

# 宽动态范围的有源集成传感系统的 研究与设计

辛文成<sup>1</sup>, 姚森敬<sup>1</sup>, 陈浩敏<sup>1</sup>, 席禹<sup>1</sup>, 张凡<sup>1</sup>,  
敖榜<sup>1</sup>, 申晨<sup>2,3</sup>, 林晓青<sup>3</sup>, 汪汎<sup>3</sup>

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510000; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710199;  
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对窄带采集检测到的局部放电缺陷种类少的问题, 宽动态范围的有源集成传感系统的研究很有必要。首先, 在同轴波导模型下, 通过对 GIS 内局放电磁传播的衰减分析和 HFSS 仿真, 得到较长 GIS 中有效检测 PD 信号至少需要 40 dB 的动态范围; 其次, 通过对比分析, 确定通过对数域变换来增加系统的动态范围, 选择蝶形天线作为局部放电检测用天线并对尺寸进行优化, 其在 730 MHz~1.05 GHz 频率范围驻波比小于 2; 最后, 设计宽动态范围的降频模拟电路, 开发对数检波技术用于 GIS 局部放电检测。该文实现了天线、检波电路、信号调理以及发射高度集成的 UHF 局放检测传感系统, 其不仅具有优秀的信噪比并且极大地降低了整套采集系统的成本, 这对局部放电的检测和精准运维具有现实意义。

**关键词:**宽动态范围; 局部放电; 特高频; 传感系统; 检测

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.022 中图分类号: TM835.4 文章编号: 1673-9140(2022)04-0189-09

## Research and design of active integrated sensor system with wide dynamic range

XIN Wencheng<sup>1</sup>, YAO Senjing<sup>1</sup>, CHEN Haomin<sup>1</sup>, XI Yu<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, AO Bang<sup>1</sup>  
SHEN Chen<sup>2,3</sup>, LIN Xiaoqing<sup>3</sup>, WANG Feng<sup>3</sup>

(1. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710199, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** To solve the problem of few PD defects detected by narrowband acquisition, it is necessary to study the active integrated sensor system with wide dynamic range. In this paper, according to the attenuation analysis of local electromagnetic propagation in GIS under coaxial waveguide model and HFSS simulation, it is found that a dynamic range of at least 40 dB is required for the effective detection of PD signal in long GIS. Secondly, through comparative analysis, the dynamic range of the system can be increased by logarithmic domain transformation, and the butterfly antenna with the optimized size is selected as the antenna for partial discharge detection. The standing wave ratio of

收稿日期: 2021-04-16; 修回日期: 2021-12-25

基金项目: 南方电网公司重点科技项目 (GZHKJXM20200001)

通信作者: 辛文成 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力设备状态评价与检测方面的研究; E-mail: 1363376120@qq.com

the butterfly antenna is less than 2 in the frequency range of 730 MHz~1.05 GHz. Finally, a wide dynamic range of frequency-reduction analog circuit is designed, and logarithmic detection technology is developed for GIS partial discharge detection. This paper realized the antenna, detection circuit, signal conditioning and transmission highly integrated UHF local discharge detection sensor system. It not only has excellent signal-to-noise ratio but also greatly reduces the cost of the whole collection system, which has practical significance for PD detection and accurate operation and maintenance.

**Key words:** wide dynamic range; partial discharge; high frequency; sensing system; detection

局放发生时伴随出现电、磁效应的变化,这些特征能够用于表征气体绝缘组合电器(gisinsulated-substation, GIS)内部局放的发生<sup>[1]</sup>。其中,特高频法(ultra high frequency, UHF)就是通过监测 GIS 内部或者外部 300 MHz~3 GHz 频段范围的电磁波,实现局放检测<sup>[2]</sup>。局放现象是 GIS 内部出现绝缘劣化的早期外在表现,如果不能及时检测并进行有效控制和处理则会导致绝缘进一步劣化,从而引发严重的破坏性放电甚至重大事故。

UHF 天线的作用是接收 PD 激发的电磁波信号,其性能直接决定了 UHF PD 监测系统的优劣。螺旋天线包括等角和阿基米德螺旋天线 2 种。文献<sup>[3]</sup>研制了一种新的小尺寸水平型阻抗变换器,并与传统的垂直型阻抗变换器的匹配性能进行了对比研究。阿基米德螺旋天线由 2 条对称螺旋臂构成,文献<sup>[4]</sup>对该型天线进行了优化设计。此外 UHF 的分形天线具有自相似和空间填充属性,使天线实现小型化。文献<sup>[5]</sup>设计了用于变压器 PD 检测的三阶 Hilbert 分形内置式天线;在此基础上,文献<sup>[6]</sup>研制了四阶 Hilbert 分形天线,但其增益较小,通带内最低增益仅-28 dBi,需要使用增益放大器。

