

文章编号: 2095-4980(2016)03-0409-04

## 一种新型超宽带喇叭阵列天线

易超龙, 樊亚军, 袁雪林, 丁臻捷, 夏文锋, 石一平, 朱四桃

(西北核技术研究所 高功率微波技术重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 研制了一套 16 阵元的小型超宽带喇叭阵列天线, 阵元天线由渐变横向电磁场(TEM)喇叭加框型电流环构成, 分析了设计原理结构, 给出了数值模拟结果并进行了试验研究。在每个单元馈入峰值电压 4 kV, 前沿 180 ps 超宽谱脉冲时, 获得了  $rE$  值 82 kV。整个系统紧凑小巧, 具有较高的辐射效率, 适合低功率情况下超宽谱脉冲的辐射。

**关键词:** 超宽带; 天线; 超宽谱脉冲; 阵列天线

**中图分类号:** TN820.1<sup>+</sup>5; TB822.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201603.0409

## A novel compact Ultra Wide-Band horn array

YI Chaolong, FAN Yajun, YUAN Xuelin, DING Zhenjie, XIA Wenfeng, SHI Yiping, ZHU Sitao

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** A 16-element array for ultra high repetition pulse is implemented. The antenna element consists of a Transverse Electric and Magnetic Field(TEM) horn and a current ring. The design principle is analyzed. Simulation and experiment are performed. Results show that the  $rE$  value is up to 82 kV when the antenna elements are excited by a pulse of 180 ps risetime and 4 kV peak voltage.

**Key words:** UWB(Ultra Wide-Band); antenna; pulse; array antenna

TEM 喇叭天线具有结构简单、频带宽、辐射效率高等优点, 是一种常用的超宽带辐射天线<sup>[1-3]</sup>。单个 TEM 喇叭天线通常波束较宽, 主轴场强较低, 利用 TEM 喇叭天线阵列能大大提高天线增益。

通常的 TEM 喇叭由 2 块三角形金属平板组成, 在末端具有较大的反射。俄罗斯的研究人员在 TEM 喇叭天线的基础上, 提出了一种电磁振子组合形超宽带天线<sup>[4-5]</sup>, 将具有不同幅度、相位的电、磁偶极子巧妙组合成一体, 在尺寸较小的情况下能在大于 2 个倍频程的带宽内具有稳定的极化特性、稳定的相位中心及输入阻抗, 同时具有心形(或接近于心形)的方向图, 非常适合于超宽带阵列天线的阵元。本文对该天线结构进行了研究, 发现该天线的电流环调节器对辐射场并无显著的提高, 同时立方体结构限制了其带宽。本文对该天线进行了改进, 去掉了电流环调节器, 同时将天线加长, 提高了低频辐射能力。

### 1 天线结构

该天线结构如图 1 所示。天线由馈源①、U 型外导体框②、电单极子③、TEM 喇叭④及磁偶极子⑤组成。天线宽高都为 20 cm, 长 30 cm。馈源①外接 50  $\Omega$  传输线, TEM 喇叭④的张角沿馈源输入端到口径逐渐变大, 结构由馈电端的微带线渐变至口径处的平行平板, 其特性阻抗也由馈电端的 50  $\Omega$  渐变至口径处的 180  $\Omega$ 。TEM 喇叭的上极板同时又是一个电单极子③。

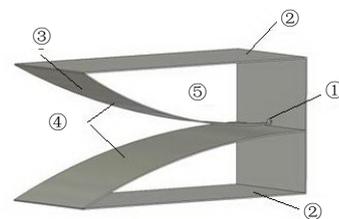


Fig.1 Structure of antenna  
图 1 天线结构

### 2 设计原理与特性分析

根据坡印廷定理, 在极子近区将发生电场能量和磁场能量的交换。在能量交换过程中伴随着能量的外向传递, 这导致电场能量密度  $w_e$  与磁场能量密度  $w_m$  之间的相差而形成外向波。对于电小的电偶极子, 其近区电场能量大于磁场能量, 因此不是所有电场能量参与交换, 也即只有部分能量形成辐射波。电场能量与磁场能量的

