

脉冲电场传感器灵敏度响应系数一致性的实验研究

孟 萃^{1,2} 郭晓强² 陈向跃² 聂 鑫² 毛从光² 相 辉² 程建平¹

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 电场传感器灵敏度的校准是电磁场测量中的重要环节。本文运用任意波形发生器(AWG),在 TEM 小室中激励不同形式的脉冲电场,对自行研制的偶极天线测量系统的灵敏度进行了校准实验。结果表明,在传感器的频带范围内,不同脉冲波形的灵敏度曲线基本一致,由实验室校准系统给出的灵敏度参数适用于频带范围内的未知波形脉冲电场的测量。

关键词 脉冲电场传感器,幅度校准,任意波形发生器,强电磁脉冲

中图分类号 TB115, O441.4

众所周知,核爆炸能激励幅度高达 10^5 V/m、宽频带的核电磁脉冲,雷电、静电放电以及电磁脉冲弹也能激励出瞬态强电磁脉冲^[1]。瞬态强电磁脉冲对军事基地 C³I 系统、雷达通信天线、民用设施等能造成极强的破坏作用。一般瞬态强电磁脉冲对电子、电气设备以及电力设施的损坏效应归纳起来主要有以下几种:(1)高压击穿;(2)器件烧毁:包括半导体器件的结烧蚀、金属连线熔断等,这将造成永久性损伤;(3)电涌冲击:电磁脉冲即使因金属屏蔽而不能直接辐射到系统,但在金属屏蔽壳体上感生脉冲大电流,如浪涌一样在壳体上流动,缝隙、孔洞、外露引线等将此电涌电流引进一小部分至壳体内部的系统,就足以使敏感的器件损坏;(4)瞬时干扰:当进入系统的功率较低,不足以损坏系统时,能感应瞬时电流及引起器件瞬时失效或产生干扰,致使系统不能正常工作。因此瞬态电磁干扰的研究引起各国的重视,美国 1986 年第一次将瞬变电磁脉冲场辐射敏感度的测试方法列于军标 MIL-STD-461C 中,我国在 GJB152-86 中也制定了相应的标准^[2]。

为准确测量瞬态强电磁脉冲,我们自行研制了带宽为 100 MHz 的偶极天线电场传感器,建立了由横电磁波 TEM 小室(带宽 100 MHz)、高压脉冲源、信号记录系统等组成的校准系统,能在频域、时域内对传感器进行标定校准。由于实验室产生的脉冲波形与待测波形存在一定差异,为研究实验室校准的灵敏度在不同脉冲波形下的一致性,开展了本文所述的一系列实验研究工作。

1 脉冲电场传感器的幅度响应校准装置

1.1 脉冲电场传感器工作原理

自行研制的基于光纤传输的有源电场测量系统框图如图 1 所示,接收天线为偶极棒状天线,接收电路具有极高的输入阻抗,在和天线的等效电容所组成的微分电路中,可以获得较大的时间常数,从而满足时域测量的要求。接收电路的第二级放大用来调整信号的大小,以满足调制激光器的要求。激光器输出的光信号经由单模光纤传输后,光接收机再将其还原为电信号,送到记录设备进行记录。调整脉冲电场传感器天线的长短以及内部电路的分压电容,可以使传感器运用于不同脉冲幅度的时域测量,目前的指标为 $1\sim 10^5$ V/m,带宽 100 MHz。