针对传感系统的设计,传统 UHF 传感系统将天线和后置电路通过同轴电缆直接相连,信号将会有较大的衰减,特别是大型 GIS 中严重的衰减会极大降低系统的信噪比<sup>[7]</sup>,其次是匹配损耗;对于宽频带天线而言,不匹配影响的结果是信号衰减严重,带宽降低<sup>[8]</sup>;另外还会引入噪声,天线接收到的信号幅值往往在微伏至毫伏数量级范围内,此时噪声对信号影响严重,信噪比低。

基于以上传统问题,文献<sup>[9-10]</sup>对内置的 GIS 局部放电信号传感系统进行了研究,设计了圆环形、圆板形的内置信号传感系统,并分别采用电容耦合模型和天线模型对比研究了这 2 种传感器检测局放

信号的性能。窄带传感系统存在缺陷检测种类少的问题,引入宽频带技术虽然能解决此问题,但是放大滤波器等预处理装置又导致检测范围较小。如果不进行降频预处理而是直接处理 UHF 频段的局放信号,则对高速数字采集器提出极高的要求。文献<sup>[11]</sup>对信号处理及通信进行了研究,已经具有类似 IEC 61850 的网络通信实现,但是因为该通信实现为自行设计的数据库管理系统,因此无法与各种已有的智能变电站配合和对接。目前,用于 GIS 局放检测系统的传感与检测部分大多需通过通讯电缆连接,当具有多个检测点时,现场检测布线多,检测不方便。

因此,本文设计一种有源集成传感系统,将天线与有源电路集成在同一介质板上,使天线接收到的信号能够立即进行处理,将处理后的较低频(10 MHz)、较高幅值(5 V 峰峰值)的信号通过同轴电缆传输,这样既避免了平衡信号在不平衡线路中的传输,又降低了传输线的损耗,可以有效提高系统的信噪比。

## 1 GIS 局部放电信磁波的传播衰减特性

GIS 可近似为由两同轴长导体管构成的圆波导系统<sup>[12]</sup>,内部不仅可以有横电磁波(transverse electric and magnetic field, TEM),还可能存在高次模波(TM 和 TE 波)。

GIS 中 TEM 波沿传播方向按指数函数衰减。衰减常数  $\alpha$  和相位常数  $\beta$  满足:

$$\begin{cases} \alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{r^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)} \\ \beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{r^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right)} \end{cases} \quad (1)$$

对于 TE 或 TM 波,截止频率满足:

$$f_c = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

电磁波频率高于  $f_c$  时有相位常数  $\beta$ ; 低于  $f_c$  时有衰减常数  $\alpha$ 。GIS 呈高通滤波器特性,高次模波不同,相应截止频率也不同。但在同轴长导体管构成的波导系统中高次模波不是主模,因此,仅对较低次模波的截止频率进行定量分析。由边界条件可得:

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{\mu\epsilon}(a+b)} \quad (3)$$

式(3)表明 GIS 内导体直径  $a$  和外壁直径  $b$  越大,截止频率越低。以 220 kV 某国产 GIS 为例,内导体和外壁直径分别为 9.0、33.4 cm,可求得截止频率为 231 MHz。

实际 GIS 罐体并非由理想同轴长导体管构成,各段之间有绝缘子间隔,且存在盘式绝缘子、L 型转角等特殊结构。因此,与上述理想圆波导系统相比,实际 GIS 中电磁波的传播衰减特性存在不同<sup>[13]</sup>。

## 2 GIS 内电磁波传播 HFSS 仿真

简化的 GIS 波导建模没有考虑到绝缘子间隔、L 型转角以及盘式绝缘子等特殊结构,只能定性分析电磁波衰减特性。为了计算实际 GIS 中电磁波衰减的量值,从而进一步确定传感系统动态范围宽度要求,对 220 kV 的 GIS 进行高频结构仿真(high frequency structure simulator, HFSS),量化衰减值,仿真计算结果为信号对数域压缩范围提供数据基础。

建立的直线 GIS 仿真模型如图 1 所示,母线总长为 10.08 m,导体外径为 9 cm,外壳内径为 33.4 cm;导体与盖板部分为铝材料,GIS 左右两侧各有一圆形封装盖板;4 个支撑绝缘子分别位于离左侧盖板 0.5、2.6、4.6、6.6 m 处;施加激励于距左侧盖板 2 m 尖端处。为了降低模型的复杂度,盘式绝缘子模型设置为外径 37.4 cm、厚度 4 cm 的圆柱体平板,绝缘子相对介电常数为 6.0。

直线 GIS 场分布如图 2 所示,仿真结果表明电场强度在直线约 10 m 母线内衰减了约 21.5 dB;带“L”型转角的 GIS 仿真模型如图 3 所示,模型包含 2

