

# 一种用于局部放电检测的超宽带环形-单极子天线

张殷<sup>1</sup>, 罗兵<sup>2</sup>, 李国伟<sup>1</sup>, 唐琪<sup>1</sup>, 张豪峰<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 为提高电气设备局部放电检测准确度和灵敏度, 提出一种超宽带环形-单极子天线。该天线主要由环形天线、类三角形单极子、金属枝节和金属地板构成。其中, 类三角形单极子嵌入在环形天线内部, 并通过金属枝节与环形天线连接, 从而引入电磁耦合和产生新的谐振模式, 改善天线阻抗匹配, 扩展天线工作带宽, 实现超宽带阻抗匹配和辐射特性。研究表明, 天线在 0.29~3.10 GHz 频段的仿真反射系数低于-10 dB, 最大仿真增益为 8.8 dBi, 在超宽频段内实现了良好的阻抗匹配和辐射特性。测试结果和仿真结果吻合良好, 天线在 0.29~3.16 GHz 频段的测试反射系数低于-10 dB, 最大测试增益达到 9.3 dBi, 适用于电气设备局部放电检测。

**关键词:** 环形天线; 单极子天线; 超宽带天线; 局部放电检测

中图分类号: TN82

文献标识码: A

DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2024.0275

**引用格式:** 张殷, 罗兵, 李国伟, 等. 一种用于局部放电检测的超宽带环形-单极子天线 [J]. 电子元件与材料, 2024, 43(8): 1017-1023.

**Reference format:** ZHANG Yin, LUO Bing, LI Guowei, et al. An ultra-wideband loop-monopole antenna for partial discharge detection [J]. Electronic Components and Materials, 2024, 43(8): 1017-1023.

## An ultra-wideband loop-monopole antenna for partial discharge detection

ZHANG Yin<sup>1</sup>, LUO Bing<sup>2</sup>, LI Guowei<sup>1</sup>, TANG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Haofeng<sup>2</sup>

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong Province, China;

2. Southern Power Grid Scientific Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** An ultra-wideband loop-monopole antenna was proposed to improve the accuracy and sensitivity of the partial discharge detection in the electrical equipment. The proposed antenna was mainly composed of loop antennas, quasi-triangular monopoles, metal branches and a metal ground plane. The monopoles were embedded in the loop antennas, and connected to the loop antennas by the metal branches, so as to introduce electromagnetic coupling and generate additional resonant modes to improve the impedance matching and bandwidth, thus achieving good impedance matching and radiation performance over an ultra-wide frequency band. The results show that the simulated reflection coefficient of the antenna is less than -10 dB at 0.29-3.10 GHz band and the simulated maximum gain is 8.8 dBi. This result indicates that the good impedance matching and radiation performance over an ultra-wide frequency band is achieved. The measured results are in good agreement with the simulation. The measured reflection coefficient of the antenna is less than -10 dB at 0.29-3.16 GHz band and the measured maximum gain is 9.3 dBi, which makes it suitable for the partial discharge detection in the electrical equipment.

**Keywords:** loop antenna; monopole antenna; ultra-wideband antenna; partial discharge detection

收稿日期: 2024-06-09

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20222587); 国家自然科学基金联合基金项目 (U23B20132)

通信作者: 张豪峰, 工程师, 硕士, 研究方向为电气工程和高电压技术。E-mail: 1264352730@qq.com

随着电力系统发展, 变压器、高压开关柜等电气设备在电力系统中的应用越来越广泛。这些设备内部的绝缘缺陷可能导致局部放电, 而局部放电的早期识别对于预防设备故障和保障电力系统稳定运行至关重要<sup>[1-2]</sup>。国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)发布的 IEC 60270 和 IEC 62478 标准<sup>[3-4]</sup>, 为检测电气设备中的局部放电提供了指导框架。其中, IEC 60270 主要描述利用电流和电压传感进行的传统监测技术, 而 IEC 62478 则扩展到了更广泛的非传统监测手段, 包括光学、化学、声学及电磁传感技术。依据这两个标准, 业界普遍采用声学 and 电磁波测量技术实现电气设备局部放电检测。

