

文章编号: 1001-4322(2006)02-0261-04

# 超宽谱电磁脉冲辐射场测量系统\*

朱四桃<sup>1,2</sup>, 朱柏承<sup>1</sup>, 樊亚军<sup>2</sup>

(1. 北京大学 信息科学技术学院, 北京 100089; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 介绍了一套自行研制的高功率超宽谱电磁脉冲辐射场测量系统, 该系统主要由 TEM 喇叭接收天线、同轴传输线、宽带示波器及微型计算机组成。其中, TEM 喇叭上极板为等腰三角形金属板, 顶角 14°, 高 60 cm, 下极板为 80 cm × 30 cm 矩形金属板, 两金属板间夹角为 7°, 采用同轴线直接馈电方式, 馈电点高度 1 mm。分析了测量系统的基本理论, 采用时域有限差分和离散傅里叶变换相结合的方法对 TEM 喇叭接收天线的传递函数进行了计算, 建立了信号衰减补偿方法。实测了抛物面反射面脉冲辐射天线的辐射场, 测得主轴上远区辐射场主脉冲波形与辐射天线的激励信号近似成微分关系, 当激励信号的前后沿变快时, 测得的辐射场也相应增大。测量结果表明, 该系统能够反映脉冲辐射场的变化特性, 具有良好的波形保真性和宽频带特性。

**关键词:** 超宽谱; 电磁脉冲辐射场; 测量系统; TEM 喇叭天线

中图分类号: TN788

文献标识码: A

高功率超宽谱电磁脉冲具有脉冲短、频谱范围宽、脉冲功率高等特点, 在目标探测及目标识别方面得到了广泛应用。同时, 高功率超宽谱电磁脉冲空间辐射场测量技术也引起了人们的重视。目前, 已经有一些文章<sup>[1-5]</sup>探讨了这种测量技术, 主要针对不同形式的接收天线进行了分析与讨论。本文介绍了一套自行研制的高功率超宽谱电磁脉冲空间辐射场测量系统, 分析了其基本测量理论, 并建立了信号衰减补偿方法。

## 1 系统组成

该系统主要由 TEM 喇叭接收天线、同轴传输线、宽带示波器及微型计算机组成, 如图 1 所示。TEM 喇叭用作接收天线时具有以下特性<sup>[6]</sup> (1) 在长度一定的条件下, 张角越大, 灵敏度越高, 波形保真性越差; (2) 在张角一定的条件下, 长度越长, 灵敏度越高, 波形保真性越好。所以, 我们在设计高灵敏度及高保真性的 TEM 喇叭接收天线时, 应尽量增大喇叭长度, 减小喇叭张角。但在实际应用中, 由于受一定尺寸限制, 接收天线不可能无限长, 在满足一定的灵敏度及波形保真性要求的条件下, 需要对喇叭张角及长度进行折衷考虑。最终, 我们设计的 TEM 喇叭接收天线如图 2 所示, 其上极板为等腰三角形金属板, 顶角 14°, 高 60 cm, 下极板为矩形金属板, 长 80 cm, 宽 30 cm, 两金属板间夹角为 7°。馈电结构采用同轴线直接馈电方式, 在这里用一个 SMA 同轴连接器, 其外导体与 TEM 喇叭下极板连接, 内导体通过下极板与上极板顶点连接, 馈电点高度 1 mm。数值计算结果表明, 采用这种小尺寸的馈电结构, 也是提高波形保真性的关键之一。同轴传输线用长 30 m、特性阻抗为 50 Ω 的 SYV—50—9 电缆。宽带示波器为输入阻抗 50 Ω 的取样示波器, 并且通过 GPIB 接口与微型计