个“L”型转角,总长度约 24.5 m。在距左端 2 m 处加入尖端,施加激励计算局放电磁波经过“L”型转角时的衰减情况。

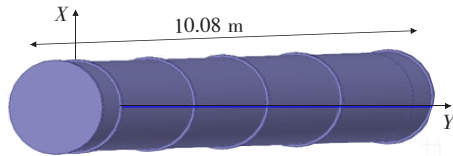


图 1 直线 GIS 模型

Figure 1 The model of linear GIS

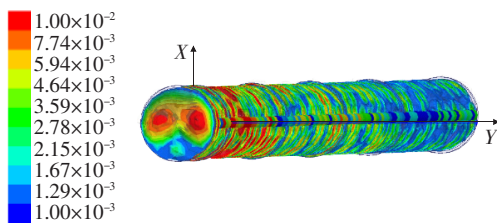


图 2 直线 GIS 场分布

Figure 2 Field distribution of linear GIS

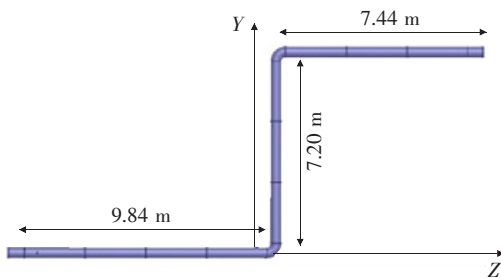


图 3 GIS 模型(带“L”型转角)

Figure 3 GIS model (with “L” corner)

GIS 的场分布如图 4 所示,经过“L”型转角时电磁波整体电场强度衰减了约 55.6 dB。文献[14]在 220 kV GIS 长约 22 m 的单相母线中进行了衰减实验,实验中导体悬浮电位放电最大处衰减约为 52 dB、尖端放电最大处衰减约为 37 dB,该实验结果与本文仿真结果相近。

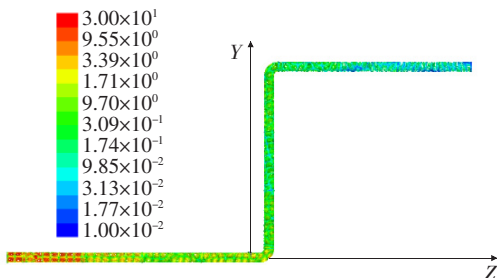


图 4 GIS 的场分布(带“L”型转角)

Figure 4 Field distribution of GIS (with “L” corner)

考虑不同厂家生产的 GIS 尺寸结构不能完全相同,并且应用的电压等级也不尽相同,故较长 GIS 中传感系统需要 40 dB 的动态范围,以保证距离放电点 10 m 的较大范围内可以有效检测到 PD 信号。

### 3 宽动态范围信号检测方法

对于宽动态范围的信号,常用的 6 种信号调理方法的带宽、精度等<sup>[15]</sup>如表 1 所示。由于 GIS 中传播的 TE 和 TM 波其频率在 200 MHz 以上,因此,难以用带宽低于 200 MHz 的调理电路处理 GIS 的局放检测。针对 GIS 局放监测的带宽特点,本文选择对数放大调理方法在对数域压缩局部放电信号,从而增加动态范围。

表 1 宽动态范围信号调理方法的对比

Table 1 The comparison of wide dynamic range signal conditioning methods

信号处理方法	带宽	精度	易受干扰程度	动态范围	备注
集成程控增益放大器 PGA	较低,10 MHz 以下	高	小	中等	动态范围取决于 PGA 选择
集成精密运发模拟选通精密电阻网络	低,1 MHz 以下	低	大	大	动态范围决定于电阻网络
D/A 转换器	低	高	大	大	通过 D/A 转换达到 PGA 效果
数控衰减器	低,1 MHz 以下	中	中	120 dB	速度慢
浮点放大	低,1 MHz 以下	高	小	130 dB	动态范围取决于芯片选择
对数放大	高	中	小	中等	外围电路要求高

## 4 宽动态范围有源集成传感系统的设计

### 4.1 宽动态范围天线设计

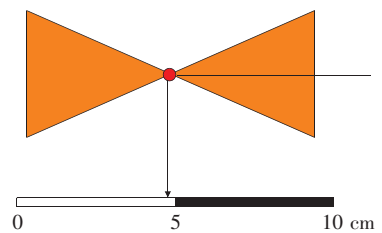
#### 4.1.1 局部放电检测天线对比研究

局部放电激发范围通常在 300 MHz~1.5 GHz 的电磁波频带。设计目标选择 400 MHz 以上通带频率的宽带天线,以消除工业环境中如电晕放电等较低频率的干扰(300 MHz 以下)。

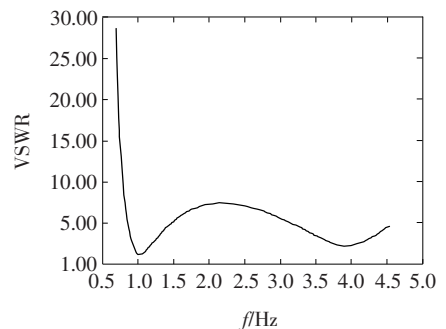
为了选择性能满足要求的天线,对各类宽频带天线在 HFSS 中进行建模、仿真计算、对比分析,主要考量电压驻波比(voltage standing wave ratio, VSWR,简称驻波比)参数,寻找适合于 GIS 局部放电检测传感系统天线的频带和尺寸,对蝶形天线的仿真结果如图 5 所示,可以看出,有 2 个敏感点分别在 1.4 GHz 处。结构简单的蝶形天线加工制作容易、工艺难度低,通过调整天线张角和臂长就能较容易调整天线特性,较好控制多个天线之间的一致性。