局部放电产生的音频信号通常介于 100 Hz 至 250 kHz 之间, 而电磁波信号则出现在 0.3 ~ 3 GHz 频

段<sup>[5]</sup>。声学定位技术因其出色的灵敏性和精确性而被广泛应用, 但该技术存在定位范围较窄和信号衰减较快等局限。声波衰减的程度主要受传感器与放电源之间的相对位置和环境温度的影响。相较之下, 电磁波的衰减主要受传感器相对于放电源的位置和信号传播路径的影响, 不会受到压力和温度变化的影响, 能在各种介质中自由传播, 非常适合进行实时监测。因此电磁传感技术被广泛应用于捕捉局部放电的电磁辐射<sup>[6]</sup>。电磁传感技术用于电气设备局放检测的示意图如图 1 所示。变压器局放信号由天线接收后经过放大器传输到示波器进行检测。其中, 天线作为接收局放电磁信号的传感器件, 其性能的优劣直接影响到检测系统的准确度和灵敏度。

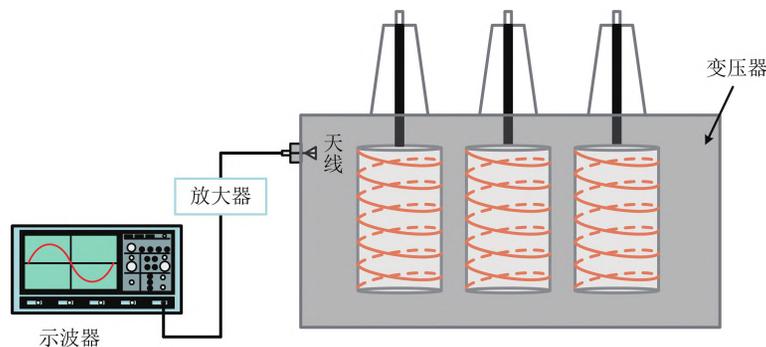


图 1 电磁传感技术用于局部放电检测示意图

Fig. 1 Diagram of electromagnetic sensing technology for partial discharge detection

国内外研究人员对局部放电检测天线进行了大量的研究与设计。例如, 喇叭天线<sup>[7]</sup>、双线阿基米德螺旋天线<sup>[8]</sup>、双锥天线<sup>[9]</sup>、希尔伯特天线<sup>[10]</sup>和环形天线<sup>[11]</sup>被广泛应用于局放检测。然而, 这些天线的窄带和低增益特性会降低局放检测的准确度和灵敏度。在局部放电检测领域, 电磁检测天线的带宽和增益一直是备受关注的研究对象。例如, 贺俊铤等<sup>[12]</sup>提出了一种宽带蝶形天线, 采用渐变式宽带巴伦馈电, 并通过弯曲蝶形天线臂和开缝加载电阻等技术有效地拓宽了工作频带; Yang 等<sup>[13]</sup>提出了一种由共面波导馈电椭圆形单极子天线, 通过在介质衬底中加入吸波材料将工作频段范围扩展到 0.4~3 GHz 频段, 但该天线的增益较低, 增益在工作频段内小于 -6 dB。Xavier 等<sup>[14]</sup>提出了一种用于局部放电检测的圆形微带天线, 采用缺陷地技术提高工作带宽, 但天线的工作带宽只能覆盖 0.3~1.5 GHz 频段。Uwiringiyimana 等<sup>[15]</sup>提出一种应用于局部放电检测的类圆形单极子天线, 该天线具

有 3.3 GHz 的绝对带宽, 但不能用于检测 0.3~1.19 GHz 频段的局部放电信号。

由于环形天线具有低成本、易于实现阻抗匹配等特性, 也被广泛用来设计宽带天线。例如, Rezaeieh 等<sup>[16]</sup>提出了一种印刷环形天线, 采用缝隙加载技术将天线带宽扩展到 50%; Rezaeieh 等<sup>[17]</sup>继续提出了一种环形-偶极子天线, 通过将环形天线和电偶极子天线协同融合, 实现了 55% 的相对带宽。为了进一步扩展工作带宽, Elsherbini 等<sup>[18]</sup>提出一种超宽带环形天线, 通过在环形天线上加载顶部电容板和环形槽, 大幅度改善阻抗匹配, 将天线带宽扩展到 147.8%, 但天线的结构较复杂, 且不适合用于检测较低频段的局部放电信号。

