



·高功率微波技术·

高功率超宽带组合天线的设计与实验*

吴昊^{1,2}, 屈劲^{2,3}, 陈世韬^{2,3}, 余川^{2,3}, 刘良^{1,2}, 石小燕^{2,3}

(1. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
3. 中国工程物理研究院 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为满足高功率纳秒脉冲的发射需求, 设计了一种适用于高功率微波的超宽带组合天线, 对比了点馈式巴伦和直馈式巴伦应用于高功率超宽带组合天线后天线的驻波曲线和表面电场分布情况, 分析了组合天线阻抗与尺寸的关系, 利用 Klopfenstein 阻抗渐变线降低反射, 利用可调平板调整天线磁偶极子面积以提升天线低频性能, 并通过驻波测试实验加以验证。在此基础上, 进行了高功率微波实验, 在全底宽 3 ns、峰-峰值 121 kV、中心频率 329 MHz 高功率双极脉冲的激励下, 可实现功率容量 73 MW, 有效电压增益 1.97。

关键词: 高功率微波; 超宽带; 组合天线; 阻抗渐变; 磁偶极子

中图分类号: TN822

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230065

Design and experiment of ultra-wideband combined antenna for high-power microwave

Wu Hao^{1,2}, Qu Jin^{2,3}, Chen Shitao^{2,3}, Yu Chuan^{2,3}, Liu Liang^{1,2}, Shi Xiaoyan^{2,3}

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To meet the requirement of high-power nanosecond pulse emission, an ultra-wideband combined antenna for high-power microwave is designed. Voltage standing wave ratio (VSWR) and electric field distribution of high-power ultra-wideband combined antenna with point-fed balun and tapered-slot balun are compared. The relationship between characteristic impedance and dimensions of the combined antenna is analyzed. Klopfenstein impedance taper is used to reduce reflection. The size of the magnetic dipole is optimized by adjustable plate to improve the low frequency performance of the antenna, and validated by experiment for VSWR testing. On this basis, high-power microwave experiment is performed. With excitation of the high-power bipolar pulse whose bottom width is 3 ns, peak-to-peak value is 121 kV and center frequency is 329 MHz, the power handling capacity of the antenna is 73 MW, effective potential gain is 1.97.

Key words: high-power microwave, ultra-wideband, combined antenna, impedance taper, magnetic dipole

高功率超宽带(HP-UWB)天线是一种连接在脉冲形成线与自由空间波之间的换能装置^[1-2]。作为高功率超宽带系统的重要组成部分,高功率超宽带天线正逐渐成为研究重点。根据已有研究^[3]和应用需求,开发效率高、功率容量大、结构紧凑的高功率超宽带天线已成为当前需要解决的问题。与 TEM 喇叭、抛物面冲击辐射天线、贴片天线等高功率超宽带天线相比,组合天线依靠 TEM 喇叭与磁偶极子的组合,利用电偶极子和磁偶极子的耦合效应,最大程度地抵消了近场感应功率,拥有低频辐射能力强、脉冲保真度好、结构紧凑等优势。但因其馈电结构易被击穿,进而限制了其在高功率超宽带领域的进一步发展。俄罗斯科学院的 Koshelev 团队创新性地将电偶极子和磁偶极子的组合应用于高功率超宽带微波脉冲天线中^[4-5],其组合天线阵列的辐射因子可达 1.7 MV^[6]。中国工程物理研究院应用电子学研究所^[7]、西安理工大学的席晓莉团队^[8-9]、西北核技术研究所的易超龙^[10-11]、西安交通大学的

* 收稿日期:2023-03-29; 修订日期:2023-05-08

基金项目:高功率微波重点实验室基金项目(61426050303-2)