对数放大调理方法采用真有效值对数检波器件进行检波和对数放大,输入信号幅度与输出呈对数关系,瞬时压缩动态范围,动态范围最高可达 100 dB。不仅能在宽动态范围内实现高精度功率检测,而且线性特性和温度稳定性也较好。

对数放大器有基带、解调和跨导线性(translinear)对数放大器 3 种。跨导线性对数放大器使用的是双极性三极管,由于在高频场合温度对三极管影响较大,因此,常使用集成式基带或解调对数放大器。在 GIS 的局放监测中,对局部放电信号进行对数域压缩的同时,还要减少对数据量的包络处理,以方便后续处理。因此,GIS 局放监测中对数放大器的首选是解调对数放大器。



(a) 蝶形天线



(b) 蝶形天线 S11 参数

图 5 蝶形天线建模及仿真结果

Figure 5 Modeling and simulation results of butterfly antenna

对对数阿基米德螺旋、阿基米德曲线和对数周期天线 3 种较为常见的天线形状进行仿真。对数阿基米德螺旋天线直径取 6 cm, 仿真表明敏感点位置位于约 1.9 GHz 处, 该频率高于 PD 检测传感系统的需要, 需降低天线敏感频率、加大天线尺寸, 但在 GIS 绝缘子上较难安装较大尺寸的天线; 阿基米德曲线天线直径取 10 cm, 仿真表明在 1.69、2.05、2.85 GHz 处各有一个敏感点, 但其驻波比曲线不平坦, 而且天线结构复杂, 天线性能受制造工艺影响很难一致; 对数周期天线直径取 10 cm, 仿真曲线较为平滑, 在 2.1 GHz 处有一个不明显敏感点, 驻波比较大, 而且驻波比低于 2.5 的频率范围在 1.5 GHz 以上。上述仿真结果如表 2 所示。

表 2 4 种天线对比

Table 2 Comparison of 4 antennas

天线	敏感点	长度/ cm	宽度/ cm	复杂度
对数阿基米德螺旋	1.9 GHz 处	6	6	中
阿基米德曲线	1.69、2.05 GHz 处	10	10	高
对数周期	2.1 GHz 处	10	10	中
蝶形	1 GHz 处	4	8	低

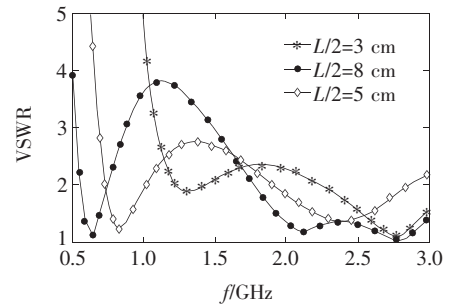
通过表 2 可以看出, 蝶形天线结构相对简单、工艺难度相对较低, 可在相对较小的尺寸下有较低的频率。蝶形天线属于宽频带天线, 是在平面上双锥天线的投影, 通过印制电路板技术印制在一块印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 上, 具有结构简单、制作容易、体积小以及质量轻等优点。因此, 局部放电传感系统天线可以选择蝶形天线。

#### 4.1.2 天线尺寸及加载电阻的影响分析

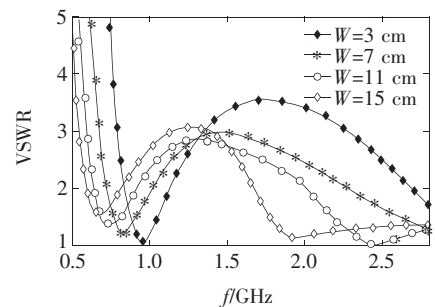
为了使得设计的蝶形天线满足 GIS 局放检测的要求, 对蝶形天线进行分析, 以优化蝶形天线的设计, 使得天线的增益、阻抗特征、驻波系数及频带宽度等主要技术指标满足要求。借助三维电磁仿真软件 HFSS15 对天线进行建模分析、参数优化。

选择 FR4 介质板作为衬底材料, 长为 140 mm, 宽为 70 mm, 厚为 1.6 mm, 介电常数为 4.4。扫描天线尺寸参数 (长度  $L$ 、宽度  $W$ ) 进行分析<sup>[16-17]</sup>, 如图 6 所示。天线宽度  $W$  不变、长度  $L$  变化, 不同长度的 VSWR 曲线如图 6(a) 所示, 天线最低频率受其臂长影响较大, 天线长度越长其频带越低; 天线长度  $L$  不变、宽度  $W$  改变, 不同宽度对应的 VSWR