差不参与能量交换, 它只形成极子周围空间与源之间周期性的能量交换, 此即天线近区  $V_a$  体积中的无功功率  $W_r$ , 为

$$W_r = \int_{V_a} (\bar{w}_e - \bar{w}_m) dV \quad (1)$$

这正是限制极子带宽的主要因素。要减小  $W_r$  以扩宽天线频带, 可以组合 2 个共馈但无功功率不同的天线, 使它们的近区场叠加后  $W_r$  减小, 即: 在近区若一副天线的电场能量占主导地位, 则另一个的磁场能量占主导地位, 并使 2 副偶极子天线的无功功率随频率等相位变化, 此时近区无功功率为零, 从而减小输入阻抗对频率的依赖性, 增大了天线的辐射能流密度, 扩展了天线的工作频带, 此即“电-磁振子互补辐射”的原理。图 1 所示天线由一个电偶极子④和一个共馈且可调磁偶极子⑤组成, 其设计思想正是基于以上原理。同时, TEM 喇叭与 2 个磁偶极子的最大辐射方向一致, 其空间瞬态辐射场相互叠加, 从而最大限度地提高了天线的辐射效率。

从频域的角度看, 对一般形式的采用 TEM 结构的超宽带天线, 由于不可能在辐射脉冲的所有频率上均实现有效加载, 对于低频总是呈现为开路, 而辐射电磁脉冲的能量中相当一部分分布在相对较低的频谱上(尤其是单极脉冲), 这正是限制天线辐射效率的主要因素。如图 1 所示, 天线结构的 U 型外导体板②与 TEM 喇叭④构成电阻连续加载的低频回路, 所等效的电偶极子的电偶极矩  $p = p\hat{p}$  与所等效的磁偶极子的磁偶极矩  $m = m\hat{m}$  达到平衡条件:

$$p = \frac{m}{c} \quad (2)$$

式中:  $c$  为天线所在空间的光速;  $\hat{p} \times \hat{m} = \hat{z}$ ,  $\hat{z}$  为天线辐射的主波束方向单位矢量。

则这些低频回路所引起的低频辐射在天线辐射的主波束方向上合成而在主波束的反方向上相消, 因而不仅提高了低频分量的辐射效率, 而且实现了低频分量对主波束的贡献, 这正是“低频补偿”技术的设计思想<sup>[6]</sup>。

该天线将一个共馈的磁偶极子、电单极子及 TEM 喇叭巧妙地组合在一起, 将“电-磁振子互补辐射”思想与“低频补偿”原理有机结合起来, 结构紧凑, 在体积很小的情况下实现了较高的辐射效率, 扩展了天线的工作频带。

### 3 阵元天线数值模拟

对 4 种不同结构的单元天线进行对比分析, 模型分别如图 2 所示。

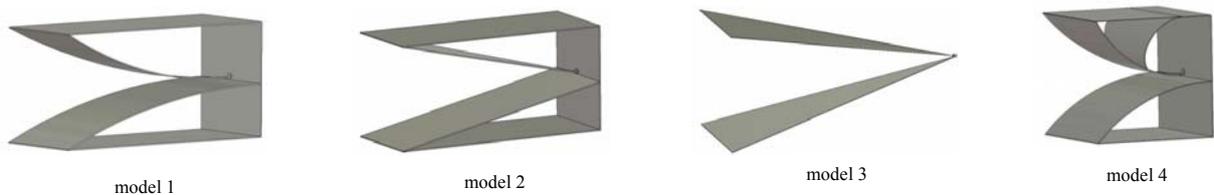


Fig.2 Analysis of different models  
图 2 四种不同结构的天线对比分析

模型 1 为本文优化设计后的阵元天线, TEM 喇叭采用弧形渐变结构, 模型 2 为在模型 1 的基础上将弧形渐变改为直线渐变结构。模型 3 为常用的 TEM 喇叭天线。模型 4 为电磁振子组合天线。对比分析时 4 个模型口径尺寸都一致, 为 20 cm×20 cm, 电磁振子天线长度为 20 cm, 其他 3 个模型长度都为 30 cm。

馈入脉冲采用半导体器件的全固态电路脉冲源<sup>[7]</sup>产生的超宽谱脉冲。图 3 为 50 Ω 同轴传输线上测得的输出波形, 电压为 4 kV, 前沿 180 ps, 半高宽 320 ps。