联系方式:吴昊, wuhao@ieec.org。

通信作者:余川, yuchuan@263.net。

王绍飞和谢彦召^[12-13]等单位 and 学者均对组合天线进行了更加深入的研究,但上述研究中均使用了点馈式巴伦为组合天线馈电,这种结构易于设计和制造,但在高功率应用下电场集中在巴伦边缘和 TEM 喇叭上板附近,进而引起介质击穿产生放电,降低了天线的功率容量。为解决这一问题,将组合天线更好地应用于高功率微波领域,本文采用了直馈式巴伦为组合天线馈电。另外,为降低反射,同时提高天线低频性能,本文采用优化后的 Klopfenstein 渐变线匹配天线口径处的特征阻抗与输入阻抗,并利用可调平板调整天线磁偶极子的面积。在此基础上,本文测量了高功率超宽带组合天线的驻波,并进行了高功率微波实验。

1 天线设计

1.1 渐变线设计

高功率超宽带组合天线的整体结构如图 1 所示,其中 TEM 喇叭部分要实现从馈线到自由空间的阻抗变换以减小反射,提高带宽和辐射效率。TEM 喇叭的结构如图 2 所示, L 为天线长度, W 和 H 分别为口径处的宽度和高度, h_0 为馈线处巴伦到 TEM 喇叭下板的距离。根据设计要求,本次设计中取 $L = W = H = 300$ mm。TEM 喇叭的上板宽度 $w(l)$ 和上下板间距 $h(l)$ 为 l 的函数。为了提高组合天线的带宽, $h(l)$ 取指数函数形式^[14]

$$h(l) = h_0 e^{\frac{l}{L} \ln(H/h_0)} \quad (1)$$

TEM 喇叭 l 处的截面与微带传输线类似,其特征阻抗可使用微带线的等效几何结构计算^[15]。当已知特征阻抗的分布 $Z(l)$ 时,则可反推出 $w(l)$ 和 $h(l)$ 的比例

$$\frac{w(l)}{h(l)} = \begin{cases} \frac{4e^A}{e^{2A} - 2}, & \frac{w(l)}{h(l)} < 1 \\ \frac{1}{\pi} [B - 1 - \ln(2B - 1)], & \frac{w(l)}{h(l)} \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$A = \frac{Z(l)}{120}, \quad B = \frac{120\pi^2}{Z(l)} \quad (3)$$

之前的研究^[16]表明,当 $Z(l)$ 采用 Klopfenstein 渐变时,高功率超宽带组合天线的反射更小,性能更优。Klopfenstein 渐变线特征阻抗随长度分布的对数为

$$\ln Z(l) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{\Gamma_0}{\cosh(a)} a^2 \phi(2l/L - 1, a), \quad 0 < l < L \quad (4)$$