曲线如图 6(b) 所示, 天线宽度越大, 天线的频带越低。仿真分析表明, 虽然加大天线尺寸有利于降低天线最低频率, 但在工程中应考虑实际情况 (如安装条件等) 设计天线, 因为天线过宽会使得传感系统体积太大, 影响安装使用。



(a) 长度对驻波比的影响



(b) 宽度对驻波比的影响

图 6 天线长度、宽度对天线驻波比的影响

Figure 6 The influence of antenna length and width on antenna standing wave

天线末端与周围空间存在失配, 为了减少带来的反射波能量, 在天线的 4 个角与金属屏蔽罩之间分别连接一个 150  $\Omega$  的电阻。通过 4 个加载电阻来吸收天线末端的电流, 削弱反射波能量, 避免脉冲信号拖尾振荡, 改善天线低频段的驻波比特性。

实际检测中 PD 传感系统置于屏蔽罩内, 以屏蔽外界干扰。传感系统天线驻波比测试实验结果如图 7 所示, 表明屏蔽罩的影响很大。

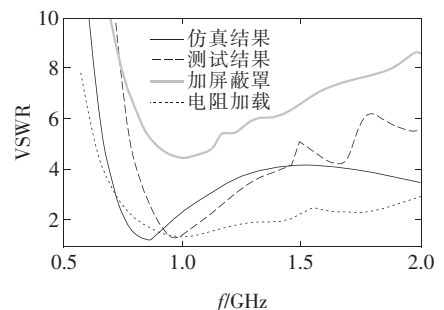


图 7 天线驻波比测试

Figure 7 The test of antenna standing wave ratio

通过加载电阻吸收天线末端电流,能改善天线低频特性。除此之外,为了减少屏蔽罩对电磁波的反射,改善天线驻波比特性,可以通过增加吸波材料和加大天线与金属腔间距。

蝶形天线增益方向的三维仿真结果如图 8 所示,天线的增益在整个频带内较高,最大增益为 4.43 dB,有利于检测局放信号。

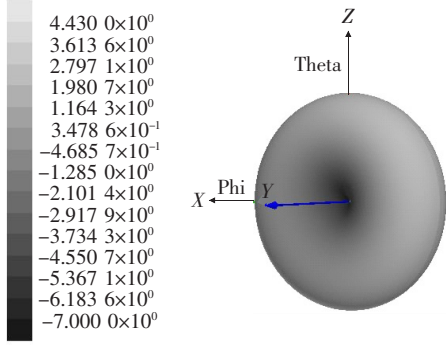


图 8 天线增益方向

Figure 8 The pattern of antenna gain

考虑实际安装的便捷性,PD 检测传感系统要求长度、宽度分别不超过 15、8 cm。对蝶形天线长度  $L$  与宽度  $W$  等尺寸参数进行优化分析,使蝶形天线中心频率为 900 MHz、驻波比小于 2。最终优化结果: $L$ 、 $W$  分别为 11、6 cm,中心频率为 800 MHz,730 MHz~1.05 GHz 频率范围驻波比小于 2。

### 4.2 宽动态范围的降频模拟电路

虽然局放产生的电磁波频率高达 1 GHz,但反映局部放电能量的功率信号频率仅 2~10 MHz。测量功率不仅能保留幅值和相位信息来判断是否发生局放,同时能使信号频率降低。如图 9 所示,局部放电的信号为较难采集的震荡衰减信号,而取包络后降低了信号频率。包络检波不仅在保留所需幅值与相位信息的同时降低了信号频率,还应对局部放电信号进行对数变换,增加系统的动态范围。

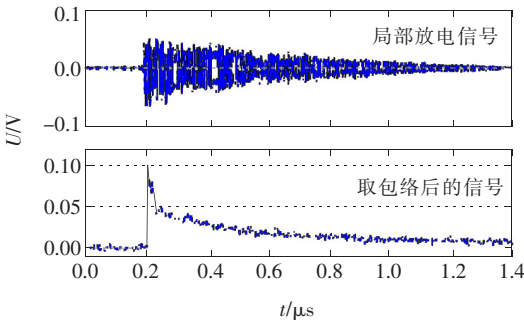


图 9 局部放电信号包络降频

Figure 9 Partial discharge signal envelope frequency reduction

### 4.2.1 基于对数域变换的动态范围扩增及其仿真

解调对数放大器由多个相同的线性放大器级联构成,以实现分段线性逼近对数函数的功能<sup>[18]</sup>。当信号链上某些放大器输出信号过大以至于饱和时,放大器的输出电压将被限制。通过加法器对各级放大器的限幅电压输出到检波器检波后的电压相加,最后,经过低通滤波器滤波后以对数形式进行输出,对数检波器的结构如图 10 所示。