为解决上述问题, 本文提出了一种超宽带环形-单极子天线, 适用于检测高压电气设备内部局部放电的电磁波信号。通过在环形天线内加载类三角形单极子结构, 引入电磁耦合并产生了新的谐振模式, 改善

阻抗匹配, 扩展天线工作带宽; 利用矢量网络分析仪和微波暗室分别测试了天线的反射系数和增益等参数。提出的局部放电检测天线在 0.29~3.16 GHz 频段的反射系数低于 -10 dB, 在工作频段内天线最大增益达到了 9.3 dBi, 具有良好的超宽带、高增益辐射特性, 适用于高压电气设备局部放电检测。

## 1 超宽带环形-单极子天线设计

### 1.1 天线结构

图 2 为环形-单极子天线的结构示意图。该天线包括两个正交的环形天线、两个类三角形单极子、四个金属枝节和一块金属地板。其中, 环形天线印刷在一块厚度为 1 mm、相对介电常数为 4.4、损耗角正切为 0.02 的 FR4 介质板上; 类三角形单极子加载在环形天线的内部, 通过金属枝节与环形天线连接, 构成环形-单极子辐射结构。通过改进天线的辐射结构, 引入了电磁耦合效应并且产生了新的谐振模式, 从而扩展了天线的带宽。然后, 通过将两个环形-单极子天线相互正交连接, 进一步改善了天线的阻抗匹配。为了增强结构的稳定性, 在环形天线底部印刷了四块金属片, 如图 2(b) 所示。这些金属片能够穿过金属地板上的缝隙(如图 2(d) 所示), 并且与金属地板通过焊锡焊接固定。其中, 金属地板印刷在另一块 FR4 介质板的底部, 该介质板的厚度为 1.6 mm、相对介电常数为 4.4、损耗角正切为 0.02。此外, 采用一根特征阻抗为 50  $\Omega$  的同轴电缆对天线进行馈电。其中, 同轴电缆的外导体与金属地板焊接相连, 同轴电缆的内导体与环形-单极子底部中间区域焊接相连。

基于上述天线结构, 成功地设计了一种工作在 0.29~3.16 GHz 频段的环形-单极子天线。天线具体结构参数如表 1 所示。

### 1.2 天线结构演进

图 3 为环形-单极子天线结构演进图, 图 4 和图 5 分别为各天线结构的端口阻抗和反射系数曲线图。各天线结构的对应参数都相同。

如图 3(a) 所示, 天线 1 为初始的环形天线, 该天线采用一根特征阻抗为 50  $\Omega$  的同轴电缆进行激励。在 1.4~3.2 GHz 频段内, 天线 1 的端口电阻和电抗分别接近 50  $\Omega$  和 0  $\Omega$ , 如图 4 所示。因此在该频段内, 天线 1 具有较好的阻抗匹配特性, 如图 5 所示。此外, 由于天线 1 在频率为 0.3 GHz 附近的电抗接近 0  $\Omega$ , 使得天线 1 在 0.3 GHz 附近产生了一个谐振模式。然而, 由于天线 1 在 0.2~1.4 GHz 频段内的电阻和电抗

波动范围较大, 导致天线 1 在 0.2~1.4 GHz 频段内的阻抗匹配特性较差, 具体表现为反射系数高于 -5 dB。由此可见, 天线 1 的工作频段为 1.4~3.2 GHz, 带宽相对较窄。

为了改善低频段的阻抗匹配特性, 在天线 1 的环形天线结构内加载了一个类三角形单极子, 从而获得了天线 2, 如图 3(b) 所示。类三角形单极子结构的加入产生了较强的电磁耦合效应, 使得天线 2 在 0.66 GHz 附近产生一个新的谐振模式, 并且端口电阻和电抗在 0.2~2 GHz 频段内波动范围大幅度减小, 如图 4 所示。在此情况下, 天线 2 获得了良好的阻抗匹配, 从而在 0.2~2 GHz 频段内的反射系数大幅度减小, 如图 5 所示。同时, 天线 2 在 2~3.2 GHz 频段内的反射

