

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306621

自动增益控制的大动态范围纳秒级瞬态电场传感器*

欧阳宏志^{1,2} 姚学玲¹ 孙晋茹¹ 陈景亮¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室 西安 710049; 2. 南华大学电气工程学院 衡阳 421001)

摘要:电磁瞬态脉冲的测量仍有许多技术难点。为了解决瞬态电场测量动态范围较窄的问题,研制了一种能自适应调整测量范围的光纤电场传感器。首先在 CST 软件平台上对单极子 PCB 天线进行建模,对其电磁特性和尺寸效应进行了仿真研究。然后重点设计了发射机的自动增益控制电路,且自动增益控制电路的阈值范围可调。用二次插值法对发射机的非线性进行数字化补偿,并优化设计了接收机的跨阻放大器,使其本底噪声在微伏级别。用标准场法对该传感器进行了标定和测试,并对不确定度进行定量计算。测试结果表明,传感器的输入动态范围达到 54 dB,平均响应时间低于 3 ns,线性相关度为 0.98,灵敏度为 0.025 V/(kV·m⁻¹),扩展不确定度为 2.67。该传感器可以满足雷电脉冲的电磁环境测量和电力系统局放定位的需要。

关键词:瞬态电场;传感器;自动增益控制;非线性补偿;标定

中图分类号: TN29

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.20

Large dynamic range sensor for measuring ns transient electric field based on AGC

Ouyang Hongzhi^{1,2} Yao Xueling¹ Sun Jinru¹ Chen Jingliang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Currently, there are lots of technical difficulties in the measurement of transient electromagnetic pulses. In order to solve the problem of narrow dynamic range of transient electric field measurement, an optical fiber electric field sensor that can adaptively adjust the measurement range was developed. Firstly, the monopole PCB antenna was modeled on the CST platform, and its electromagnetic characteristics and size effects were simulated. Then, the automatic gain control (AGC) circuit of the transmitter was designed, and the threshold of AGC circuit was adjustable. Quadratic interpolation was used to compensate for transmitter's non-linearity. The transimpedance amplifier of the receiver were optimized to make its noise in the microvolt level. The sensor was calibrated and tested using the standard field method, and the uncertainty was quantitatively calculated. The test results show that the input dynamic range of the sensor reaches 54 dB, the average response time is less than 3 ns, the linear correlation is 0.98, the sensitivity is 0.025 V/(kV·m⁻¹), and the extended uncertainty is 2.67. The sensor can meet the electromagnetic environment measurement of lightning pulses and partial discharge positioning.

Keywords: transient electric field; sensor; AGC; nonlinear compensation; calibration

0 引言

电磁测量与传感是电气工程领域的热点问题。为了研究强电磁环境下飞机、舰船、汽车、电力设备等内部关键位置的电场与磁场分布情况,学者们先后研制出多种

电磁场传感器,其利用不同结构的天线感应电磁脉冲信号,采用电光转换技术将测量信号通过光纤传输,并用上位机或者终端显示测量结果^[1-3]。近年来,在电场传感器方面,谢彦召教授团队研制了基于光纤技术的电磁脉冲3维电、磁场测量系统,可以通过3维矢量合成的方法便捷地测量空间任意极化方向的电磁脉冲,并提出范数探

测的概念,可以用于研究高功率电磁环境效应机理和评估^[4];Li等^[5]研制了一款便携式电场辐射源探头,但未给出灵敏度、动态范围等参数。He等^[6]提出了一种基于单极电小杆天线的纳秒级瞬态电场传感器,其上截止频率可达680 MHz,但线性相关度不高。Chao等^[7]提出了一种用于测量雷电电磁脉冲的小型电场天线,但该传感器仅用于强雷电测量,它无法测量弱电磁脉冲,动态范围较窄;Wang等^[8]设计了ACD型D-DOT天线,系统带宽超过1 GHz,但线性度等指标不明确。Jiang等^[9]设计了一款带宽超过5 GHz的电场传感器,能测量高功率的亚纳秒脉冲,但测量的动态范围未知。雷电流幅值从几十A跨越到上百kA,至少跨度40 dB(最大值比上最小值后取对数乘以20),但是电子器件存在死区和饱和区,无法响应如此宽的信号范围,这对电场传感器的动态范围提出很高的要求。上述传感器比较关注带宽、前沿时间这些参数,而对于测量的精度、灵敏度和动态范围等参数研究较少。在电场传感器中,对于增益的控制仍然以固定的方式为主,未见自动增益控制(automatic gain control, AGC)方法在电场检测中应用。碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)是以树脂为基体,碳纤维为增强体的复合材料。随着以CFRP为蒙皮材料的大飞机的数量急剧增长,对CFRP电磁性能的研究具有重大意义。