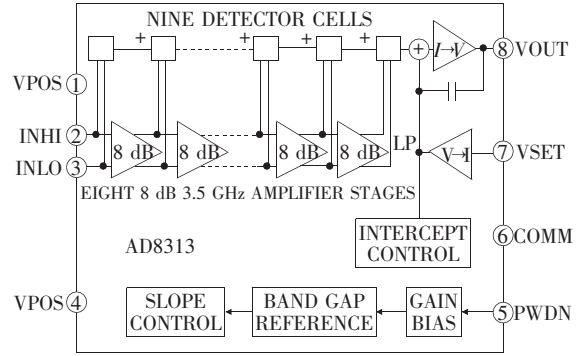


图 10 对数检波器

Figure 10 The logarithmic detector

在 Matlab 中进行仿真分析,对局放信号源建模,表达式为

$$F(t) = \begin{cases} 1900e^{-\frac{t}{\tau}} |\sin(2\pi f_c t)|, & 0 < t < 2 \\ 800e^{-\frac{t}{\tau}} |\sin(2\pi f_c t)|, & 2 < t < 4 \\ 100e^{-\frac{t}{\tau}} |\sin(2\pi f_c t)|, & 4 < t < 6 \\ 50e^{-\frac{t}{\tau}} |\sin(2\pi f_c t)|, & 6 < t < 8 \\ 30e^{-\frac{t}{\tau}} |\sin(2\pi f_c t)|, & 8 < t < 10 \\ 10e^{-\frac{t}{\tau}} |\sin(2\pi f_c t)|, & 10 < t < 12 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $f_c$  为 500 MHz。不同时刻发生的局部放电强度不同,比如 0  $\mu$ s 时局放电磁波幅值为 1900 mV, 10  $\mu$ s 时局放电磁波幅值为 10 mV。

输入信号波形如图 11 所示,可知 0  $\mu$ s 时信号幅值远大于 10  $\mu$ s 时的信号幅值。因此,若采集范围需覆盖到 0  $\mu$ s 时较大幅值的模拟信号,则可能无法采集到 10  $\mu$ s 时极低幅值的信号;若要采集范围缩小到覆盖 10  $\mu$ s 时极低幅值信号,则 0  $\mu$ s 时的信号将达到饱和。

为了保证对不同强度的局放信号都有较高的灵敏度,对局放信号进行对数域压缩,具体变换如下:

$$V_o = k_{\text{slope}} \cdot (P_i - P_{\text{intercept}}) \quad (5)$$

$$k_{\text{slope}} = \frac{V_{\text{omax}} - V_{\text{omin}}}{P_{\text{imax}} - P_{\text{imin}}} \quad (6)$$

$$P_i = 10 \lg \frac{V_{\text{rms}}^2}{Z_0} - 30 \quad (7)$$

式(5)~(7)中  $V_o$  为输出值;  $k_{\text{slope}}$  为斜率;  $P_i$  为输入功率, dBm;  $P_{\text{intercept}}$  为截距;  $V_{\text{omax}}$ 、 $V_{\text{omin}}$  分别为输出功率最大、最小值;  $P_{\text{imax}}$ 、 $P_{\text{imin}}$  分别为输入功率的最大、最小值;  $V_{\text{rms}}$  为输入电压有效值;  $Z_0$  为系统特征阻抗,  $50 \Omega$ 。

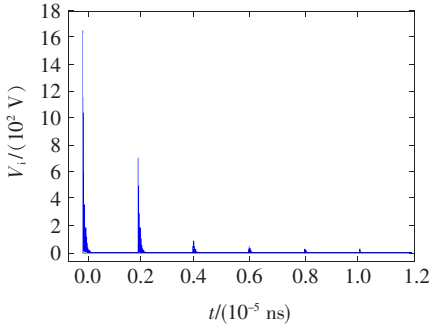


图 11 输入信号

Figure 11 The input signal

输入、输出关系如图 12 所示, 实线即对数域的局放信号, 可知局放信号通过压缩变换到对数域, 输入与输出呈线性关系。局放信号经对数域放大后的输出信号如图 13 所示, 较好地展现出了  $0 \sim 10 \mu\text{s}$  时的所有脉冲信号, 表明不同强度的局放信号都有较好的灵敏度。

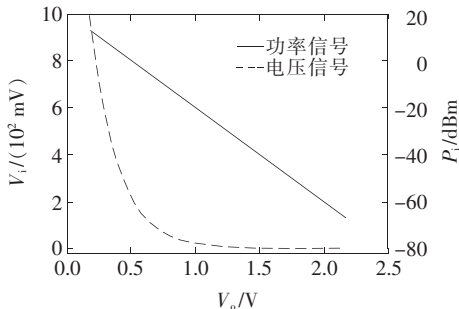


图 12 输入、输出信号关系

Figure 12 The relationship between input and output signal

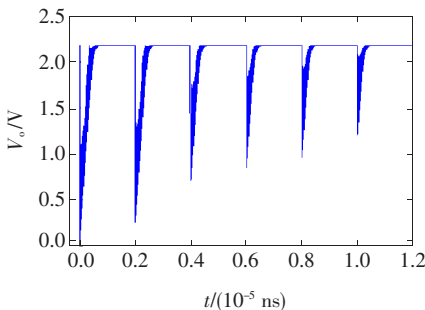


图 13 输出信号

Figure 13 The output signal

#### 4.2.2 宽动态范围的降频模拟电路设计

连接蝶形天线的有源电路<sup>[16-17]</sup>如图 14 所示(采用 ADI 公司的 RF 对数检波器)。检波器将差分输入的调制射频信号精确地转换为直流输出处的等效 dB 标度值, 频率响应范围为  $0.1 \sim 2.5 \text{ GHz}$ , 具有  $40 \text{ ns}$  的快速响应能力, 能够识别局部放电的短放电脉冲。

