

文章编号: 1001-2486(2007)03-0035-04

高功率 UWB 天线阵及其在外场探测中的应用*

吴锋涛, 张光甫, 梁步阁, 袁乃昌

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 运用切割式巴仑实现高功率超宽带天线的平衡馈电, 并用 FDTD 进行仿真分析。研制出 2×4 元高功率天线阵, 测量结果显示该天线阵能耐 250kV 以上高压, 工作带宽达 6 个倍频 (200~12 000MHz), 具有较好的脉冲波形保真性。利用所研制的天线阵列建立外场探测实验系统, 在外场进行目标探测试验。结果表明该天线阵可以用于实际的超宽带雷达发射天线阵, 为高功率源在雷达探测中的应用作出了初步探索。

关键词: 巴仑; 高功率; 超宽带; FDTD; 雷达

中图分类号: TN788 文献标识码: A

High-power UWB Antenna Array and Its Application in Outdoor Target Detection

WU Feng-tao, ZHANG Guang-fu, LIANG Bu-ge, YUAN Nai-chang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The split-tapper Balun was introduced in the high-power ultra-wide-band (UWB) antenna. Finite-difference time-domain (FDTD) was used to analyze the Balun and antenna. The 2×4 elements array was fabricated and the measurement result shows that the antenna can resist high voltage up to 250kV with six multiple frequency (200~12 000MHz) and preserves short pulse waveform well. Outdoor detection experiment system was built by using the antenna array. Target detection experiment was carried outdoors. The experiment result indicates that the array can be used in the practical UWB radar for transmitting antenna arrays, thus making a first step for the application of high-power source in radar detection.

Key words: Balun; high power; UWB; FDTD; radar

在超宽带短脉冲电磁场的应用中, 如要提高雷达的距离分辨力, 须用短的时域脉冲, 分辨率提高了, 与之相矛盾的是能量减小, 探测距离减小。为提高脉冲体制雷达的探测距离, 加大源的脉冲功率是一种选择, 在现有的工程技术条件下, 源的功率的提高有一定的限度, 而且在高功率条件下会出现许多技术难题, 所以采用高功率阵列天线技术来提高探测距离是较为理想的选择。

在高功率微波领域, 特别是脉冲源技术, 近几十年来取得了很大进展, 最大输出功率稳步提高, 已有吉瓦甚至数十吉瓦源。但是传统的高功率脉冲源设计主要应用于高功率效应试验, 运用于雷达探测还需建立起相应的发射天线阵和接收系统和同步控制系统等。对于接收天线, 由于不考虑高压击穿, 其设计方法很成熟。但是由于发射天线要考虑到高压击穿问题, 所以工程实现起来有一定的难度。

超宽带天线经过几十年的发展, 具有各种各样的形式: 蝴蝶结天线^[1], 喇叭天线^[2-3], 印刷天线^[4]等。这些天线有个共同特点就是传输 TEM 模, 具有超宽带特性。其中喇叭天线适合于耐高压, 本文的高功率超宽带天线阵采用的就是这种 TEM 喇叭形式的天线。

1 切割式巴仑的设计与分析

切割式巴仑具有极宽的频带, 其剖面图如图 1 所示, 设计切割同轴线的特性阻抗沿轴向呈近似切比雪夫渐变线阻抗变换, 该变换近于最佳, 其好处是与端接相连时没有阶梯阻抗不连续性^[5], 其设计公式

* 收稿日期: 2006-11-16

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2004AA835040)

作者简介: 吴锋涛 (1977-), 男, 博士生。

如下:

$$\Gamma_0 = \ln \sqrt{Z_2/Z_1} = \ln \sqrt{R} \tag{1}$$

$$\Gamma_{\max} = \Gamma_0 \epsilon_{\max} \tag{2}$$

$$\epsilon_{\max} = 0.21723 \cdot B / \sinh B \tag{3}$$

$$l = \sqrt{B^2 + 6.523 \cdot \lambda_{g\max} / 2\pi} \tag{4}$$

$$Z(\xi) = \sqrt{Z_1/Z_2} (Z_2/Z_1)^{G(B, \xi)/2} \tag{5}$$

$$G(B, \xi) = B / \sinh B \int_0^\xi I_0(B \sqrt{1 - \xi'^2}) d\xi' \tag{6}$$

$\xi = 2z/l$, $I_0(x)$ 为第一类变型贝塞尔函数, l 为变换段的长度。

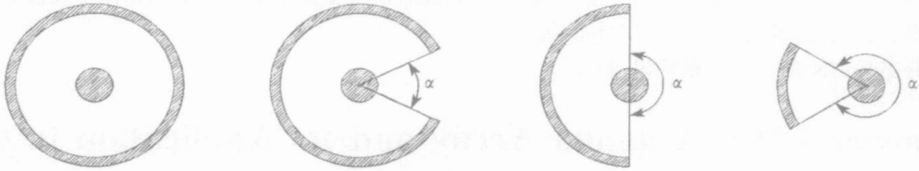


图1 切割式同轴巴仑剖面图

Fig. 1 Cross section view of split-taper Balun for coaxial line to twin line

要设计的阻抗变换是 $Z_1 = 50 \Omega$, $Z_2 = 100 \Omega$, 最大驻波为 1.5, 最低工作频率为 200MHz。则由式(1) ~ (4) 可得, $l = 277.5 \text{mm}$, 由式(5)和式(6)编程计算可求得变换点所对应的阻抗值如表 1 所示。

表 1 同轴切割式巴仑阻抗变换参数

Tab. 1 Parameter of impedance transformation for split-taper Balun

$l(\text{mm})$	0.0	27.7	55.5	83.2	111.0	138.7	166.5	194.2	222.0	249.7	277.5
$Z(\Omega)$	50.0	53.2	56.9	61.0	65.6	70.7	76.2	82.0	87.9	94.0	100.0

运用变分理论可以求得切割式同轴传输线的特性阻抗的上限 Z_u 和下限 Z_d 分别为^[6]

$$Z_u = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{\mu/\epsilon}{\pi(\pi - \alpha)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(n\alpha) [1 + c_u n^2 / (n^2 - k^2)]^2}{n^3 [1 + \coth(n \ln(b/a))]} \text{ ohms} \tag{7}$$

$$Z_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) / (1 - 4\alpha_d / 5\pi) \text{ ohms} \tag{8}$$

取特性阻抗为 $Z_0 = (Z_u + Z_d) / 2$, 运用公式(7)和(8)可以求出特定阻抗处所对应的切割角度 α 。

根据上文设计值, 用 AutoCAD 建立巴仑的实体几何模型, 用 FEMAP 软件对巴仑进行三角形面元剖分, 然后用 Visual C++ 程序对三角形面元网格进行二次剖分, 生成正方形网格文件, 供 FDTD 计算程序调用。生成的巴仑外筒网格模型如图 2 所示, 仿真反射系数如图 3 所示, 反射值在 -15dB 以下(对应驻波为 1.5), 和设计值吻合得很好。

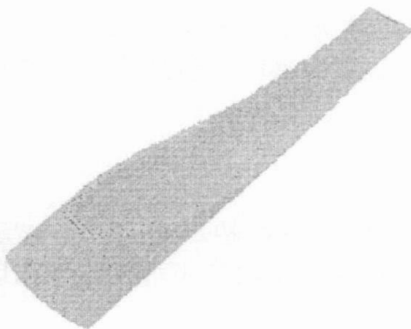


图 2 巴仑外筒网格模型

Fig. 2 Mesh model for outerlayer of Balun

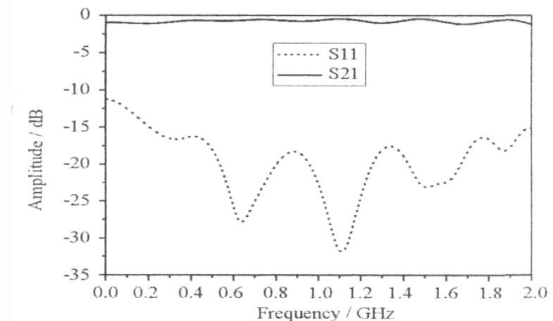
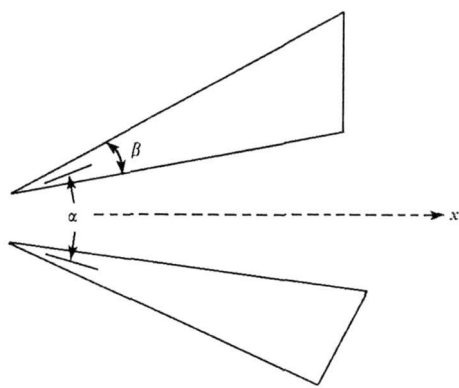
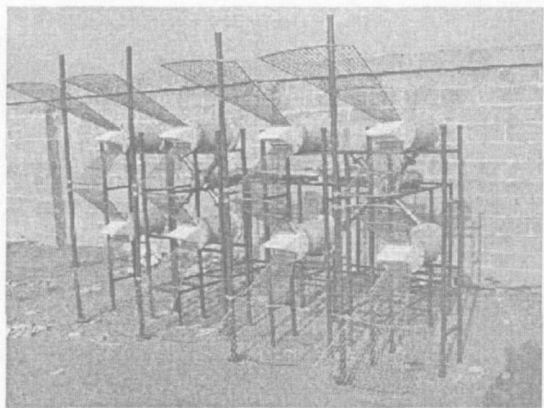