在飞机电磁脉冲屏蔽性能及雷电间接效应等研究方向,需要对飞机多个部位的电磁参数进行精确测量。本文针对雷电流产生的瞬态电磁场测量及定位的新需求,充分利用AGC方法和非线性补偿技术,配合光纤传输系统,设计了一种响应时间为纳秒级的瞬态电场传感器,测定了CFRP材料箱体内的电磁环境,并对其测量不确定度进行了评价。

1 自动增益控制原理及系统结构

1.1 AGC原理

由于待测电磁场环境未知,对传感器的输入动态范围要求很高。AGC是将放大电路的增益随输入信号强度的改变而自动调整的控制方法。它能够在输入信号幅度变化很大的情况下,使输出信号的幅度仅在较小范围内变化,不会因为输入信号太大而使电子器件发生饱和或堵塞。当输入信号幅度很小时,它又能实现较高倍率的放大,不会因为输入信号太小而无法正常工作。当前,该方法被应用于各种接收机中^[10]。如图1所示,线段A、B、C表示未应用AGC的系统,输出信号随着输入信号线性增加直到到达B点,此时信号链中的某个元件过载并变为非线性。通常,从B点到C点输出信号失真,除非输入信号减小,否则系统无法使

用,增加此值会增加A到B线的斜率并降低输入信号电平信号失真。线段A、D、F表示应用了AGC的系统。线段A、D的斜率大于1表示在AGC电路之前有增益。从线性输出到恒定输出的转折点D被称为AGC“阈值”。从D到F,输出电平不会响应于输入信号的增加。线段D到E的平坦度取决于整体AGC的环路增益,称为“AGC斜率”。AGC系统实际上是一个延伸了输入动态范围的反馈放大器,具有闭环增益特性,其本质上是低通滤波器。

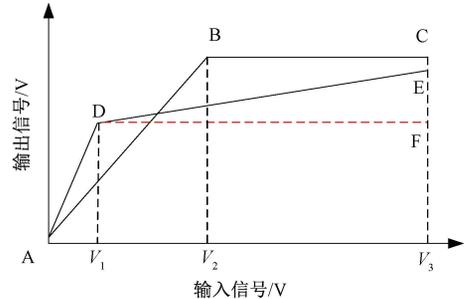


图1 AGC的传递函数

Fig. 1 The transfer function of AGC

但是,引入AGC后,出现了新的问题,即传感器在整个动态范围内的灵敏度不一致,AD段的灵敏度高,DE段的灵敏度低,这不利于传感器的标定。为了保证传感器的输出与输入之间具有线性关系,必须对其进行线性化补偿。

1.2 系统结构

传感器系统分为3个部分:天线、发射机和接收机。如图2所示,天线接收的电场信号,通过AGC放大器进行阻抗变换和足够放大后,再进行电光转换,由激光二极管发送光波至光纤。接收机里的光电转换电路将光波转换为电信号,再经过宽带放大器放大,送给非线性补偿器进行处理后,由示波器或者上位机显示。由于光纤传输也有一定程度的非线性问题,故把补偿环节放在接收机部分^[11]。模拟硬件补偿的方法过于复杂,为了提高灵活性和精度,拟采用数字的方式进行线性化。数字补偿器包含模数转换器、补偿计算单元和数模转换器等部分。为了保证传感器较高的信噪比,发射机的电源采用锂电池,接收机的电源用二次降噪的方法,将电源噪声等级降为微伏级。

2 天线的建模和仿真

2.1 电磁场仿真

为了提高线性度,避免积分器引入带来的误差,采用单极子PCB天线测量瞬态电场。当入射电场较强时,可

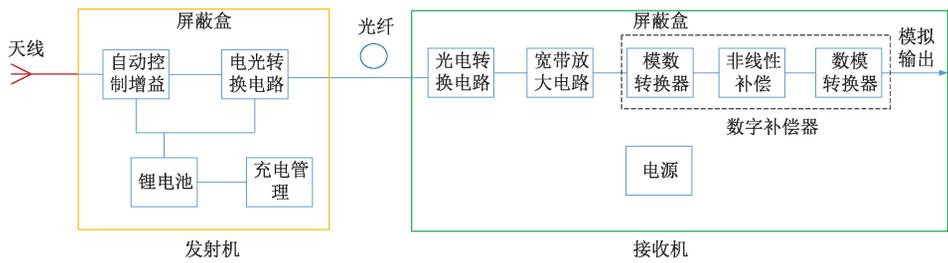


图 2 系统框图

Fig. 2 System block diagram

以通过减少自身电容(即缩短天线长度)或者增大负载电容来获得较好的动态范围;反之,则需要增大自身电容(即拉伸天线长度)或者减少负载电容。但天线长度过长则会对被测场产生较大的扰动,需要通过计算取得合适的值。