其中

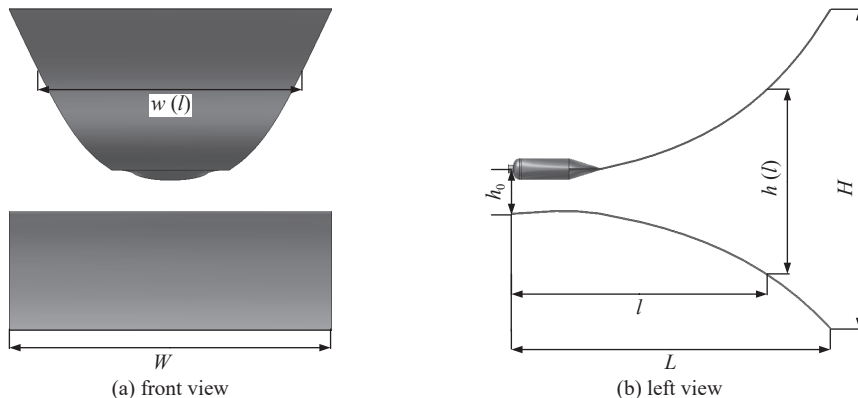


Fig. 2 Sketch of the TEM horn part of the HP-UWB combined antenna

图 2 高功率超宽带组合天线 TEM 喇叭部分结构图

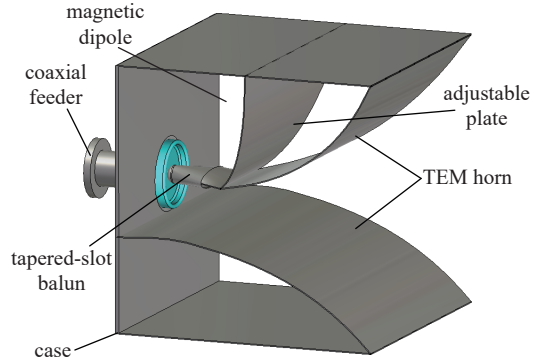


Fig. 1 Photograph of the HP-UWB combined antenna

图 1 高功率超宽带组合天线结构图

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad a = \operatorname{arccosh}\left(\frac{\Gamma_0}{\Gamma_m}\right), \quad \phi(x, a) = \int_0^x \frac{I_1(a\sqrt{1-t^2})}{a\sqrt{1-t^2}} dt, \quad |x| \leq 1 \quad (5)$$

式中： Z_0 和 Z_L 分别为渐变线两端的阻抗， Γ_m 为通带内最大纹波， $I_1(x)$ 为修正 Bessel 函数。结合上述公式即可得到高功率超宽带组合天线 TEM 喇叭部分的结构尺寸。

1.2 提高功率容量

目前常见于组合天线的点馈式巴伦结构易于设计和制造，但当功率容量需求提高后，需增大 TEM 喇叭部分馈线处巴伦到 TEM 喇叭下板的距离 h_0 以避免上下板之间发生击穿。根据式(2)，此时馈线处巴伦的宽度 $w(0)$ 也会随之增大，这导致了 TEM 喇叭在宽度方向上尺寸的突变，易在此处产生电场集中，限制了天线功率容量的提高。为解决该问题，设计了直馈式巴伦，如图 3 所示，其一端与组合天线馈线内导体的尺寸相同，另一端与 TEM 喇叭上板平滑过渡。该结构在 l 方向上连接了馈线和 TEM 喇叭上板，同时在宽度和厚度两个方向上进行过渡渐变以减小结构突变带来的阻抗不匹配。将两种巴伦分别应用于高功率超宽带组合天线后，天线的驻波曲线如图 4 所示。可以看出，使用直馈式巴伦后，组合天线的反射减小。

天线的功率容量可使用下式计算

$$P_c = P_{in}(E_{bt}/E_{max})^2 \quad (6)$$

式中： P_{in} 为输入脉冲峰值功率， E_{bt} 为输入脉冲在介质中的击穿场强阈值， E_{max} 为输入脉冲后天线表面最大场强。根据设计经验和先前实验结果，底宽 3 ns 的双极脉冲在空气中的击穿场强阈值取 10 MV/m。向组合天线馈入该脉冲后，两种巴伦及 TEM 喇叭上板的最大电场分布如图 5 所示，点馈式巴伦结构表面的最大场强为 2674 V/m，直馈式巴伦结构表面的最大场强为 1091 V/m。根据式(6)计算可得，在底宽 3 ns 双极脉冲的激励下，点馈式巴伦结构的组合天线功率容量为 14 MW，直馈式巴伦结构的组合天线功率容量为 84 MW。由此可见，直馈式巴伦结构可以使电场分布更均匀，提高了功率容量。