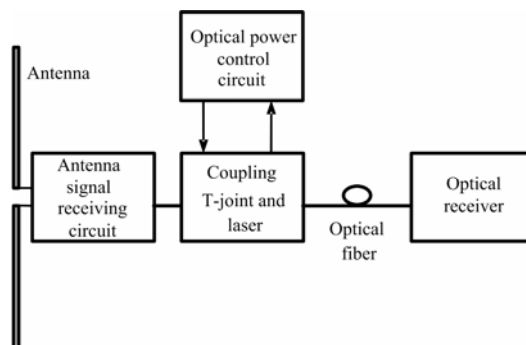


图 1 脉冲电场传感器结构框图
Fig.1 Structure diagram of the pulsed electric field sensor

1.2 幅度响应校准系统

电场传感器的频率标定和时域标定过程在 TEM 小室中进行^[3], 如图 2 所示, 负载为大功率的

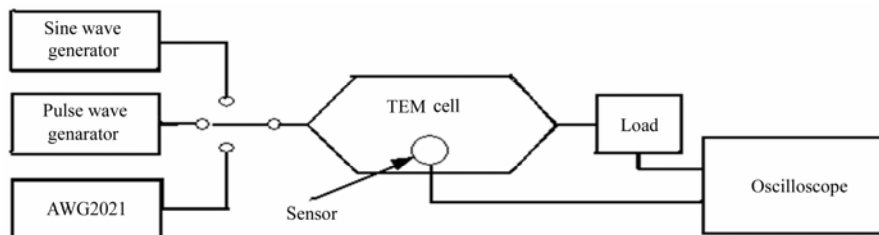


图 2 电场传感器时-频校准系统
Fig.2 Time domain and frequency domain calibration system for electric field sensor

TEM 小室又称横电磁波传输装置, 是一种变形的矩形同轴传输线, 它的中间部分为矩形同轴线, 也称主段, 其横截面为正方形或矩形, 两端为过渡段, 逐渐变小成锥形, 可与标准同轴接头相连。当 TEM 小室的特性阻抗与终端负载完全匹配, 且馈入信号的最高频率小于小室可能存在的模式的最低频率时, 在传播方向上就只有 TEM 波, 也就是说电场和磁场相互垂直并都垂直于波的传播方向, 从而在小室工作空间 (主段部分) 中部的一定区域内形成一个较精确的均匀电磁场环境。传感器则就放在小室下半腔主段区域内, 场强峰值计算公式为^[3]:

$$V = \frac{U}{0.6} \text{ (V/m)} \quad (1)$$

式中, U 为外加信号源的高压, V 为传感器所在位置的场强峰值。灵敏度一般定义为传感器的输出电压与所测电场的比值。

用正弦波信号发生器为信号源, 测量得到该传感器的频带响应图见图 3, 可见该传感器的 3dB 带宽约为 100 MHz。

图 2 中的脉冲发生器仅能产生单一的时域脉冲信号, 不能产生多种复杂的时域信号。而实际应用中, 常常是不知晓被测信号的频率特征的, 即使知晓被测信号的频率特征, 要在实验室里做一个模拟的信号脉冲发生器也是困难而又不实际的。通常可以从系统的传递函数上解决这个问题, 若能求出传感器系统的传递函数, 就可以从输出信号中重建输入信号波形。但是, 通常的传感器传递函数比较复杂, 系统辨识困难, 求出的传递函数阶次较高, EMP

50 Ω 匹配负载。示波器的 CH1 通道记录的是外加信号源的电压波形, CH2 记录的是电场传感器测量的电场波形。

测量中的噪声误差不易控制, 调试过程复杂, 而且测量结果不直观。

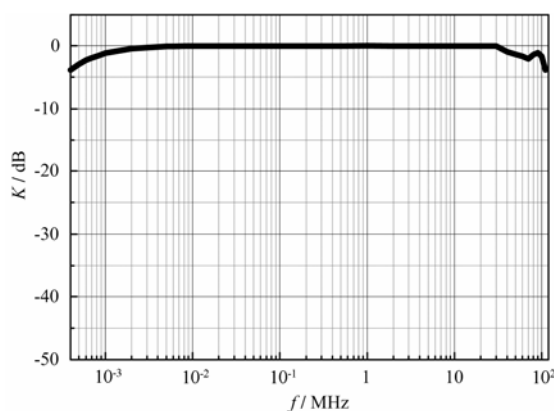


图 3 传感器频响曲线
Fig.3 Frequency band curve of the sensor

因此, 在较小的误差范围内标定出探测器的系统灵敏度曲线显得尤为重要。为此我们选用了任意信号发生器 AWG2021 作为信号源产生不同的脉冲波形。其组成框图如图 4 所示, 主要由采样时钟发生器、地址发生器、波形存储矩阵、高速 D/A、低通滤波器组成。AWG2021 配置了大硬盘、CPU 和程控接口等组件, AWG 等效于高速 DAC 加上配套的外围器件和计算机系统^[4]。