图 3 仿真 S 参数

Fig. 3 Simulation parameter of S parameter



(a) 天线结构图



(b) 8元天线阵实物照片

图4 TEM 天线及阵列

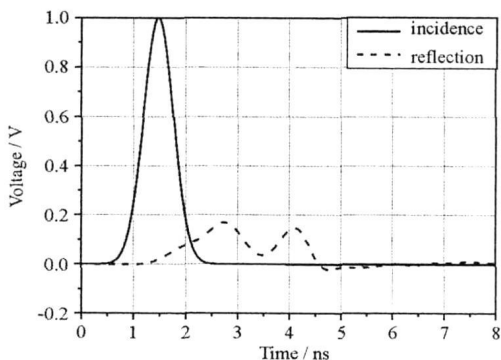
Fig. 4 TEM antenna and array

2 天线的设计与分析

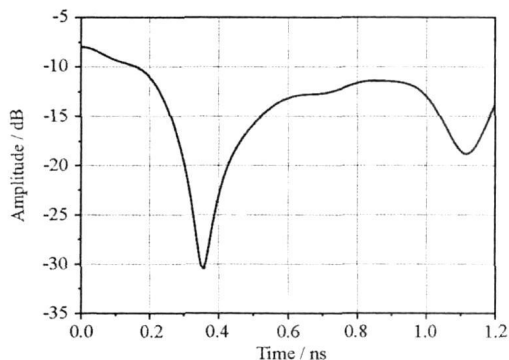
对于UWB的发射天线,目前还没有成熟的设计理论。对某些天线,如双锥天线或TEM喇叭天线,尽管可以用无限长近似等效后得到一些近似公式,但这些公式并不能用来精确描述天线特性,所以采用全波分析FDTD的数值方法来研究超宽带天线。

TEM喇叭天线的基本结构如图4(a)所示,它是由互相间有一张角的两个三角金属板组成,其中 α 为两金属板间夹角, β 为三角板顶角, x 为TEM喇叭天线视轴。实际制作的 2×4 元天线阵如图4(b)所示,巴仑和过渡端密封在尼龙筒中,以提高耐受高压击穿的能力。天线板采用并排的金属杆结构,这样利于架设,可以减小风速。上下两排天线板呈“W”形,中间两排的天线板由于空间的限制做得相对较小,最上一排和最下面一排的天线板做得相对大一些,以增大阵面辐射口径,提高天线增益。天线板和过渡端之间采用活页结构,天线板之间的夹角可以调节,俯仰角度也可以调节。

采用FDTD仿真分析时,天线板采用阶梯网格近似,图5(a)是仿真得到的该天线在 $\alpha = 50^\circ, \beta = 40^\circ, L = 75\text{cm}$ 时的入射波形和反射波形,其中第一个峰是由于巴仑的反射引起的,第二个峰是由天线口径绕射引起的,变换到频域后得到天线的 S_{11} 值如图5(b)所示,可以看出该天线的匹配较好,在 $180 \sim 1200\text{MHz}$ 之间小于 -10dB (VSWR值小于2.0)。



(a) 入射波形和反射波形



(b) S_{11} 仿真值

图5 天线仿真值

Fig. 5 Simulation value of antenna

为了检验所研制的高功率超宽带天线耐高压和辐射性能,我们测试了该天线的辐射波形。图6(a)是GW级高功率纳秒脉冲源的输出波形;图6(b)是正对着高功率天线,在22m远处放置另一超宽带天线,通过60dB衰减后得到的波形。可以看出辐射脉冲大致是源输出波形的时间微分,说明天线内部没有被击穿的地方,能耐受高压,该天线也具有较好的脉冲波形保真性。由于射频干扰的影响,驻波测试只能在暗室进行,而天线灌油后较为笨重,由于操作困难,天线驻波和方向图没有测量。但是从仿真值