在 CST STUDIO 2017 中的微波工作室里面对天线进行仿真计算。如图 3 所示,首先对天线建模,圆形部分的直径为 10 mm,矩形部分宽度为 8 mm,长度为 60 mm,厚度均为 1 mm,材料为无氧铜。基底形状为矩形,材料为环氧玻璃纤维板,外形参数为 60 mm×80 mm×2 mm。平面波距离天线平面 0.3 m ($w < 0$),选择矩形脉冲波作为平面激励波,电场强度为 1 000 V/m,上升时间和下降时间均为 1 ns,持续时间为 10 ns。仿真时间范围设置为 14 ns,频率范围设置为 0~0.5 GHz^[12]。

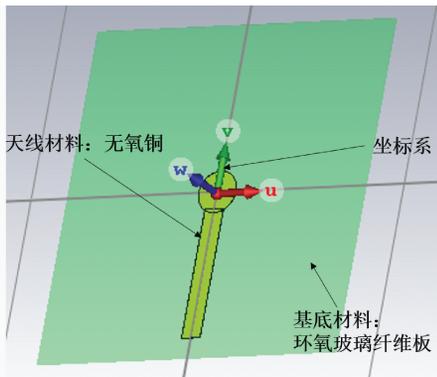
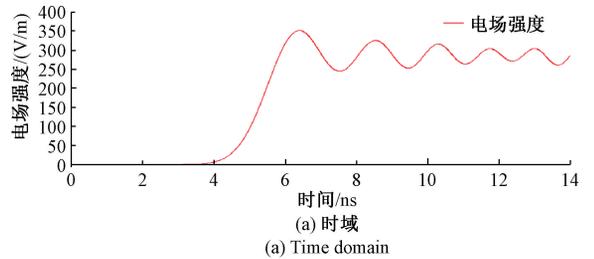


图 3 天线模型

Fig. 3 Antenna model

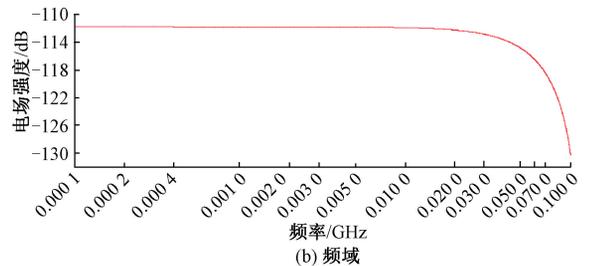
平面波响应主要考察天线的增益和带宽。图 4 是离天线平面原点 1 mm 处的电场时域和频域波形。由于电磁波在金属中的能量损耗,透射后的电磁场有高频震荡,上升时间约为 2.5 ns,带宽为 0.1 GHz。

天线的方向性要兼顾增益和抗干扰性。天线 E 面和 H 面的二维增益方向图显示:在 0.05 GHz 频点处,天线 E 面和 H 面的 3 dB 带宽 101.4°,旁瓣电平为-26.6 dB。其带宽满足测量需求。



(a) 时域

(a) Time domain



(b) 频域

(b) Frequency domain

图 4 电场综合值波形

Fig. 4 The comprehensive value of electric field

2.2 外壳直径对电场分布的影响仿真

传感器外壳选择圆柱体,对天线位置的电场随时间的变化情况进行仿真计算。由于金属结构的存在,天线位置的电场强度都有一定程度的增加,圆柱形外壳顶面的面积越大,越接近于真实的电场。但在面积达到一定值后,这种增大的趋势逐渐变缓,所以没有必要在通过增大面积的办法来减小天线位置的电场强度值。这里折中选择圆柱体外壳的直径为 6 cm。

3 主要电路设计

3.1 发射机

发射机电路原理如图 5 所示,为了提高输入阻抗,将运放 OPA690 接成电压跟随器的形式,经过 AGC 网络的同相放大之后,送给三极管 BFG591 组成的驱动电路,使得激光管输出的光强与电场信号呈比例关系^[13]。发射机电压增益控制范围的目标设为 50 dB(最大值比上最小值后取对数乘以 20),因前级电压跟随器和后级共集

放大器的电压增益为 0 dB,也即 AGC 网络的电压增益范围目标值为 50 dB。

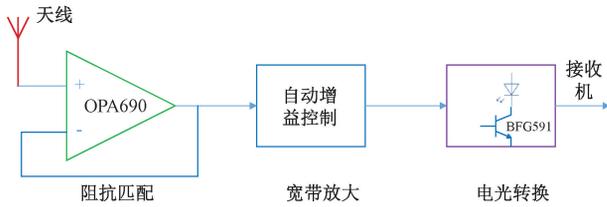


图 5 发射机电路原理框图

Fig. 5 The circuit principle of transmitter

如图 6 所示,AGC 电路提供快速的增益控制响应和分贝增益控制的线性度^[14]。时间常数由 1 kΩ 和 0.1 μF 的乘积决定。OPA695 提供足够的负载驱动能力和 40 dB 的整体增益。其输出信号经过 OPA820 整流和积分之后,去控制 VCA821 的增益。当输出信号强度超过参考电压 V_{REF} 时,积分器斜坡会降低 AGC 环路的增益。相反,如果输出信号强度太小,积分器会上升以增加净增益和输出电压。由 TL431 组成的可调电压基准,其调节范围为 2.5~4 V,通过改变 V_{REF} ,就可以改变转折点的阈值,达到自适应 AGC 的目的,从而适应不同的测试场合。