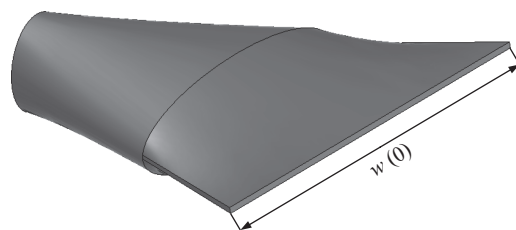


Fig. 3 Sketch of the tapered-slot balun

图 3 直馈式巴伦模型图

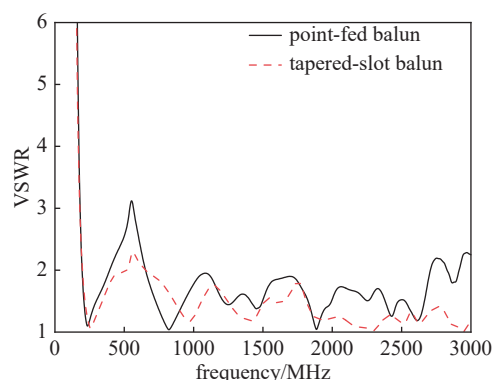


Fig. 4 Comparison of VSWR of HP-UWB combined antennas with different baluns

图 4 使用不同巴伦时高功率超宽带组合天线的驻波曲线

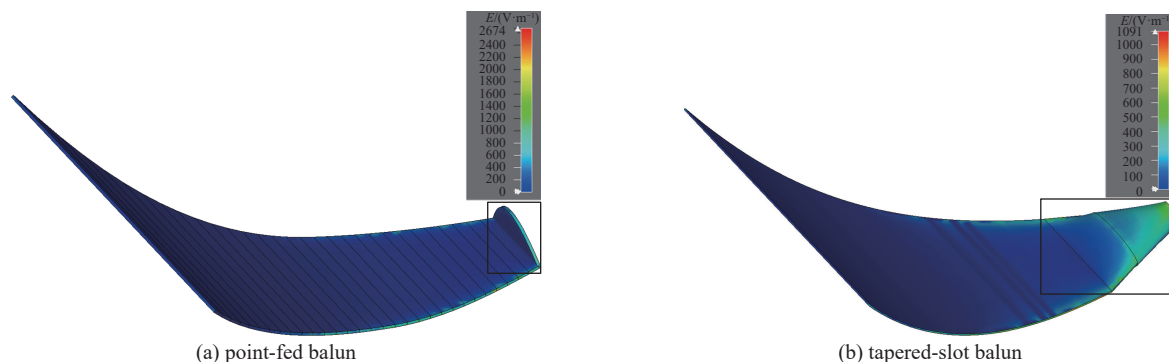


Fig. 5 Electric field distribution of different baluns with upper plate of TEM horn

图 5 不同巴伦及 TEM 喇叭上板的最大电场分布

1.3 低频优化

由于 ns 级脉冲的低频分量占比较高，为了将组合天线更好地应用于高功率纳秒脉冲，需要对当前组合天线的结构加以改进，以提高其低频性能。通过调整可调平板以改变磁偶极子的面积 S ，并记可调平板与上极板重叠时磁偶极子的面积为 S_0 。为保证渐变段的阻抗一致性，令可调平板与 TEM 喇叭上板在天线长度 L 方向上的投影相同。图 6 比较了增加可调平板前后组合天线的驻波曲线。可以看出，增加可调平板并选择恰当的 S/S_0 后天线的低频性

能有了较大改善。

2 驻波测试

为了测试高功率超宽带组合天线的驻波,需设计阻抗变换段以便将其与矢量网络分析仪连接。其一端为连接至天线馈线的法兰,另一端为标准N型接头,结构如图7所示,驻波曲线如图8所示。

在微波暗室内使用经校准矢量网络分析仪对组合天线进行驻波测试,实验平台如图9所示。对比仿真结果与实测结果,如图10所示,可以看出实测结果中,组合天线在203~791 MHz频带内 VSWR 小于 2,百分比带宽为 118%;仿真结果中为 201~1387 MHz,百分比带宽为 149%。实测结果与仿真结果在低频符合较好,但在高频部分产生了纹波,分析该现象可能的原因是阻抗变换段内导体的机械加工误差。