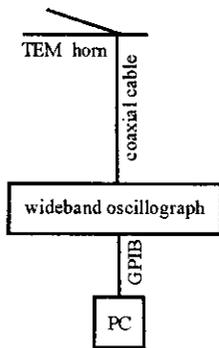


Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

图 1 测量系统框图

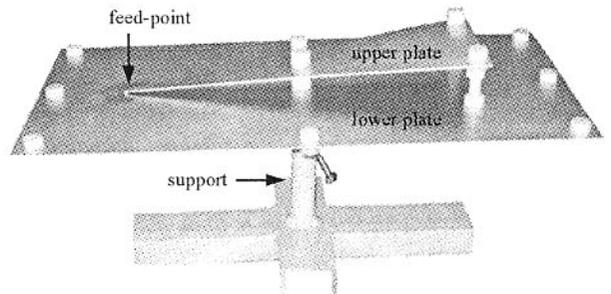


Fig. 2 Picture of measurement antenna

图 2 测量天线实体照片

\* 收稿日期 2005-05-19; 修订日期 2005-09-28

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 朱四桃(1974—), 男, 硕士, 主要从事超宽谱电磁脉冲产生及测量技术研究, E-mail: Zhu\_sitao@sina.com.

算机连接。该系统可实时准确地测量宽度为 300 ps ~ 4 ns 的空间辐射电磁脉冲。

## 2 基本理论

由信号与线性系统理论可知,若激励信号为  $e_i(\omega)$ ,系统传递函数为  $H(\omega)$ ,则系统对激励的响应  $u_o(\omega)$  为

$$u_o(\omega) = H(\omega)e_i(\omega) \quad (1)$$

假定一平面电磁波  $e_i(\omega)$  沿 TEM 喇叭天线的最大接收方向入射,且入射波的极化方向与 TEM 喇叭天线的极化方向相同,若接收天线的端接负载为 50  $\Omega$ ,传递函数<sup>[21]</sup>为  $T(\omega)$ ,则负载上的输出电压  $u_1(\omega)$  为

$$u_1(\omega) = T(\omega)e_i(\omega) \quad (2)$$

若同轴传输线  $S$  参量的  $S_{21}(\omega)$  参数已知,且示波器带宽远大于信号带宽,则在示波器上输出波形  $u_o(\omega)$  为

$$u_o(\omega) = S_{21}(\omega)u_1(\omega) \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得到

$$e_i(\omega) = u_o(\omega)/T(\omega)S_{21}(\omega) \quad (4)$$

由式(4)可知,在示波器输出波形  $u_o(\omega)$ 、接收天线传递函数  $T(\omega)$  及同轴传输线  $S_{21}(\omega)$  参数已知的条件下,我们可以通过反傅里叶变换

$$e_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u_o(\omega)}{T(\omega)S_{21}(\omega)} e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

求得时域入射波信号  $e_i(t)$ 。

## 3 分析方法

采用时域有限差分(FDTD)和离散傅里叶变换(DFFT)相结合的方法对 TEM 喇叭接收天线的传递函数  $T(\omega)$  进行计算,过程如下:在距离 TEM 喇叭口径面 10 cm 处加一调制高斯脉冲  $e_i(t)$  作为入射平面波

$$e_i(t) = -\cos(2\pi f_0 t) \exp[-4\pi(t-t_0)^2/\tau^2] \quad (6)$$

式中  $f_0 = 500$  MHz,  $t_0 = 4.5$  ns,  $\tau = 0.85$  ns。该平面波传播方向为 TEM 喇叭的最大接收方向,极化方向与 TEM 喇叭天线的极化方向相同。以长 10 cm 特性阻抗为 50  $\Omega$  的同轴线作为接收天线的端接负载,在同轴线的另一端采用吸收边界条件,用完全匹配层方法截断无限大的外空间,计算出同轴线中接收天线的输出电压  $u_o(t)$ , 计算结果见图 3。对  $e_i(t)$  及  $u_o(t)$  进行傅里叶变换,带入式(2)可得到接收天线的传递函数,如图 4 所示。