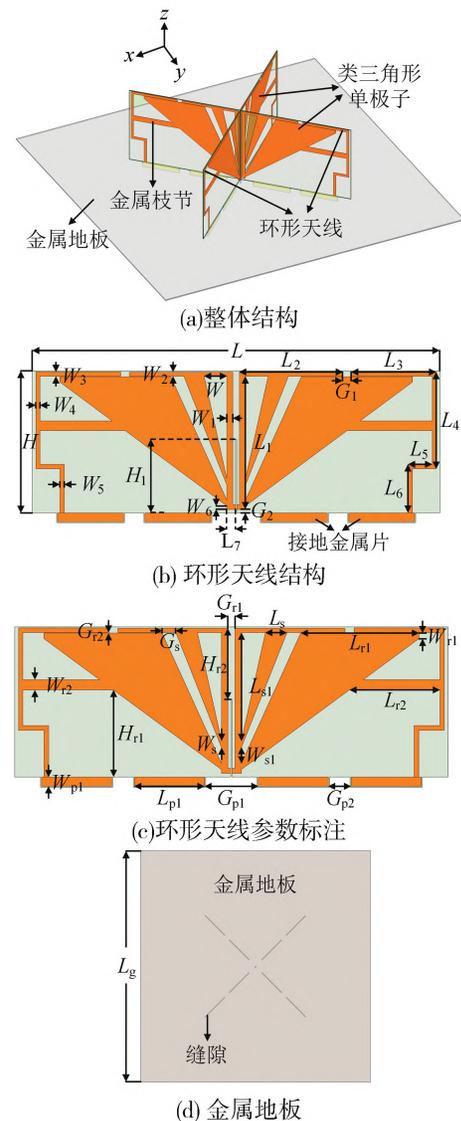


图 2 天线结构

Fig. 2 Structure of the antenna

表 1 天线参数

Tab. 1 Parameters of the proposed antenna

参数	数值 (mm)	参数	数值 (mm)	参数	数值 (mm)
$G_1$	8.8	$L_2$	106.7	$W_1$	6.2
$G_2$	3.3	$L_3$	87.3	$W_2$	4.1
$G_{P1}$	50	$L_4$	90	$W_3$	4.5
$G_{P2}$	20	$L_5$	29.2	$W_4$	4.1
$G_{r1}$	5	$L_6$	49.6	$W_5$	4.5
$G_{r2}$	0.5	$L_7$	9	$W_6$	4.8
$G_s$	13.3	$L_g$	600	$W_{p1}$	10
$H$	145	$L_{p1}$	70	$W_{r1}$	5.5
$H_1$	75	$L_{r1}$	114.5	$W_{r2}$	9.8
$H_{r1}$	84.1	$L_{r2}$	87.7	$W_s$	6.4
$H_{r2}$	75	$L_s$	20.9	$W_{s1}$	15.4
$L$	420	$L_{s1}$	104.7		
$L_1$	133	$W$	23.4		

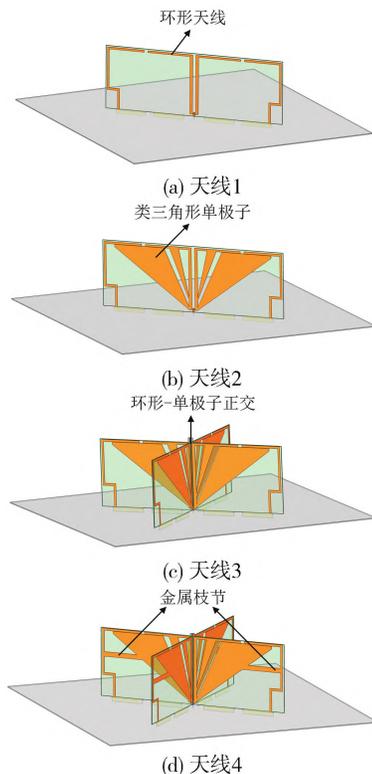


图 3 天线结构演进图

Fig. 3 Evolution diagram of the antenna structure

系数保持在 $-10$  dB 附近。因此，通过加载类三角形单极子可以大幅度地改善低频段处的阻抗特性，并且对于高频的阻抗特性影响较小。然而，由于天线 2 的电

抗在  $0.72 \sim 0.9$  GHz 的波动变化范围仍旧较大，导致  $0.86$  GHz 频点的反射系数接近 $-3.5$  dB。因此，天线 2 在  $0.86$  GHz 频点附近的阻抗匹配较差，有待进一步优化。