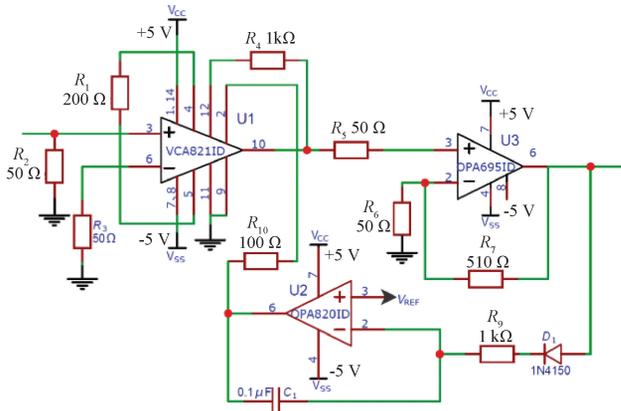


图 6 AGC 回路

Fig. 6 AGC loop

输入 1 kHz 的正弦波,测量输出端电压的幅值,得到图 7 所示的传递函数曲线。其中规律非常接近图 1,其阈值约为 20 mV,低于此值的区间,增益约为 99;在此值以后,曲线逐渐平缓,增益逐渐变小。可见,AGC 使得输入信号的动态范围大大增加,从 1~500 mV,约为 54 dB,比无增益控制时提高 14 dB。

电场传感器实物图如图 8 所示,圆柱体外壳直径为 60 mm,高度为 60 mm,厚度为 5 mm。

3.2 接收机

光电二极管选用 InGaAs PIN 类型,管子在 1 310 nm 波长处,转换的系数大致在 1 A/W,而实际入射的光功率

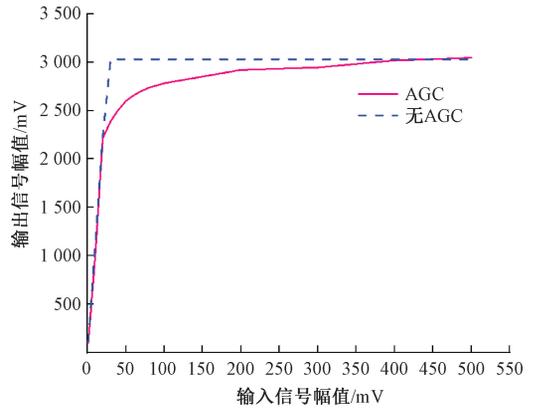


图 7 实际 AGC 传递函数

Fig. 7 The actual transfer function of AGC

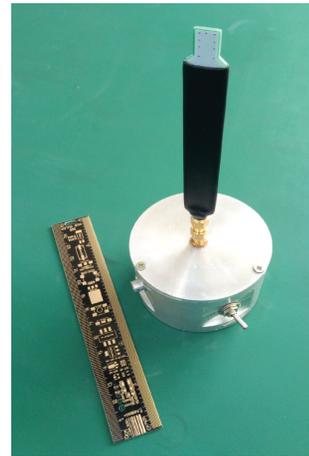


图 8 传感器实物图

Fig. 8 The physical diagram of the sensor

约为 500 μW,所以得到的光电流约为 $I_{in} = 500 \mu A$ 。若得到的输出信号电压为 4 V,所以需要对该电流进行 $8 \times 10^5 \Omega$ 倍的跨阻放大。采用两级放大比较合适,第 1 级为跨阻放大,第 2 级为反相放大。第 2 级的放大倍数取 80,那么第 1 级放大的放大倍数则为 $10^4 \Omega$ 倍,即反馈电阻取 10 kΩ。选定运放为 OPA659,其增益带宽积高达 350 MHz,输入噪声声低,非常适合做光电放大。二极管的暗电流 I_D 、端电容 C_t 、并联电阻 R_{sh} 3 个参数直接影响到芯片的选型和噪声的大小^[15]。