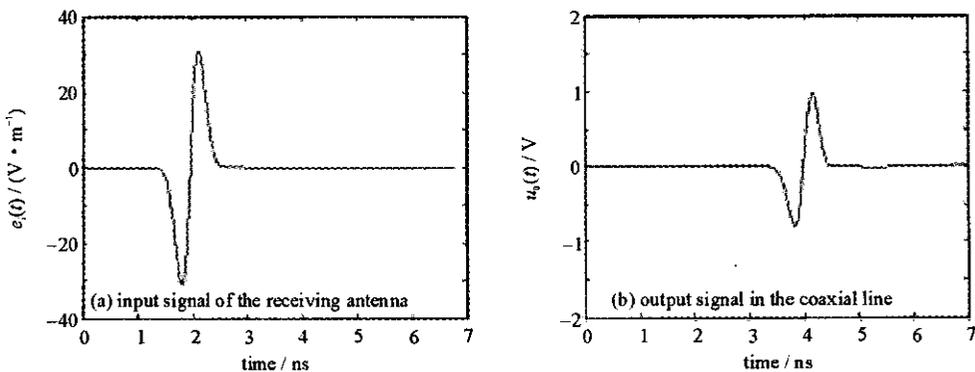


Fig. 3 Input and output signals of TEM horn antenna

图 3 TEM 喇叭接收天线的激励与响应 (a) 输入与 (b) 输出信号

同轴传输线存在介质损耗及金属损耗,文献[7]给出在忽略了介质损耗和外导体金属损耗条件下同轴传输线的  $S_{21}(\omega)$  参数表达式

$$S_{21}(\omega) = \exp\left(-l \frac{k}{2R_0} \sqrt{j\omega}\right) \exp(-j\omega l \sqrt{LC}) \quad (7)$$

式中  $K = (1/2\pi a) \sqrt{\mu/\sigma}$ ,  $a$  为内导体半径,  $\mu$  为导体磁导率,  $\sigma$  为电导率,  $R_0 = \sqrt{L/C}$ ,  $L$  为同轴传输线单位长度电感,  $C$  为同轴传输线单位长度电容,  $l$  为同轴传输线长度。由式(7)可知,同轴传输线的衰减因子与频率的平方根成正比,同轴线内径  $a$  越大,导体电导率  $\sigma$  越高,损耗越小。在传输信号频率较低时,公式(7)能够较真实地反映同轴线的衰减情况,当传输信号频率较高时,介质损耗和外导体金属损耗已经不可忽略,我们用矢量