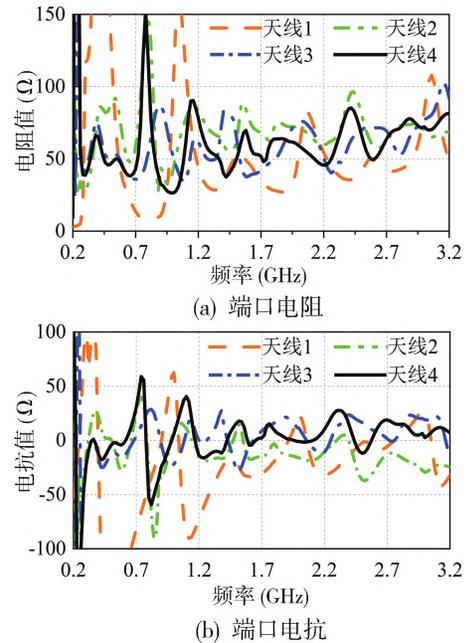


图 4 天线端口阻抗

Fig. 4 Port impedances of antennas

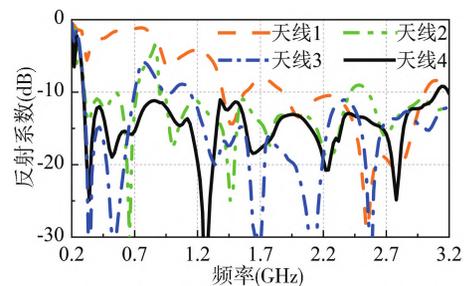


图 5 天线反射系数

Fig. 5 Reflection coefficients of antennas

为了进一步改善阻抗匹配，将两个环形-单极子相互正交，形成天线 3，如图 3(c) 所示。天线 3 的端口电阻和电抗在  $0.2 \sim 3.2$  GHz 整个频段分别更接近于  $50 \Omega$  和  $0 \Omega$ ，大幅度改善天线的阻抗匹配特性。然而，天线 3 在  $0.8$  GHz 频点附近的反射系数在 $-7$  dB 左右，阻抗匹配较差，有待进一步改善。

为了进一步改善  $0.8$  GHz 附近的阻抗匹配，将天线 3 中的类三角形单极子通过金属枝节与环形天线相连，实现了最终的天线设计，该天线被命名为天线 4，如图 3(d) 所示。在天线 4 中，通过调整金属枝节的宽

度  $W_{r2}$  和位置  $H_{r1}$ , 能够使 0.8 GHz 附近的端口电阻从 150  $\Omega$  附近降低到 70  $\Omega$  附近, 端口电抗从 55  $\Omega$  附近降低到 25  $\Omega$  附近, 如图 4 所示。通过优化, 天线 4 在 0.8 GHz 附近的反射系数从 -7 dB 降低到了 -11 dB 以下, 天线的阻抗匹配得到了大幅度的改善。最终, 天线 4 在 0.29~3.10 GHz 频段内的反射系数均达到了低于 -10 dB 的要求, 实现了良好的阻抗匹配。

### 1.3 天线工作原理

为了清晰地解释天线的工作原理, 研究了环形-单极子天线在 0.3, 1.2 和 2.2 GHz 频点时的电流分布, 如图 6 所示。如图 6(a), 在 0.3 GHz 频率时, 电流主要集中在类三角形单极子的斜边、金属枝节和接地引脚处, 并且电流沿着单极子的斜边通过金属枝节流到接地引脚。根据镜像原理, 该电流路径等效成一个大电流环路, 该电流环路的总长度为  $L_a$  ( $L_a = 2 \times (L_{r2} + H_{r1} + L_5 + L_6)$ ), 对应于 0.3 GHz 频点的半波长。因此, 在 0.3 GHz 频点时, 类三角形单极子的斜边、金属枝节和接地引脚构成的环路工作在半波长谐振模式。