采用 CST MWS 进行数值模拟, 模拟时馈入功率 1 W, 分别测量 4 种模型峰值场强  $E$  与距离  $r$  之积  $rE$  值, 结果如表 1 所示。可以看出模型 1 具有最强的辐射场强,  $rE$  值分别比相同口径的 TEM 喇叭天线大 49%, 比等口径的电磁振子天线大 39%。图 4 为模拟所得天线电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)<3 时, 天线截止频率约 250 MHz。

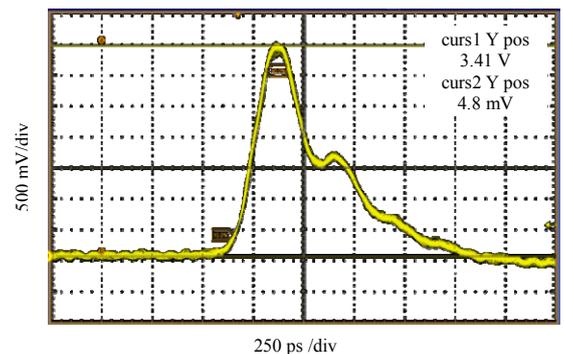


Fig.3 Input waveform  
图 3 激励脉冲波形

表 1 4 种模型性能对比数据

Table1 Simulation results of different models

model	$rE/V$	normalized electric-field intensity
model 1	10.5	1.00
model 2	9.2	0.88
model 3	7.0	0.67
model 4	7.6	0.72

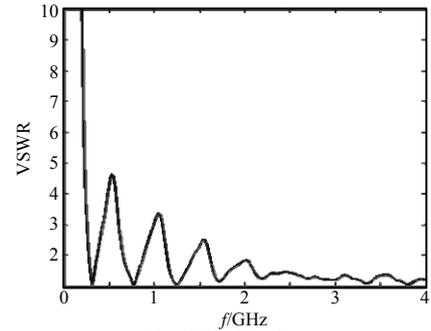


Fig.4 VSWR of antenna  
图 4 天线电压驻波比

图 5 与图 6 分别为天线 H 面与 E 面辐射场峰值场强分布图。H 面-3 dB 波束宽度为 52°, E 面-3 dB 波束宽度为 50°。

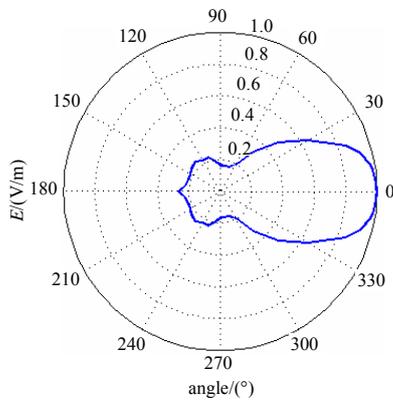


Fig.5 Pattern of H plane  
图 5 天线 H 面峰值场强分布图

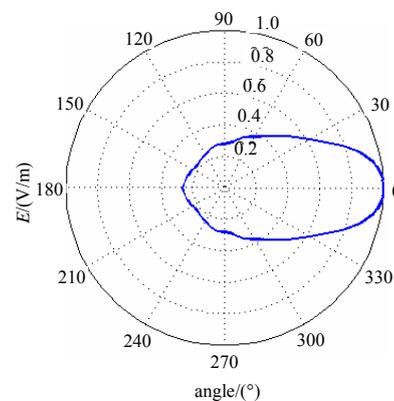


Fig.6 Pattern of E plane  
图 6 天线 E 面峰值场强分布图

#### 4 阵元与阵列实验

采用图 3 所示波形为馈入波形进行单元天线测试实验。距离天线 40 m 测得天线主轴波形如图 7 所示，峰值场强  $rE=5.2$  kV。

采用 4×4 阵元天线进行实验。阵元水平间距为 5 cm，垂直方向间距为 0。图 8 为阵列天线实物图。16 个阵列天线宽度为 95 cm，高度为 80 cm，非常紧凑小巧。