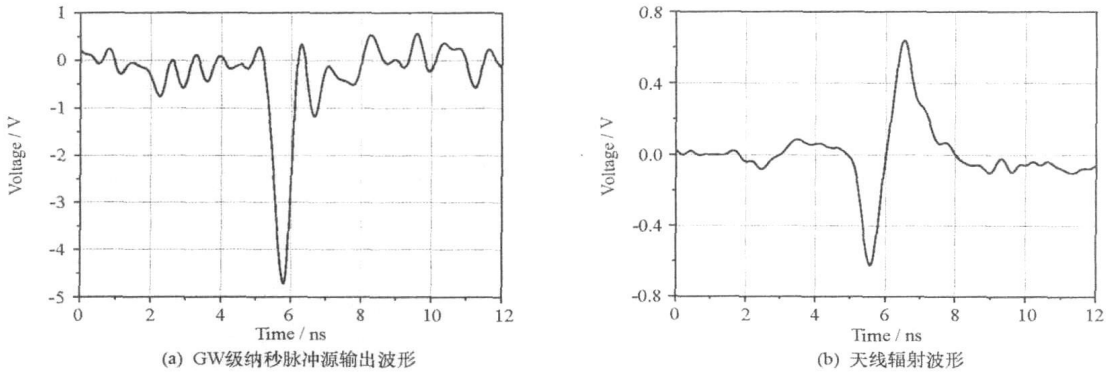


图6 辐射测试

Fig. 6 Measurement of radiation waveform

和辐射场的测量值来看, 该天线的驻波特性和方向性能满足实际应用需要。

3 外场探测实验研究

外场探测实验系统由 GW 级脉冲源、超宽带正交解调接收机、收发天线阵列、高速数字采集卡、同步触发 PCI 卡、主控计算机组成。收发天线空间间隔 5~10m, 构成准单站系统。发射机通过发射天线正对目标发射纳秒级短脉冲, 经过地表及目标反射回接收天线, 接收机通过高速数字采集卡进行实时采样, 后端信号处理由主控计算机完成。同步触发 PCI 卡对发射机、接收机提供适当的触发及延时信号, 使得接收机仅在适当的距离门内进行数据采集和处理, 从而滤除收发直接耦合、窗外地表杂波等, 对接收机进行高功率保护并提高信噪比。为降低采样频率, 接收机采用正交解调方式工作^[7]。

外场由于存在射频干扰、地表反射等干扰, 背景比较复杂, 给目标探测试验带来不利影响, 我们选择如下测试方法: (1) 测量背景信号, 不放置目标, 测试距离窗内回波信号。不考虑射频干扰, 则此信号是窗内杂波信号, 记为 $s_b(t)$ 。(2) 测量背景下目标信号, 放置目标, 测试对应距离门内回波信号, 此信号是窗内杂波与目标回波之和, 其中还包括二者之间的相互干涉作用。不计干涉作用, 设窗内回波信号为目标回波 $s_i(t)$ 与窗内杂波 $s_b(t)$ 的代数和, 记为 $s_{b+i}(t)$, $s_{b+i}(t) = s_b(t) + s_i(t)$, 从而可得目标信号 $s_i(t) = s_{b+i}(t) - s_b(t)$ 。

在外场复杂背景下成功实现了对 100m 远处典型目标的探测, 图 7 是 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 90° 二面角实际探测结果。

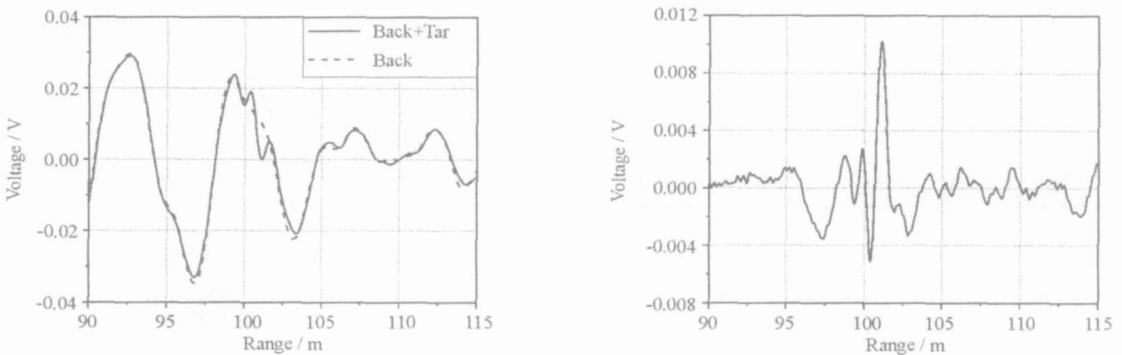


图7 外场源探测结果

Fig. 7 Outdoor measurement result

试验证明, 高功率脉冲源基本可用于目标探测系统, 但是在稳定度方面需改善。纳秒级高功率脉冲源的时基抖动高达微量量级, 导致系统时序混乱, 无法相干积累, 只能利用单次回波进行目标探测, 限制了探测距离的提高, 还得进一步研究。