AWG 产生信号的质量由高速 D/A 的采样率、垂直分辨率、波形存储长度、时钟质量等因素决定, 同时随机提供的软件及计算机系统决定了使用的方便性和设备功能, 高性能的 AWG 离不开计算机系统和配套软件。

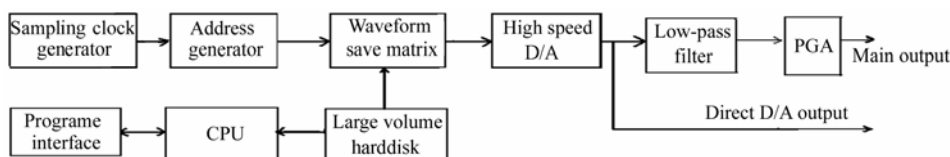


图 4 AWG2021 工作原理
Fig.4 Work principle of AWG2021

2 实验结果

我们用任意波形发生器产生多种可能在瞬态电磁脉冲测量中遇到的信号波形, 测量探测器的幅度响应曲线, 进行比较实验。

1) 产生多种不同上升沿和脉宽的高斯脉冲波, 并作频谱分析, 高斯脉冲 1 的时域及频谱波形如图 5 及图 6 所示。

2) 产生多种不同上升沿和脉宽的双指数波, 其时域及频谱波形如图 7 和图 8 所示。

3) 产生多种不同频率的方波, 其截止频率如表 1 所示。

用 5 种高斯脉冲、3 种双指数脉冲以及 2 种方波校准得到电场传感器的灵敏度曲线, 计算得到灵敏度系数, 结果见表 1 及图 9。图 10 给出灵敏度系数与被测波形截止频率(波形的最大频率)的关系, 可见虽然波形不同, 但灵敏度系数是比较一致的。截止频率为 220 MHz 的高斯脉冲 1 的灵敏度系数为 0.01125 V/(V/m), 与其它截止频率在 100 MHz 以下的脉冲源得到的灵敏度系数相差较大。