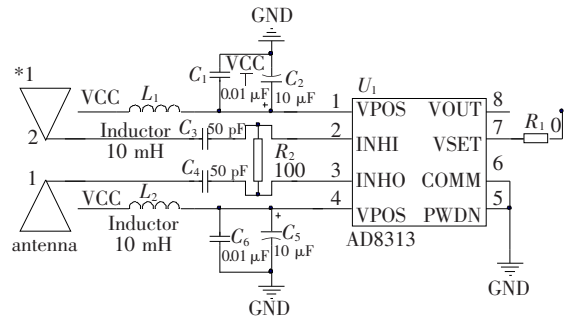


图 14 有源电路

Figure 14 The active circuit

局部放电信号被蝶形天线接收后直接馈入功率检波器, 数据信号频率范围约为  $2 \sim 10 \text{ MHz}$ 。大动态范围的输入经对数放大器压缩成小动态范围的输出, 其转移特性为

$$V_o = K_0 \lg V_i + K_0 \lg K_1 \quad (8)$$

式中  $K_0$ 、 $K_1$  分别为对数斜率、偏差。

解调对数放大器由多个相同的线性放大器级联构成, 核心是 9 级梯级链。每级放大器有  $8.7 \text{ dB}$  的增益和  $10.5 \text{ GHz}$  的  $3 \text{ dB}$  带宽, 即

$$G_{\text{gain}} = 20 \lg \frac{V_o}{V_i} = 8.7 \quad (9)$$

通过超高速脉冲放大器缓冲输出功率信号, 达到加强信号在容性负载上的传输能力的目的。选择非常适合作为脉冲放大器的超高速电流反馈型放大器 AD8009, 使大信号带宽达  $440 \text{ MHz}$ ; 在整个宽带范围内, 信号质量保持较高水平, 最差情况下的失真为  $-40 \text{ dBc}$ 。

以聚四氟乙烯 (FR4) 为基板, 在同一介质板上制作天线和低频模拟电路。降频模拟电路的输出从 SMB 基座引出, 通过同轴电缆连接到外屏蔽的 N 端或 BNC 连接器, 完成有源集成 UHF 传感系统 PCB 设计。

#### 4.2.3 宽动态范围的降频模拟电路的测试

对宽动态范围的降频模拟电路进行测试,先通过信号源产生矢量信号,如图 15 所示。矢量信号尽量模拟局部放电的震荡衰减信号,信号幅值满足天线接收到的局部放电电磁波幅值,将该震荡衰减信号接入降频模拟电路的对数检波器,对信号进行对数检波,检波输出接到示波器中,观测检波结果。对数检波后输出信号如图 16 所示。

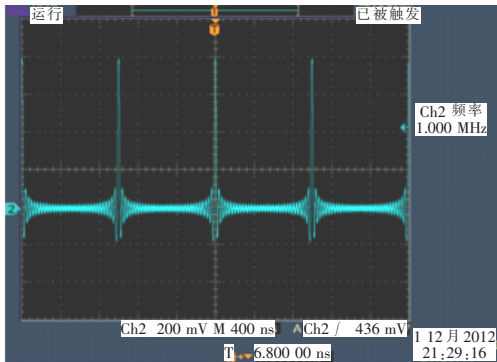


图 15 信号源产生的模拟信号

Figure 15 The analog signal generated by signal source

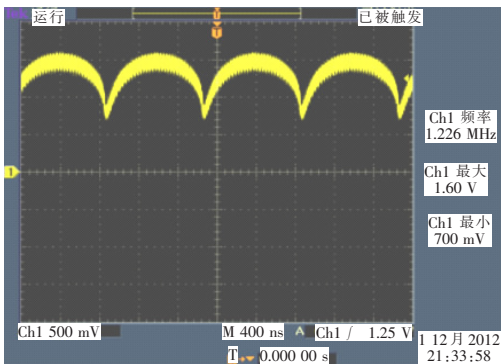


图 16 对数检波后的输出信号

Figure 16 The output signal after logarithmic detection

通过输出信号波形可以看出,对数检波器完成了检波工作波形为原始输入波形的包络;通过输出信号幅值可以看出,输出信号为输入信号的对数,完成了对数域变换的工作。因此,通过对数检波电路完成了数据的对数变换和检波功能。

## 5 结语

针对 UHF 检测监测范围较小的问题,本文采用仿真与设计相结合的原则,对宽动态范围的局部

放电集成传感系统进行分析研究。

1)在电磁传播衰减特性的基础上,首先,若要在较长的 GIS 中、较大频率范围内有效检测到 PD 信号,则需仿真得到至少 40 dB 的动态范围;其次,确定通过对数域变换来增加系统的动态范围,为传感系统设计奠定理论基础。