二极管 C_t 为 0.5 pF, R_{sh} 为 600 MΩ,运放的总输入电容(含差模电容和共模电容)为 3.5 pF,主极点频率 f_p 取 100 MHz,根据式(1):

$$f_p = \frac{R_f + R_{sh}}{2\pi R_f R_{sh} (C_t + C_i + C_f)} \tag{1}$$

式中: C_f 为相位补偿电容。因 R_{sh} 远大于 R_f ,则式(1)简化为:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_f(C_i + C_i + C_i)} \quad (2)$$

代入数据,可确定并联的 C_f 的大小约为 11.9 pF,取 12 pF。

3.3 非线性补偿方法

根据图 8 得到的 AGC 特性的数据,找出其反向特性函数,即对输入信号进行相反方向的处理,即可得到理想的传输特性曲线。如图 9 所示,实际上需要求得 AGC 特性的反函数,补偿曲线即是寻找 AGC 传输特性曲线关于理想传输特性曲线轴对称曲线,并用数字化方法实现。由图 9 可见,A'B'段和 C'D'段的线性度较好,可以分析得到其关系式分别为:

$$y = -0.83x + 220, x \in (0, 250) \quad (3)$$

$$y = 18.4x - 5814, x \in (331, 5000) \quad (4)$$

式中: y 为传感器的输出电压, x 为前级宽带放大器的输出电压,即为数字补偿器的输入电压。由于输出量和输入量有确定的数学关系,此阶段采用算法进行非线性补偿。

但 B'C'段呈现近似指数式增长规律,这里采用二次插值法进行线性化。计算的基本思路是先判断输入信号的范围,当 x 的幅值小于 250 mV 时通过式(3)计算输出 y 的值;当 x 的幅值大于 330 mV 时通过式(4)计算输出 y 的值;当 x 的幅值大于 250 mV,小于 330 mV 时,通过迭代计算得到输出 y 的值。

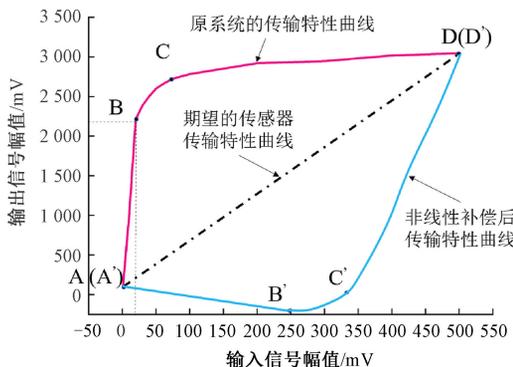


图 9 非线性补偿效果

Fig. 9 Non-linear compensation effect

数字化补偿器采用的 ADC 芯片为 AD9208, DAC 芯片为 AD9778, 计算单元为 FPGA, 型号为 Xilinx Spartan-6。System Generator for DSP 是 Simulink 中一个基于 FPGA 的信号处理建模和设计工具,先在 MATLAB 中对系统进行建模和算法验证,经过仿真后便可以直接将系统映射为基于 FPGA 的底层硬件实现方案。

在 System Generator for DSP 中运行基于定点周期的仿真。 $x1$ 和 $x0$ 是小容量查找表的相邻地址,它们之间只隔了一个最低有效位。由于小容量查找表的地址空间为

nb 位,那么该最低有效位值为 2^{-nb} , Reinterpret 模块即执行此操作。如果 $y1=0$ 且 $y0=0$,需要强制 $y1-y0=1$,这样就可以得到 $1/2^{-nb}$ 而不是 0。采用模块 Relational、Constant_1、Constant_2 和 Mux 来处理这个问题。模块 Mult、Add 和 Sub 则执行内插公式。系统实行流水线作业,可以在任何一个时钟周期提供新的输出,最后在目标器件上得到了 72 dB 的信噪比。

4 标定与测试

根据标准 IEEE Std 1309-2013,测量装置的离线测试普遍采用两种方法,即扫频法以及阶跃响应法。相较于扫频法,阶跃响应法可以模拟传输线的工作状态,且可以利用幅值更高的电压波和电流波进行测试,更具可行性及有效性。如图 10 所示,设计标定实验,制作两片铝合金平板,尺寸为 180 mm×180 mm×2 mm,间距为 200 mm,将传感器放置于两个平板的中间位置,平板加以峰值电压为 0.065~35 kV 的 50 μs 脉宽的方波,其产生电场的均匀性可以满足标准 IEEE Std 1227-1990 偏差不超过 5%的标定要求,通过理论值 ($E = U/d$) 计算和曲线拟合得到其平均灵敏度和线性度^[16-17]。测试使用的示波器型号为泰克 MDO3054,冲击分压器自制,其分压系数为 0.01,均已标定完毕。每个点均测试 3 次,取平均值作为实验原始数据。