图 11 给出 TEM 小室输入端的高压源的监测波形, 图 12 给出电场传感器的测量波形, 可见波形基本没有失真。

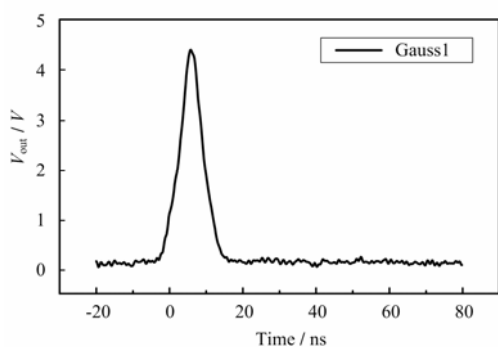


图 5 高斯脉冲 1 的时域波形

Fig.5 Time domain waveform of Gauss pulse 1

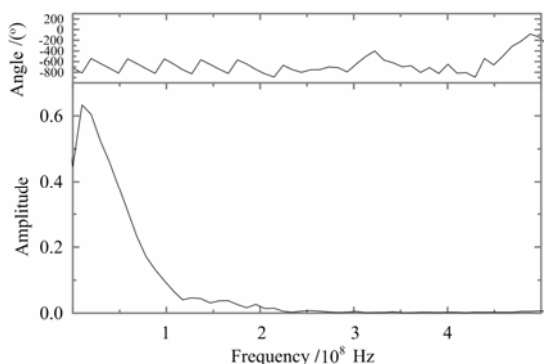


图 6 高斯脉冲 1 的傅立叶分析结果

Fig.6 FFT analysis of Gauss pulse 1

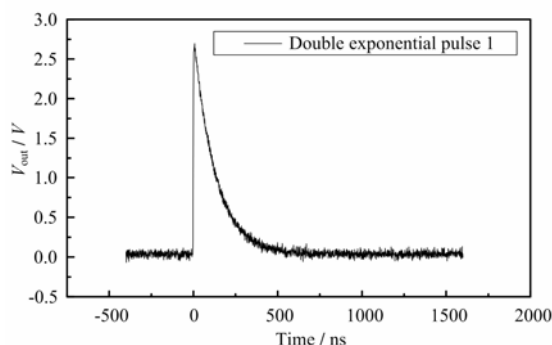


图 7 双指数脉冲 1 的时域波形

Fig.7 Time domain waveform of double exponential pulse 1

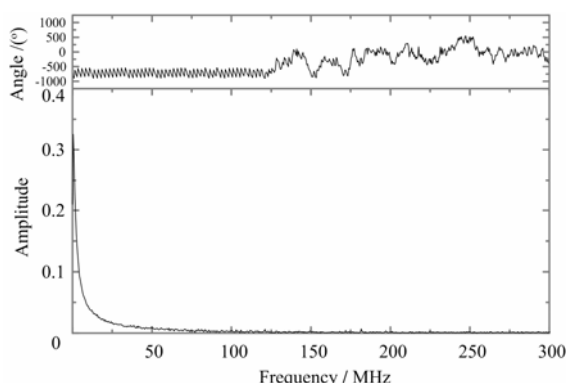


图 8 双指数脉冲 1 的傅立叶分析结果

Fig.8 FFT analysis of double exponential pulse 1

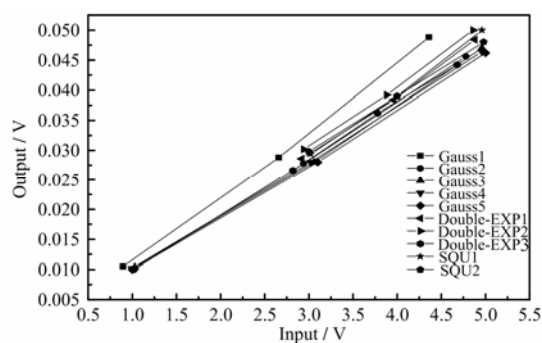


图 9 电场传感器灵敏度曲线

Fig.9 Amplitude curve of the electric field sensor

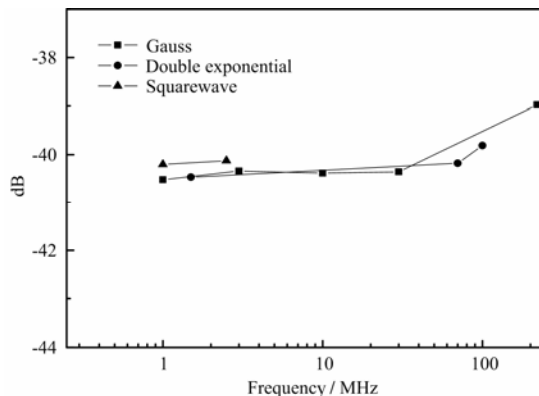


图 10 截止频率与灵敏度系数的关系

Fig.10 Change of amplitude coefficient with cut-off frequency

表 1 实验结果
Table 1 Test result

脉冲波形 Pulse waveform	截止频率 /MHz Cut off frequency/MHz	上升沿 /ns Rising time/ns	半宽 /ns Half-bandwidth/ns	灵敏度系数 /V•(V/m) ⁻¹ Sensitive coefficient
高斯脉冲 1 Gauss pulse 1	220	6	7	0.01125
高斯脉冲 2 Gauss pulse 2	30	27.7	40.5	0.00960
高斯脉冲 3 Gauss pulse 3	10	97.4	130	0.00957
高斯脉冲 4 Gauss pulse 4	3	306	442	0.00962
高斯脉冲 5 Gauss pulse 5	1	938	1360	0.00942
双指数脉冲 1 Dual exponential pulse 1	100	3.45	62.5	0.01022
双指数脉冲 2 Dual exponential pulse 2	70	3.7	96	0.00980
双指数脉冲 3 Dual exponential pulse 3	1.5	3.5	8800	0.00948
方波脉冲 1 Square pulse1	频率 Frequency 2.5 MHz			0.00986
方波脉冲 2 Square pulse2		频率 Frequency 1 MHz		0.00977