2)通过仿真 4 类宽频带天线,对比驻波比、天线尺寸等参数,得到蝶形天线适合检测局部放电的信号,通过对数域变化瞬时压缩动态范围,在宽动态范围内提供高精度的局放检测。本文实现的蝶形天线、检波电路、信号调理以及发射高度集成的 UHF 局放检测传感系统,既降低了整套采集系统成本,又具有很好的信噪比,对检测局放的可靠性具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] OKABE S, UETA G, HAMA H, et al. Newspects of UHF PD diagnostics on gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2245-2258.
- [2] 韩筛根, 陈驰, 王自桢, 等. 配网用电压电流传感器误差在线测试装置设计及应用[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 235-241.  
HAN Shaigen, CHEN Chi, WANG Zizhen, et al. Design and application of error online testing device for voltage and current sensors in distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 235-241.
- [3] 李剑, 潘仲明, 张卓航. 基于组合式传感器的智能监视节点设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 137-141.  
LI Jian, PAN Zhongming, ZHANG Zhuohang. Design of an intelligent monitoring node based on combined sensors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(12): 137-141.
- [4] ZHOU W Y, WANG P, ZHAO Z J, et al. Design of an archimedes spiral antenna for PD tests under repetitive impulsive voltages with fast rise times[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 423-430.
- [5] 郭强, 郝义, 王双, 等. 500 kV 充油海底电缆导体温度分布式光纤传感监测及应用[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 77-82.  
GUO Qiang, HAO Yi, WANG Shuang, et al. Monitoring of 500 kV oil-filled submarine cable conductor tempera-



- ture with distributed optical fiber sensing technology and its application[J]. *Smart Power*, 2021, 49(1): 77-82.
- [6] LI J, JIANG T Y, CHENG C K, et al. Hilbert fractal antenna for UHF detection of partial discharges in transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(6): 2017-2025.
- [7] 张宇辉, 段伟润, 李天云. 局部放电信号中抑制周期性窄带干扰的逆向分离方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(6): 232-239.
- ZHANG Yuhui, DUAN Weirun, LI Tianyun. A reverse separation method of suppressing periodic narrowband noise in partial discharge signal[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6): 232-239.
- [8] 廖建友. 平面小型化宽频带双锥天线的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2014.
- [9] 孙才新, 许高峰, 唐炬, 等. 检测 GIS 局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 89-94.
- SUN Caixin, XU Gaofeng, TANG Ju, et al. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 89-94.
- [10] 唐炬, 张晓星, 唐世宇, 等. 气体绝缘组合电器局部放电在线检测定位装置及定位方法[P]. 中国, CN200610054229.9, 2006-04-19.
- [11] 黄成军, 郁惟镛, 胡睿. 基于数字信号处理的电机局放在线监测系统[J]. *高电压技术*, 2000, 26(4): 22-24.
- HUANG Chengjun, YU Weiyong, HU Rui. The PD on-line monitoring system based on the digital signal processing[J]. *High Voltage Technology*, 2000, 26(4): 22-24.
- [12] 王海宝, 王峥, 周娴姊, 等. 基于脉冲转换温度传感方法的电力设备温度监测系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 180-187.
- WANG Haibao, WANG Zheng, ZHOU Xianzi, et al. Temperature monitoring system for distribution network equipment using a pulseconversion temperature sensing method[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 180-187.
- [13] WANG X H, LI T H, DING D, et al. The influence of L-shaped structure on partial discharge radiated electromagnetic wave propagation in GIS[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(10): 2536-2537.
- [14] 刘军, 杨治田, 李旭, 等. 基于稳态特征的输电设备全维度状态监测系统[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(7): 24-29.
- LIU Jun, YANG Zhitian, LI Xu, et al. A full-dimensional status monitoring system for transmission equipment based on steady-state characteristics[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(7): 24-29.
- [15] 龚成龙, 马超. 宽动态范围瞬变信号调理电路的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2006(5): 55-57.
- GONG Chenglong, MA Chao. Wide-range instantaneous processing circuit design[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(5): 55-57.
- [16] 申晨. 局部放电 UHF 法宽动态范围传感器研究及监测系统设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [17] 申晨, 汪汎, 何荣涛. GIS 局部放电检测的有源外置 UHF 传感器设计[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(3): 113-115+119.
- SHEN Chen, WANG Feng, HE Rongtao. Design of active outer sensor for GIS partial discharge detection[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(3): 113-115+119.
- [18] 杨甫, 杨帆, 庞佑兵, 等. 一种高精度大动态范围对数检波电路的设计[J]. *微电子学*, 2014, 44(3): 351-353.
- YANG Fu, YANG Fan, PANG Youbin, et al. Design of the high precision and wide dynamic range DLA[J]. *Microelectronics*, 2014, 44(3): 351-353.