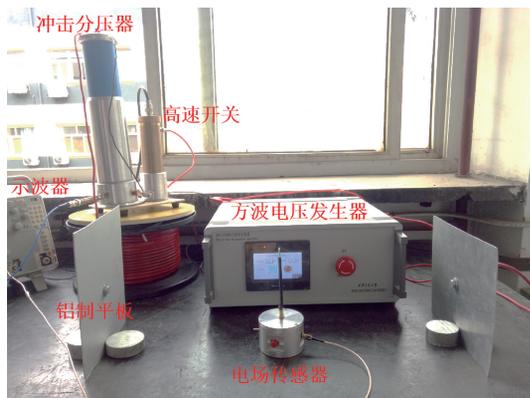


图 10 测试现场图

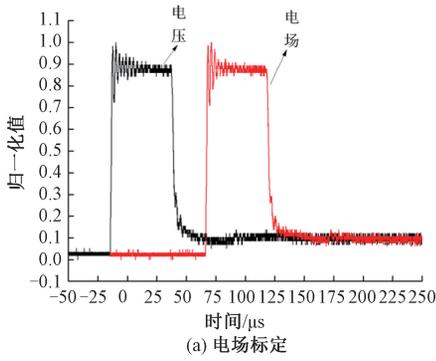
Fig. 10 Test site diagram

4.1 响应时间测试

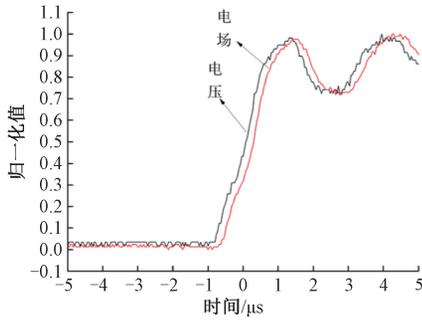
用不同峰值(步长为 1 kV)、持续时间为 50 μs 的方波电压进行响应时间测试,得到图 11 所示波形,这里对纵坐标采取了归一化处理。可见,电场波形和电压波形非常接近,电场信号在平顶部分的振荡幅度较小,但无明显失真。测得电场传感器的平均响应时间为 2.8 ns。

4.2 动态范围和线性度测试

通过改变方波电压发生器的输出峰值,以测不到有



(a) 电场标定



(b) 局部放大图

图 11 方波电压峰值为 1 kV 的电场标定

Fig. 11 Electric field calibration at 1 kV

效的数值时的输入信号作为传感器的动态范围下限值,其值为 0.325 kV/m;以测得开始饱和时的输入信号作为传感器的动态范围上限值,其值为 165 kV/m。最终得到其输入动态范围约为 54 dB,优于文献[18]中传感器 34 dB(即 300 V/m~150 kV/m)的动态范围。

设输出电压 y 与输入的电场强度 x 之间满足式(5)关系式:

$$y = a_E + K_E x \tag{5}$$

式中: x 为电场强度, y 为输出电压, K_E 为电场灵敏度, a_E 为电场零点偏移量。

如图 12 所示,采用最小二乘法来确定拟合曲线,得到电场灵敏度 K_E 为 $0.025 \text{ V}/(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$,电场零点偏移量 a_E 为 0.03 V 。计算其 Pearson 线性相关度为 0.98,传感器的线性度较好。

4.3 碳纤维复合材料箱体中的电场环境测定

根据标准 ARP5412B,用 A 波电流(峰值时间为 $6.4 \mu\text{s}$,半峰值时间为 $69 \mu\text{s}$)模拟雷电流进行雷电电磁环境测试,被测试品为碳纤维复合材料箱体,电流峰值为 100 A,雷击路径设置为面对面击入^[19]。电流附着在用碳纤维复合材料制作而成的边长为 30 cm 的立方体箱体上,测量其内部电磁环境,即重复测量其内部空间中间点的电场脉冲信号,如图 13 所示,传感器输出波形与电流波形(已转换为电压)差异很小,电场信号的上升沿和源