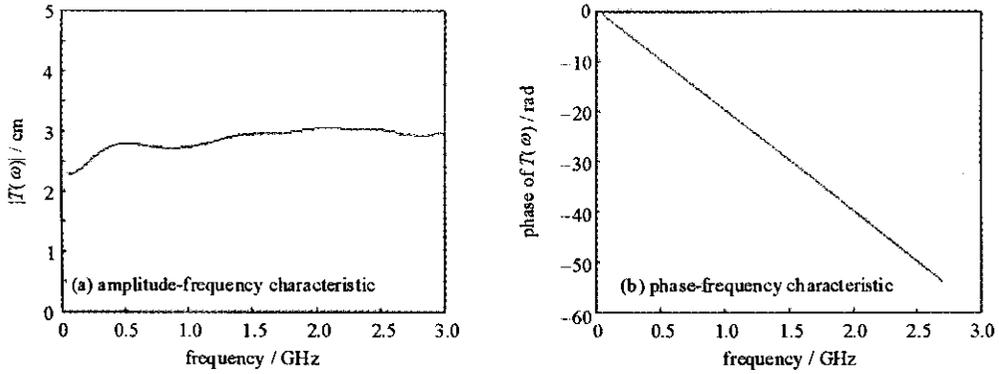


Fig. 4 Transfer function of the receiving antenna

图 4 接收天线的传递函数 (a)幅频特性和 (b)相频特性

网络分析仪测量了 30 m SYV—50—9 同轴传输线的  $S_{21}$  参数, 测量结果如图 5 所示。

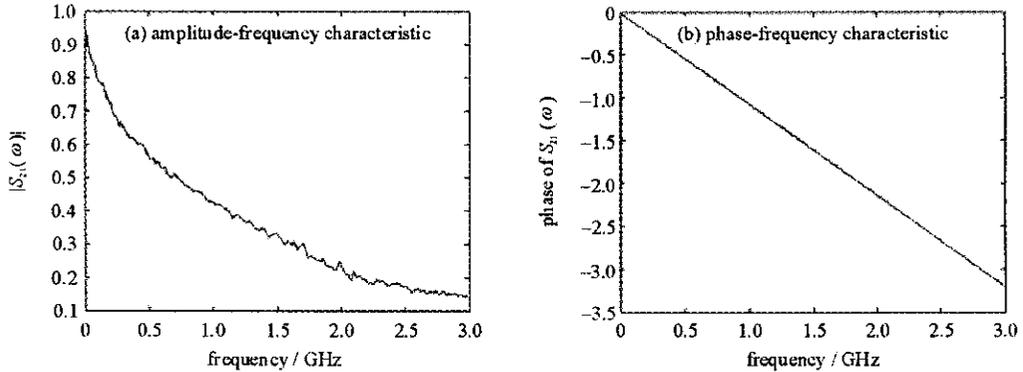


Fig. 5  $S_{21}$  parameter of 30 m SYV—50—9 coaxial cable

图 5 30 m SYV—50—9 同轴传输电缆的  $S_{21}$  参数

由以上分析可知, 由于接收天线传递函数的幅频特性曲线具有一定的波动性以及同轴传输线对不同频率成分的衰减也不相同, 所以在宽带示波器上测得的波形已经对被测信号产生了畸变。在该测量系统中, 我们采用 LABVIEW 编写了基于 GPIB 接口的取样示波器控制、数据传输及信号补偿软件, 以对取样示波器测得的畸变波形进行实时补偿和恢复, 图 6 显示了该软件的流程框图。示波器参数设置用来设置示波器的触发及数据采集方式, 数据传输将示波器采集的数据引入计算机, 然后通过傅里叶变换、反卷积、反傅里叶变换对数据进行处理, 最后输出测点的时域辐射场脉冲波形。

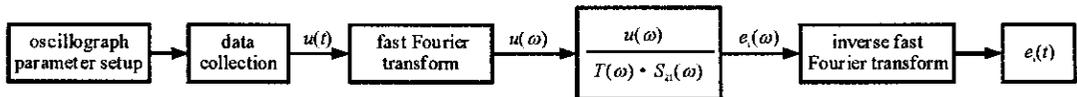


Fig. 6 Schematic diagram of data processing software

图 6 数据处理软件框图

### 4 实验及结果

用该测量系统对抛物反射面脉冲天线的空间辐射场进行测量。该抛物反射面脉冲天线由 TEM 喇叭馈电结构及抛物反射面组成, 反射面直径 2 m, 焦距比 0.37。文献 [8] 给出了激励信号为  $s(t)$  时, 在 TEM 喇叭馈电结构与反射面边缘之间有理想的匹配电路以及忽略了馈电结构对辐射场遮挡效应的条件下, 抛物反射面脉冲天线辐射主轴上远区辐射场的表达式

$$E(r, t) = -\frac{D}{4\pi r c K} \left\{ \frac{\partial s(t - 2F/c)}{\partial t} - \frac{c}{2F} \left[ s(t) - s\left(t - \frac{2F}{c}\right) \right] \right\} \quad (8)$$

式中  $c$  为光速;  $D$  为抛物反射面直径;  $F$  为焦距;  $K = Z_l / Z_0$ ,  $Z_l$  为 TEM 喇叭的输入阻抗,  $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ , 为自由空间波阻抗。式(8)中右边第一项表示辐射场的主脉冲, 决定了抛物反射面脉冲天线的主要辐射特性, 因此对这种脉冲天线而言, 其主轴上远区辐射场对激励信号具有微分效应, 激励信号前后沿的快速变化是增强辐射场的有效途径。图 7 给出了抛物反射面脉冲天线的激励信号以及在天线主轴上 15 m 处用该测量系统测得的辐射场波形。

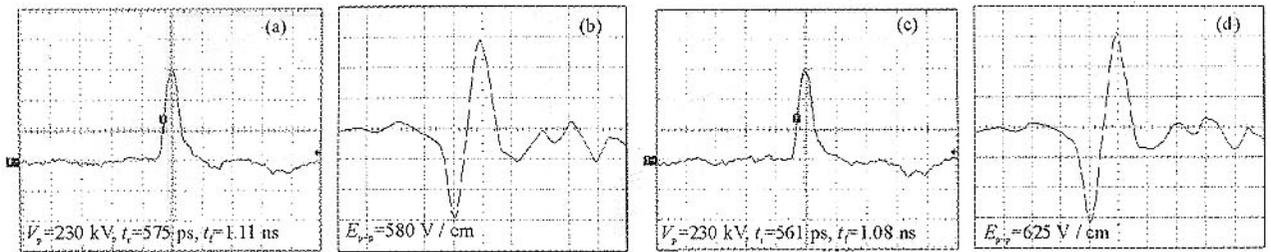


Fig. 7 Input signals ( a ) ( c ) of the impulse radiating antenna and measurement waveforms ( b ) ( d ) of the radiated field