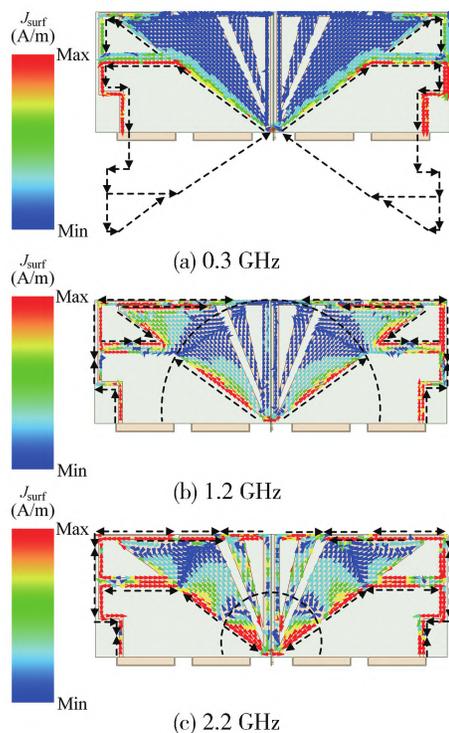


图 6 仿真电流分布

Fig. 6 Simulated current distribution

当工作频率为 1.2 GHz 时, 环形天线与单极子天线之间出现较强的耦合电流, 环形天线左边的电流与

右边的电流强度相同但方向相反, 它们相互抵消。同时, 单极子上左边沿的电流与上右边沿的电流强度相同但方向相反, 它们也相互抵消。此外, 类三角形单极子的中下部集中较强的电流, 该电流的路径长度约为 1.2 GHz 频点对应的 1/4 波长, 如图 6(b) 所示。因此, 类三角形单极子在 1.2 GHz 频点产生 1/4 波长谐振模式。

在 2.2 GHz 频点, 环形天线与单极子天线间仍有强烈的耦合电流, 这些耦合电流相互抵消, 不产生辐射。金属枝节上分布反相电流, 这些电流相互抵消。此外, 类三角形单极子底部且靠近馈电点处集中较强的电流, 如图 6(c) 所示。该电流路径长度约为 2.2 GHz 频点对应的 1/4 波长。因此, 类三角形单极子在 2.2 GHz 频点产生 1/4 波长谐振模式。

## 2 天线加工与测试

基于上述天线结构和尺寸加工制作了天线样品, 天线样品的照片如图 7(a) 所示。天线样品的反射系数采用矢量网络分析仪进行测试, 辐射性能则通过微波暗室测试系统进行测试, 微波暗室测试环境如图 7(b) 所示。天线仿真和测试的反射系数如图 8 所示, 天线在 0.29~3.16 GHz 频段内的反射系数低于 -10 dB。因此, 天线的工作频段为 0.29~3.16 GHz, 天线的相对带宽为 166.4%。测试和仿真结果较吻合, 它们之间的差异主要来源于加工误差、制作误差和测试误差。