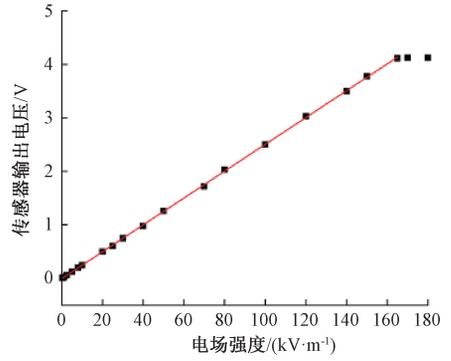


图 12 动态范围和线性度测试

Fig. 12 Dynamic range and linearity testing

电流的上升沿几乎重合,下降沿尾部有些许失真,这是由于测量系统的下限截止频率不够低造成的。

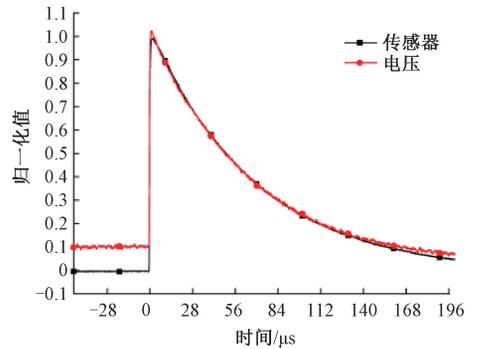


图 13 碳纤维箱体内电场测定

Fig. 13 Determination of electric fields in a carbon fiber box

4.4 不确定度评定

传感器测量的不确定性主要来自两个方面:一是场源的理论计算,由于极板尺寸测量不准确、场的不均匀性、环境温度等带来的不确定性;二是来自于测试环境,天线的方位角的变化、传感器放入引起畸变、数字示波器测量值、不同长度同轴电缆带来的信号衰减等等。最后,需对上述测量不确定度分量进行合成,可以得到不同频率点的合成标准不确定度和扩展不确定度^[20]。频率 10 MHz 处电场不确定度分量如表 1 所示。

由表 1 不确定度概算可知,共有 6 个标准不确定度对合成不确定度贡献较大,4 个为均匀分布,两个为正态分布,故合成标准不确定度应接近于均匀分布,对应的置信概率为 95%,取包含因子 $k = 1.65$,则电场传感器测量的扩展不确定度为:

$$U_E = k u_E = 2.67 \tag{6}$$

将传感器的主要技术指标总结如表 2 所示,其各方面指标较为均衡,能满足雷电电磁环境测量需要。

表 1 频率 10 MHz 处不确定度分量表

Table 1 The uncertainty component at 10 MHz

不确定度分量	来源	最大偏差/%	分布	包含因子(k)	相对标准不确定度/%
冲击电压峰值的不确定度	冲击发生器说明书	0.2	均匀	$\sqrt{3}$	0.115
场的均匀性	仿真计算	0.3	均匀	$\sqrt{3}$	0.173
传感器的线性	实测	0.5	均匀	$\sqrt{3}$	0.289
传感器对场的扰动	实测	0.98	均匀	$\sqrt{3}$	0.566
平板间距的测量误差	卷尺说明书	0.6	正态	1	0.600
定位误差	实测	2.2	均匀	$\sqrt{3}$	1.270
分压器的测量误差	分压器说明书	0.18	正态	1	0.180
重复性	实测	0.32	正态	1	0.320
示波器测量电压-通道 1	示波器说明书	0.28	均匀	$\sqrt{3}$	0.162
示波器测量电压-通道 2	示波器说明书	0.28	均匀	$\sqrt{3}$	0.162
相对标准不确定度总和 u_c (方根)					1.62

表 2 传感器主要技术指标

Table 2 The main technical indicators of the sensor

输入动态范围/dB	平均响应时间/ns	线性相关度	带宽/MHz	灵敏度	扩展不确定度
54	2.8	0.98	>100	0.025 V/(kV·m ⁻¹)	2.67

5 结 论

本文研制了一套新型光纤式电场传感器。传感器设计的目标为大动态范围和高线性度。天线采用单极子类型,此时电场传感器不需要积分运算,避免积分器带来的频带不平衡和线性度较差的问题。仿真研究了天线长度和发射机外壳尺寸对于感应电压和电场畸变的影响,并据此选取了合适的尺寸参数。采用自动增益控制方法,使得输入信号的动态范围从 1~500 mV,约为 54 dB,使得其能适应更多的电磁环境测量场合。用二次插值法和插值查找表对自动增益控制的非线性进行补偿,提高了数据处理的精度,从而有效地提高了测量的线性度,整体线性相关度达到 0.98。

参考文献

- [1] 严雪飞,朱长青,王佳.瞬态脉冲电场传感器研发现状与展望[J].核电子学与探测技术,2019,39(274):116-122.
YAN X F, ZHU CH Q, WANG J. Research and development status and prospect of transient pulsed electric field sensor[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology,2019,39(274):116-122.
- [2] 欧阳宏志,姚学玲,陈景亮.同时测量脉冲电场和磁场的微型探头[J].高电压技术,2020,46(12):4383-4390.
OUYANG H ZH, YAO X L, CHEN J L. Microprobe for simultaneous measurement of pulsed electric field and

magnetic field [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12):4383-4390.