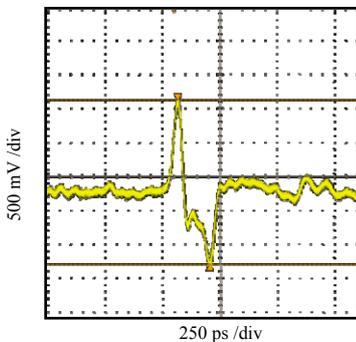


Fig.7 Waveform on boresight  
图 7 阵元天线主轴波形



Fig.8 Arrays  
图 8 阵列天线

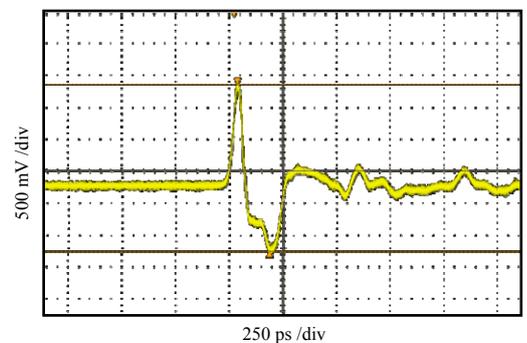


Fig.9 Waveform on boresight of arrays  
图 9 阵列天线主轴波形

每个阵元同步馈入图 3 所示波形，图 9 为实验测得 40 m 处 16 元阵列天线主轴波形，由于 16 路完全同步，合成波形与单路波形基本一致，测得合成波形  $rE$  值为 82 kV。

## 5 结论

设计了一种小型 TEM 喇叭阵列天线。阵元天线由渐变 TEM 喇叭加电流环构成,当馈入峰值电压 4 kV,前沿 180 ps 的超宽谱脉冲时,测得主轴  $rE$  值为 5.2 kV,比常用的 TEM 喇叭天线及电磁振子天线具有更高的辐射效率。以该天线为阵元对 4×4 阵列进行了实验研究,获得主轴  $rE$  值 82 kV。该阵列天线小巧紧凑,适合各种低功率下超宽谱脉冲的辐射。

### 参考文献:

- [1] 朱四桃,易超龙,陈昌华,等. TEM 喇叭天线脉冲辐射特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(7):1755-1758. (ZHU Sitao, YI Chaolong, CHENG Changhua, et al. Radiation characteristics of TEM horn antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(7):1755-1758.)
- [2] 燕有杰,刘小龙,蒋廷勇,等. 加脊 TEM 喇叭初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(9):2130-2134. (YAN Youjie, LIU Xiaolong, JIANG Tingyong, et al. Preliminary research on ridged TEM horn[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9):2130-2134.)
- [3] 朱四桃,王俊杰,关锦清,等. 小型超宽谱高功率微波辐射系统[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(8):2027-2030. (ZHU Sitao, WANG Junjie, GUAN Jinqing, et al. Compact ultra wide spectrum high power microwave radiation system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(8):2027-2030.)
- [4] KOSHELEV V I, ANDREEV Y A, BUYANOV Y I. Ultrawideband Transmitting Antennas, Arrays, and High-Power Radiation Sources[M]// MOKOLE Eric L, KRAGALOTT Mark, GERLACH Karl R. Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 6. New York: Springer US, 2003:257-367.
- [5] KOSHELEV V I. High-Power Ultrawideband Radiation for Radar Application[M]// Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 5. Smith Paul D, Cloude Shane R. New York: Springer US, 2002:311-318.
- [6] VOGEL M H. Design of the Low-Frequency compensation an extreme-bandwidth TEM horn and lens IRA[M]// Ultra-wideband short-pulse Electromagnetic 3. New York: Springer US, 1997:97-105.
- [7] 袁雪林,丁臻捷,俞建国,等. 基于雪崩管 Marx 电路的高稳定度脉冲技术[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(4):757-760. (YUAN Xuelin, DING Zhenjie, YU Jianguo, et al. Research on high-stability pulser based on avalanche transistor Marx circuit[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(4):757-760.)

### 作者简介:



**易超龙**(1979-), 男, 湖南省湘阴市人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波. email: yichaolong@sina.com.

**樊亚军**(1959-), 男, 陕西省华阴市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波.

**袁雪林**(1979-), 男, 重庆市长寿区人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波.

**夏文锋**(1982-), 男, 陕西省山阳县人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波.

**丁臻捷**(1974-), 男, 陕西省汉中市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波.

**石一平**(1989-), 女, 郑州市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为高功率微波.

**朱四桃**(1974-), 男, 山西省阳泉市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高功率微波.