图 7 脉冲天线的激励信号 ( a ) 和 ( c ) , 及辐射场测量波形 ( b ) 和 ( d )

图 7 表明 : 用该测量系统测得的抛物反射面脉冲天线轴上远区辐射场主脉冲波形与辐射天线的激励信号近似成微分关系 ; 当激励信号的前后沿变快时 , 测得辐射场的峰-峰值  $E_{p,p}$  也相应增大。所以 , 该测量系统能够反映脉冲辐射场的变化特性 , 且具有良好的波形保真性。

## 5 结 论

建立了一套高功率超宽带电磁脉冲空间辐射场测量系统 , 并给出其理论依据及分析方法。该系统可实时、准确地测量底宽为 300 ps ~ 4 ns 的空间辐射电磁脉冲信号。用该测量系统对抛物反射面脉冲天线的辐射场进行了测量 , 结果表明该系统具有良好的波形保真性和宽频带特性 , 可用于脉冲辐射天线研究和其他瞬态电磁场测量。

## 参考文献 :

- [ 1 ] 刘小龙, 樊亚军, 刘国治, 等. 超宽带电磁脉冲辐射场测量技术研究 [ J ]. 强激光与粒子束, 1999, **11**( 6 ): 742-746. ( Liu X L, Fan Y J, Liu G Z, et al. Investigation of ultra-wideband transient electromagnetic field measurement [ J ]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**( 6 ): 742-746 )
- [ 2 ] Robertson R C, Morgan M A. Ultra-wideband impulse receiving antenna design and evaluation [ C ] // Ultra-wideband Short-pulse Electromagnetics 2. New York : Plenum Press, 1995 : 179-186.
- [ 3 ] Scheers B, Achery M, Vander Vorst A. Time-domain simulation characterization of TEM horns using a normalized impulse response [ J ]. *IEE Proc Microw Antennas Propag*, 2000, **147**( 6 ): 463-469.
- [ 4 ] García I S, Bretones A R, Martín R G. Pulse-receiving characteristics of V-dipole antennas with resistive loading [ J ]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1998, **40**( 2 ): 174-176.
- [ 5 ] Shen H M. New sensors for measuring very short electromagnetic pulse [ J ]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1990, **38**( 6 ): 838-847.
- [ 6 ] 朱四桃, 朱柏承, 樊亚军. TEM 喇叭超宽带接收特性分析 [ J ]. 强激光与粒子束, 2005, **17**( 8 ): 1228-1230. ( Zhu S T, Zhu B C, Fan Y J. Ultra-wideband receiving characteristics of TEM horn. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**( 8 ): 1228-1230 )
- [ 7 ] 彭仲秋. 瞬变电磁场 [ M ]. 北京 : 高等教育出版社, 1989. ( Peng Z Q. Transient electromagnetic field. Beijing : Higher Education Press, 1989 )
- [ 8 ] Baum C E, Farr E G. Impulse radiation antennas [ C ] // Ultra-Wideband Short-pulse Electromagnetics 2. New York : Plenum Press, 1995 : 159-170.

## Measurement system of ultra-wide spectrum electromagnetic pulse radiating field

ZHU Si-tao<sup>1,2</sup>, ZHU Bo-cheng<sup>1</sup>, FAN Ya-jun<sup>2</sup>

( 1. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100089, China ;

( 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China )

**Abstract :** In this paper, a measurement system of UWS electromagnetic pulse radiating field is developed, which consisted of TEM horn, coaxial transmitting line, wide band oscillograph and data processing software for the compensation of signal attenuation and aberration. The TEM horn is fed vertically through coaxial line, its upper plate is an isosceles-triangle metal plate and lower plate is a rectangular metal plate. LabView is adopted to compile the data processing software. Pulses with base width from 300 ps to 4 ns can be measured accurately by using the system. The radiating field produced by a reflector antenna is measured, the experimental results show that the system has the characteristics of both the high waveform fidelity and the wide band. It can be applied in research of pulse radiation and transient field measurement.

**Key words :** Ultra-wide spectrum ; Electromagnetic pulse radiating field ; Measurement system ; TEM horn antenna