- [3] QI L, LIU J, SONG Z, et al. Design of wideband GHz electric field sensor integrated with optical fiber transmission link for electromagnetic pulse signal measurement[J]. Sensors, 2018,18(9):1-8.
- [4] 孔旭,谢彦召.基于光纤技术的电磁脉冲 3 维电、磁场测量系统[J].高电压技术,2015,41(1):339-345.
KONG X, XIE Y ZH. Electromagnetic pulse three-dimensional electric and magnetic field measurement system based on optical fiber technology [J]. High Voltage Engineering,2015,41(1):339-345.
- [5] LI Q, XIE Y, LI K, et al. A portable electric field detector with precise time base for transient electromagnetic radiation source location [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2020, 69(4):1408-1415.
- [6] HE Z, BO N, XIAO Q, et al. Design of nanosecond-level transient electric field sensor and its application in hvdc converter station [J]. IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, 2023,20(3):1-6.
- [7] CHAO Y, CUI M, RONG C, et al. Development of high power transient electromagnetic field sensors [C]. 2015 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility,2015;215-218.
- [8] WANG J, ZHAO Y, LI W, et al. Research on transmission line voltage measurement method of D-dot sensor based on gaussian integral [J]. Sensors, 2018, 18(8):1-15.
- [9] JIANG D, SU Y, WANG Y, et al. Design and experiment of broadband electric field sensor for high-power sub-nanosecond pulse measurements [J]. Journal of Physics,2023,23(2):1-6.

- [10] 吴剑明, 张小康, 黄身钦, 等. 两级放大反馈自动增益控制电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(8): 97-99, 104.
WU J M, ZHANG X K, HUANG SH Q, et al. Design of two-stage amplification feedback automatic gain control circuit[J]. Instrument Technology and Sensor, 2016(8): 97-99, 104.
- [11] KONG X, XIE Y, LI Q, et al. Development of one-dimensional norm detector for nanosecond-level transient electric field measurement [J]. IEEE Transaction Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(4): 1035-1040.
- [12] 严雪飞, 朱长青. 三维脉冲电场传感器的建模仿真与设计[J]. 高电压技术, 2018, 44(302): 281-287.
YAN X F, ZHU CH Q. Modeling and simulation and design of three-dimensional pulsed electric field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(302): 281-287.
- [13] 姚伟博, 张永民, 徐启福, 等. 快脉冲测量探头的标定技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 814-819.
YAO W B, ZHANG Y M, XU Q F, et al. Research on calibration technology of fast pulse measurement probe[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 814-819.
- [14] HAN Z, FEN H, JUN J. Trampoline-shaped micro electric-field sensor for AC/DC high electric field measurement [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 24(9): 1-10.
- [15] WILMSDORFF J, KIRCHBUCHNER, F, FU B, et al. An experimental overview on electric field sensing[J]. Journal of Ambient Intelligence Humanized Computing, 2019, 10(8): 813-824.
- [16] 张龙, 魏光辉, 潘晓东, 等. 脉冲电场测试系统标定方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 930-936.
ZHANG L, WEI G H, PAN X D, et al. Calibration method of pulsed electric field test system [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 930-936.
- [17] 李钦凯, 张家洪, 马超, 等. 基于激光光电电池供电的脉冲电场传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 89-96.
LI Q K, ZHANG J H, MA CH, et al. Design of an electro-optic (EO) pulsed electric field sensor powered by laser photocell[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 89-96.
- [18] NGUYEN T X, ELY J J, SZATKOWSKI G N, et al.

Lightning current measurement with fiber-optic sensor[C]. International Conference on Lightning Protection, 2014: 1424-1431.

- [19] 黄云志, 郑亮, 汪蓓蓓. 多波长边缘电场传感器介电测量系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 853-859.
HUANG Y ZH, ZHENG L, WANG B B. Research on permittivity measurement for multi-wavelength fringing electric field sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 853-859.
- [20] 严雪飞, 朱长青, 欧渊, 等. 三维脉冲电场传感器的时域校准及不确定度评定[J]. 高电压技术, 2019, 45(325): 293-300.
YAN X F, ZHU CH Q, OU Y, et al. Time domain calibration and uncertainty evaluation of three-dimensional pulsed electric field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(325): 293-300.

作者简介



欧阳宏志, 2004年于湘潭大学获得学士学位, 2007年于湖南大学获得硕士学位, 目前于西安交通大学攻读博士学位, 现为南华大学副教授, 主要研究方向为雷电电磁传感器。
E-mail: oyh1982@163.com

Ouyang Hongzhi received the B. Sc. degree from Xiangtan University in 2004, M. Sc. degree from Hunan University in 2007. He is now a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. He is an associate professor in University of South China. His main research interest includes lightning electromagnetic sensors.



姚学玲 (通信作者), 1987年于郑州大学获得学士学位, 1998年于西安交通大学获得硕士学位, 2003年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授, 主要研究方向为高压大电流测控技术。
E-mail: 812617378@qq.com

Yao Xueling (Corresponding author) received the B. Sc. degree from Zhengzhou University in 1987, and the M. Sc. and Ph. D. degrees from Xi'an Jiaotong University in 1998 and 2003, respectively. Now she is a professor in Xi'an Jiaotong University. Her main research interests include high voltage and high current measurement and control technology.