行 S 变换，其结果见图 11。



(a)偶发局放超声信号 S 变换结果



(b)雨滴超声信号 S 变换结果

图 11 局放超声信号与雨滴超声信号 S 变换结果对比

Fig. 11 Comparison of S-transform results between partial discharge ultrasonic signal and raindrop ultrasonic signal

由图 11 可以看出，GIS 内部绝缘缺陷产生的局放超声信号与雨滴敲击设备外壳产生的超声信号在时频特征上存在明显区别。

在时域特征上，局放超声信号比雨滴超声信号持续时间更长，这是因为在局放超声信号在 GIS 内部发生折反射，折反射的超声叠加形成整体的衰减振荡形式；而雨滴直接落在 GIS 上，超声信号沿壳体传播至超声传感器，信号呈现脉冲形式，并不呈现衰减趋势。在频域特征上，局放超声信号比雨滴超声信号的频率分布更集中，这是因为局放超声信号在 GIS 内部产生，信号的高频分量衰减系数更大，因此被传感器感知到的频率范围更集中；雨滴超声信号沿设备外壳直接传播至传感器，高频成分衰减更少，因此频率范围更宽。对局放超声与雨滴超声信号的测量与分析结果可为现场超声传感器的降噪工作提供新的参考。

4 结论

文中提出了一种基于高频载波与下变频的光纤干涉式超声信号测量系统，为气体绝缘设备局放声发射信号检测提供了一种灵敏可靠的手段。具体结论如下：

1)明确了光纤干涉仪超声信号传感原理，量化了超声信号作用下的传感光相位变化，分析了相位衰落产生的原因；

2)引入高频载波调制和下变频解调方法，一方面消除了相位衰落，抑制了现场噪声导致的超声信号检测盲区；另一方面降低了对信号采集设备的要求，实现了超声信号的快速采集和准确解调，基于

实验室中搭建的超声测量平台,验证了变频解调方法的准确性;

3)在某 1 000 kV 变电站 GIS 设备上进行现场检测实验,捕捉到局放超声波形,并基于时频特征分析了局放超声与雨滴产生超声的区别,可为现场超声传感器的降噪工作提供参考。

参考文献:

- [1] 黎大健, 梁基重, 步科伟, 等. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 72-75.
LI Dajian, LIANG Jichong, BU Kewei, et al. Ultrasonic detection of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 72-75.
- [2] 罗颖婷, 王磊, 许海林, 等. 基于多传感器联合诊断的 GIS 外部局部放电识别算法[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 107-115.
LUO Yingting, WANG Lei, XU Hailin, et al. Research on algorithm of GIS external partial discharge identification based on multi-sensor joint diagnostics[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 107-115.
- [3] 何伟明, 郝艳捧, 邹舟诣奥, 等. GIS 盆式绝缘子应力超声检测技术应用与展望[J]. 广东电力, 2021, 34(1): 13-20.
HE Weiming, HAO Yanpeng, ZOU Zhou yiao, et al. Application and prospect of ultrasonic testing technology for stress in GIS basin insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1): 13-20.
- [4] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and diagnosis for power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [5] 常文治, 毕建刚, 刘姝嫫, 等. GIS 盆式绝缘子典型缺陷的电场仿真[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 138-143.
CHANG Wenzhi, BI Jiangang, LIU Shupin, et al. Electric field simulation of GIS insulators typical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 138-143.
- [6] 段韶峰, 李志兵, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 特快速瞬态试验回路研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 28-34.
DUAN Shaofeng, LI Zhibing, ZHAN Huamao, et al. Research on very fast transient test circuit for 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 28-34.
- [7] 王录亮, 李炳康, 李岩, 等. 敞开式真空断路器局部放电的声电联合检测[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 117-124.
WANG Luliang, LI Bingkang, LI Yan, et al. Acoustic and electric combined detection of partial discharge in open vacuum circuit breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 117-124.
- [8] 程立丰, 张伟超, 赵洪, 等. 固体介质声耦合光纤法珀传感器局部放电检测方法[J]. 广东电力, 2020, 33(9): 11-17.
CHENG Lifeng, ZHANG Weichao, ZHAO Hong, et al. Fabry-Perot sensor with solid dielectric acoustic coupling for partial discharge detection[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(9): 11-17.
- [9] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [10] 陈隽, 刘文浩, 卢军, 等. GIS 中不同位置电晕放电的超声波信号特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3006-3011.
CHEN Jun, LIU Wenhao, LU Jun, et al. Ultrasonic signal characteristics of corona discharge at different positions in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3006-3011.
- [11] 王淑娟, 康磊, 李智超, 等. 电磁超声换能器三维有限元分析及优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 123-128.
WANG Shujuan, KANG Lei, LI Zhichao, et al. 3-D finite element analysis and optimum design of electromagnetic acoustic transducers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 123-128.
- [12] ZHOU Hongyang, MA Guoming, WANG Yuan, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: A review[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 259-270.
- [13] JIANG Jun, SONG Yu, WANG Kai, et al. Partial discharge detection and sensitivity improvement for bushing based on optical interference technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2797-2804.
- [14] MA Guoming, WANG Yuan, QIN Weiqi, et al. Optical sensors for power transformer monitoring: A review[J].

-
- High Voltage, 2021, 6(3): 367-386.
- [15] RODRIGUES A V, MONTEIRO C, SILVA S O, et al. A brief review on optical fiber sensing for the power grid[J]. U Porto Journal of Engineering, 2022, 8(3): 18-23.
- [16] MA Guoming, ZHOU Hongyang, ZHANG Meng, et al. A high sensitivity optical fiber sensor for GIS partial discharge detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20): 9235-9243.
- [17] ROHWETTER P, HABEL W, HEIDMANN G, et al. Acoustic emission from DC pre-treeing discharge processes in silicone elastomer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 52-64.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] SHEEM S K, GIALLORENZI T G, KOO K. Optical techniques to solve the signal fading problem in fiber interferometers[J]. Applied Optics, 1982, 21(4): 689-693.
- [21] 谢 芳, 陈志敏, 任均宇. 1 阶反馈稳定光纤 3×3 耦合器干涉测量系统[J]. 激光技术, 2010, 34(3): 297-299.
- XIE Fang, CHEN Zhimin, REN Junyu. A stabilized fiber 3×3 coupler interferometric measurement system based on a first order feedback loop[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 297-299.
- [22] 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.
- [23] XING Chao, ZANG Qian, HE Ruidong, et al. Phase stability control of optical fiber partial discharge ultrasonic sensing system[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8495.
- [24] BARTNIKAS R, MCMAHON E J. Engineering dielectrics: Volume 1: Corona measurement and interpretation-STP 669. ASTM international[M]. United States: ASTM International, 1979: 33-85.
- [25] ZHANG Shuai, ZHANG Ailing, PAN Honggang. Eliminating light intensity disturbance with reference compensation in interferometers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1888-1891.
- [26] 周宏扬, 马国明, 张 猛, 等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 8016-8024.
- ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the michelson optical fiber interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8016-8024.
- 宋 伟(1970—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事特高压设备高灵敏放电检测、光学传感等方面研究(E-mail: songwei@ha.sgcc.com.cn)。
- 董曼玲(1983—), 女, 教授级高级工程师, 长期从事特高压输、变电设备在线监测、故障诊断, 电工材料放电机理及材料改性等方面研究(通信作者)(E-mail: dongmanling@ha.sgcc.com.cn)。