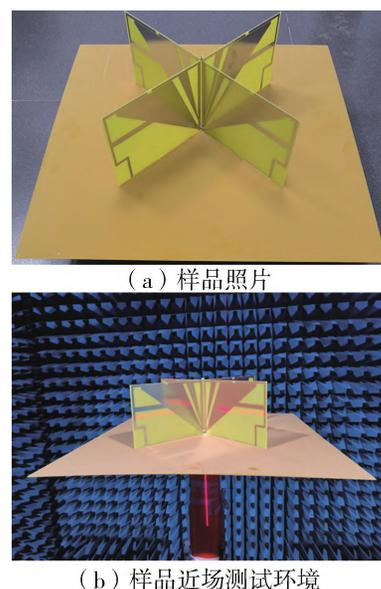


图 7 天线样品

Fig. 7 Antenna sample

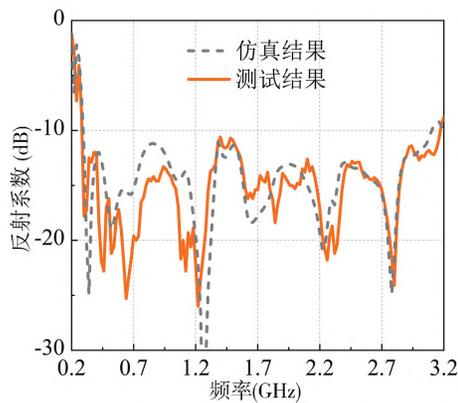


图 8 仿真和测试反射系数

Fig. 8 Simulated and measured reflection coefficients

天线在 0.5, 1.8 和 3.0 GHz 的仿真和测试辐射方向图分别如图 9(a)、图 9(b) 和图 9(c) 所示。从图中可见, 在垂直面(xz 平面)具有双向对称辐射性能。天线仿真和测试辐射方向图曲线基本吻合。图 10 给出了

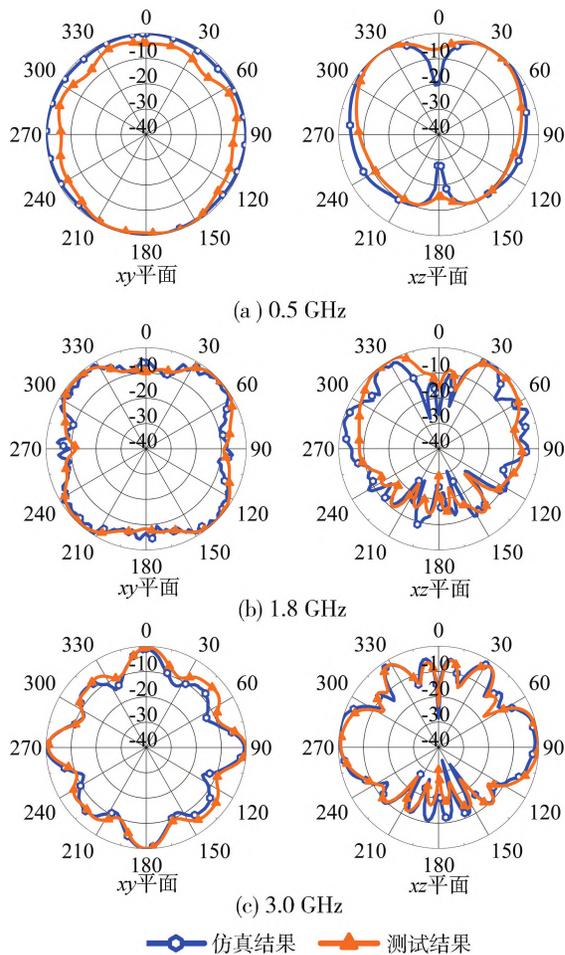


图 9 仿真和测试辐射方向图

Fig. 9 Simulated and measured radiation patterns

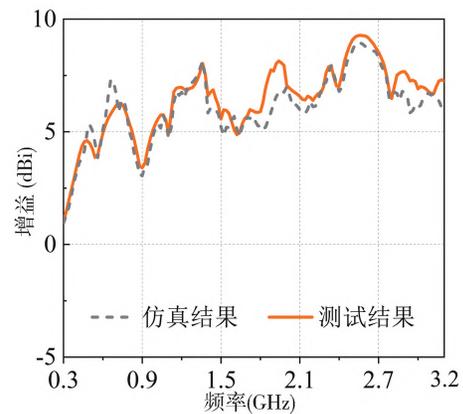


图 10 仿真和测试增益

Fig. 10 Simulated and measured gains

天线仿真和测试的增益对比, 天线的测试增益数值在 1.1~9.3 dBi 之间。

表 2 给出了本文提出的环形-单极子天线与相关天线的性能对比。可以看出, 本文采用了与其他文献不同的天线类型, 即采用了环形和单极子协同融合结构, 实现超宽带设计。此外, 与其他文献的天线相比, 本文设计的天线具有更宽的带宽, 达到 166.4%。该天线的工作频段为 0.29~3.16 GHz, 适合应用于高压电气设备局部放电检测。