然后, 用与 4.2 节类似的构造方法, 把与协方差矩阵相乘的矢量 $w(M^2P \times 1 \text{ 维})$, 构造成 $\tilde{w}(4M^2P \times 1 \text{ 维})$, 即有 $\tilde{w} = [w_1^T \ 0^T \ 0^T \ 0^T \ w_2^T \ 0^T \ 0^T \ 0^T \ \dots \ w_{M^2}^T \ 0^T \ 0^T \ 0^T]^T$, 其中 0^T 是元素为 0 的 P 维矢量。最后通过计算大 Toeplitz 矩阵 \tilde{R}_{xx} 与矢量 \tilde{w} 的乘积来求 $R_{xx}W$ 的结果, 所需要的乘法次数将从 $(M^2P)^2$ 次降低为 $8M^2P[3\log_2(16M^2P) + 2]$ 次。表 3 给出了 64 元方阵条件下新方法与原方法在不同时延数条件(高维条件)下乘法计算量的比较, 其中 D 为循环迭代次数, $D = 15$ 。

表 3 均匀方阵条件下高维处理迭代过程乘法计算量比较

Tab. 3 Computation consumption comparison under condition of uniform square array

	$P = 8$	$P = 16$	$P = 32$	$P = 64$	开方运算
已有方法	3 970 725	15 805 605	63 068 325	251 965 605	D
新方法	2 557 485	5 483 565	11 704 365	24 883 245	0

5 结论

GPS 接收机联合空时抗干扰方法, 相比单纯的空域处理和单纯的时域处理优势明显, 但是由于计算复杂, 以致实际的应用受到一定限制。本文针对这一矛盾, 首先在该领域引入基于 CG 的 MSNWF 方法。在此基础上, 通过分析信号协方差矩阵的 Toeplitz 特性, 构造高维 Toeplitz 矩阵, 利用 FFT 技术, 提出一种基于 Toeplitz 特性的 MSNWF 快速实现方法。该方法不仅避免了开方运算(即求矢量的范数), 而且大大加快了信号协方差矩阵矢量乘法的计算速度, 从而使得 GPS 接收机联合空时抗干扰天线阵在自适应滤波过程中能够得以快速地实现。

参考文献:

- [1] 孙晓昶, 皇甫堪, 程彘, 等. GPS 接收机联合空时抗干扰方法[J]. 通信学报, 2003, 24(9): 93-102.
- [2] 陈建文, 王永良, 皇甫堪, 等. 改善机载前向阵雷达全程机载检测性能的研究[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(1): 24-27.
- [3] Goldstein J S, Reed I S, Schaf L L. A Multistage Representation of the Wiener Filter Based on Orthogonal Projections[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(7): 2943-2959.
- [4] 孙晓昶, 皇甫堪, 陈强. 数据分段输入的低秩自适应滤波方法[J]. 信号处理, 2003, 19(4): 373-376.
- [5] 孙晓昶. GPS 接收机联合空时抗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [6] Guido D, Michael D, Zoltowski, et al. Reduced-rank Equalization for EDGE Via Conjugate Gradient Implementation of Multi-stage Nested Wiener Filter[C]//Vehicular Technology Conference, VTC, 2001, 3: 1912-1916.

(上接第 38 页)

4 结论

本文研制出的高功率超宽带天线阵, 能耐高压, 适于工程应用。在高功率源应用于雷达探测方面进行了初步的研究, 外场探测表明高功率脉冲源基本可用于目标探测, 但是在源的稳定度方面需改善。

参考文献:

- [1] Shlager K L, Smith G S, Maloney J G. Optimization of Bow Tie Antennas for Pulse Radiation[J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1994, 42(7): 975-982.
- [2] Shlager K L, Smith G S, Maloney J G. Accurate Analysis of TEM Horn Antennas for Pulse Radiation[J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3): 414-423.
- [3] 刘培国, 刘克成. 加脊喇叭天线的时域分析[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(1): 28-30.
- [4] Simons R N, Dib N I, Lee R Q, et al. Integrated Uniplanar Transition for Linearly Tapered Slot Antenna[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1995, 43(9): 998-1002.
- [5] 顾其铮, 项家桢, 彭孝康. 微波集成电路设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1978.
- [6] Duncan J W, Minerva V P. 100:1 Bandwidth Balun Transformer[C]//Proceedings of IRE, 1960, 9(2): 156-164.
- [7] 张光甫. 瞬态天线及其在超宽带雷达中的应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.