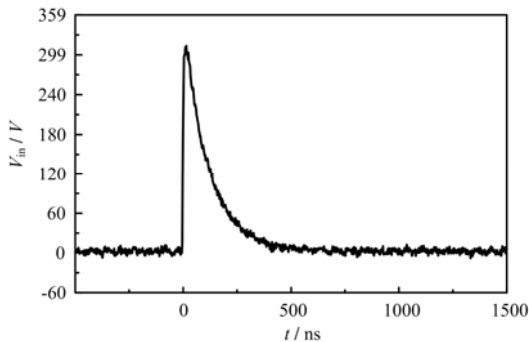


图 11 高压源输入波形

Fig.11 Input waveform of the high voltage power supply

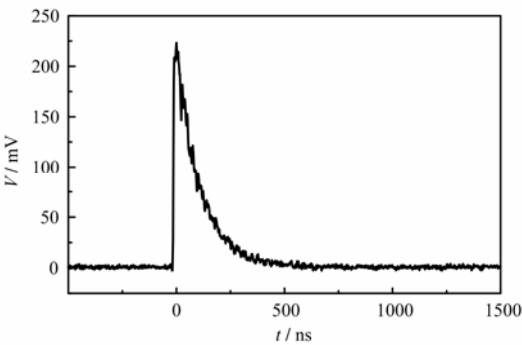


图 12 电场传感器测量波形

Fig.12 The measured waveform of the electric field sensor

3 结论

一般讲，通过时域标定可以得到测量系统对特定波形的响应波形，从而得到系统的峰值响应或灵敏度、响应时间、低频失真情况等参数。电场传感器除了接收信号以外，还可以等效为一个带通滤波器，它有一定的频率响应范围。由于实际的传感器设计时，无法做到理想的带通频率特性，因此它就会对时域信号产生频率的截止失真和频率的组合失真，使得传感器的灵敏度系数为输入信号的函数，与我们希望得到的灵敏度常数存在一定差异，这种情况下需要采用基于时域动态模型的标定数据处理方法来解决这一问题。本文采用任意波形发生器（AWG）比较了多种输入信号时的灵敏度系数。实验结果表明，在该电场传感器频响范围内，时域信号灵敏度系数可以认为是一常数，测量系统线性度较好。由于该方法是科学合理的，对于未知脉冲电场的测量，如果测得波形的截止频率在传感器频带范围内，就可以直接采用实验室标定系统给出的灵敏度系数，而无需进一步的处理。

参考文献

1 周璧华, 陈斌, 高成. 微波学报, 2002, 18(1): 88—92
ZHOU Bihua, CHEN Bin, GAO Cheng. J Microwaves, 2002, 18(1): 88—92

- 2 石立华, 陶宝祺, 周璧华. 计量学报, 1997, **18**(2): 140—145
SHI Lihua, TAO Baoqi, ZHOU Bihua. Acta Metrol Sin, 1997, **18**(2): 140—145
- 3 IEEE Std 1309-1996, IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, 1996
- 4 User Manual for AWG2021 Arbitrary Waveform Generator, Sony/Tektronix, Inc., 2003

Test research of consistency for amplitude calibration coefficients of pulsed electric field sensor

MENG Cui^{1,2} GUO Xiaoqiang² CHEN Xiangyue² NIE Xin² MAO Congguang²
XIANG Hui² CHENG Jianping¹

¹ (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

² (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract The amplitude calibration of an electric field sensor is important in the measurement of electromagnetic pulse. In this paper, an arbitrary waveform generator (AWG) is used to generate multi-waveform electric field in the TEM cell and the dipole antenna pulsed electric field sensor is calibrated. In the frequency band of the sensor, the calibrated amplitude coefficients with different waveforms are identical. The coefficient derived from the TEM cell calibration system suits to the measurement of unknown electric field pulse within the frequency band.

Key words Pulsed electric field sensor, Amplitude calibration, Arbitrary waveform generator, High electromagnetic pulse

CLC TB115, O441.4