表 2 天线对比

Tab. 2 Antenna comparison

文献	天线类型	工作频段 (GHz)	带宽 (%)
[13]	椭圆形单极子天线	0.4~3	152
[15]	类圆形单极子天线	1.2~4.2	111
[17]	环形-电偶极子天线	0.65~1.15	55
[18]	贴片加载的环形天线	0.9~6	147.8
本文	环形-单极子天线	0.29~3.16	166.4

### 3 结论

利用单极子和环形天线的协同融合, 设计了一种用于检测 0.3~3 GHz 频段局部放电电磁信号的超宽带环形-单极子天线, 相对于其他局部放电检测天线具有更宽的连续工作带宽。通过在环形天线上加载类三角形单极子, 引入电磁耦合并产生了新的谐振模式, 改善了阻抗匹配, 最终实现了一种具有良好阻抗匹配和辐射性能的超宽带环形-单极子天线。测试结果表明, 该天线在 0.29~3.16 GHz 频带内的反射系数低于 -10 dB, 相对带宽达到 166.4%; 频带内最大增益高达 9.3 dBi, 适用于电气设备局部放电电磁信号检测。

## 参考文献:

- [1] Wang W, Wang Y, Shu Z, et al. Coil antenna sensor - based measurement method to online detect partial discharge in distributed power networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-8.
- [2] 贾卫军, 张涛, 李智. 基于改进 CNN 的 GIS 局部放电故障诊断 [J]. 信息技术, 2024(3): 90-97.
- [3] IEC 60270. High-voltage test techniques—Partial discharge measurements [S]. Geneva, Switzerland; International Electrotechnical Commission (IEC), 2015.
- [4] IEC TS 62478. High-voltage test techniques—Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods [S]. Geneva, Switzerland; International Electrotechnical Commission (IEC), 2016.
- [5] Zhang X, Shi M, Cai J, et al. A novel partial discharge detection method for power transformers on site adopting its component as ultra-high frequency sensor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2269-2271.
- [6] Cui Z, Park S, Choo H, et al. Wideband UHF antenna for partial discharge detection [J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1698.
- [7] 张晓星, 湛阳, 唐俊忠, 等. 检测 GIS 局部放电的小型准 TEM 喇叭天线 [J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1975-1981.
- [8] Wang P, Ma S J, Akram S, et al. Design of an effective antenna for partial discharge detection in insulation systems of inverter-fed motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13727-13735.
- [9] Zhang G Z, Tian J W, Zhang X X, et al. A flexible planarized biconical antenna for partial discharge detection in gas - insulated switchgear [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(12): 2432-2436.
- [10] Tian J W, Zhang G Z, Ming C, et al. Design of a flexible UHF Hilbert antenna for partial discharge detection in gas - insulated switchgear [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(4): 794-798.
- [11] Mier C, Mor A R, Vaessen P. Design and characterization of a magnetic loop antenna for partial discharge measurements in gas insulated substations [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18618-18625.
- [12] 贺俊桃, 李相强, 张健穹, 等. 应用于局放检测的宽带小型化蝶形天线设计 [J]. 电子元件与材料, 2022, 41(5): 520-525.
- [13] Yang Q, Yang F, Gao B, et al. Design of ultra-wide band metal-mountable antenna for UHF partial discharge detection [J]. IEEE Access, 2019, 7: 60163-60170.
- [14] Xavier G V R, Da Costa E G, Serres A G R, et al. Design and application of a circular printed monopole antenna in partial discharge detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(10): 3718-3725.
- [15] Uwiringiyimana J P, Khayam U, Suwarno, et al. Comparative analysis of partial discharge detection features using a UHF antenna and conventional HFCT sensor [J]. IEEE Access, 2022, 10: 107214-107226.
- [16] Rezaeieh S A, Zamani A, Bialkowski K S, et al. Unidirectional slot-loaded loop antenna with wideband performance and compact size for congestive heart failure detection [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(10): 4557-4562.
- [17] Rezaeieh S A, Bialkowski K S, Zamani A, et al. Loop - dipole composite antenna for wideband microwave-based medical diagnostic systems with verification on pulmonary edema detection [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 838-841.
- [18] Elsherbini A, Sarabandi K. Very low - profile top - loaded UWB coupled sectorial loops antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 800-803.