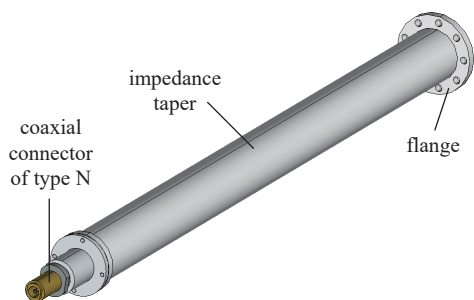


Fig. 7 Sketch of the impedance transformer
图 7 阻抗变换段模型图

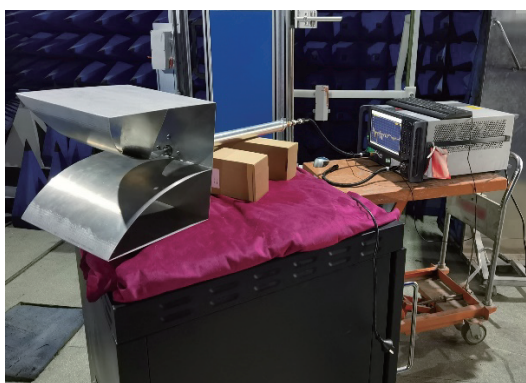


Fig. 9 Experimental platform for VSWR testing
图 9 驻波测试实验平台

3 高功率微波测试

经上述测试,高功率超宽带组合天线的频带已满足高功率超宽带脉冲辐射的需求。高功率源的输出功率可使用下式计算

$$P = \frac{V_{pp}^2}{4R} \quad (7)$$

式中: V_{pp} 为输出脉冲的峰-峰值, R 为输出阻抗。

使用 Marx 发生器和 Blumlein 脉冲形成线产生双极脉冲,并外接匹配负载,经分压器(倍率为 1298)、1 个 30 dB

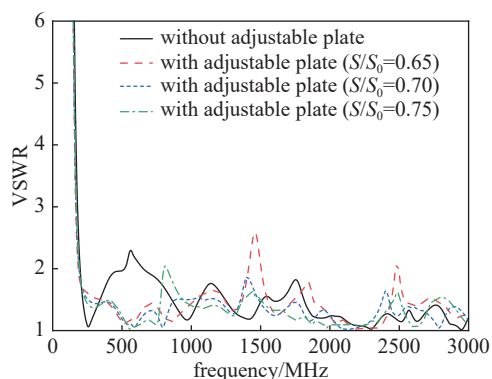


Fig. 6 Comparison of VSWR of HP-UWB combined antennas with different area of magnetic dipole
图 6 不同磁偶极子面积的高功率超宽带组合天线的驻波曲线对比

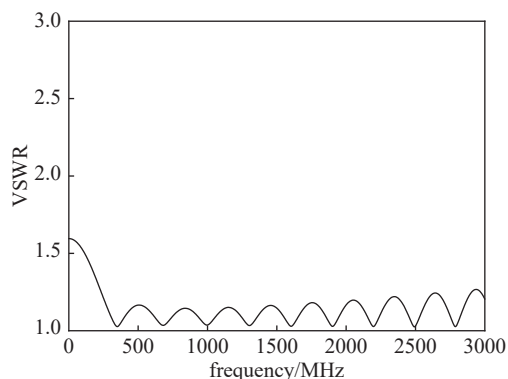


Fig. 8 VSWR of the impedance transformer
图 8 阻抗变换段的驻波曲线

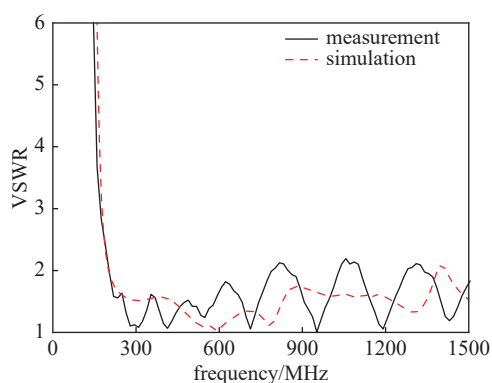


Fig. 10 Measured and simulation results of VSWR of HP-UWB combined antenna
图 10 高功率超宽带组合天线驻波曲线的仿真与实测结果

衰减器(衰减系数为 33.67)和 2 条同轴电缆(衰减系数分别为 1.55 和 1.04)连接至示波器,测得高功率源产生的波形如图 11 所示,其峰-峰值 $V_{pp}=121$ kV,全底宽 $t_{pw}=3$ ns,峰-峰上升沿 $t_{rp}=1.5$ ns。结合高功率源的输出阻抗 $50\ \Omega$ 和式(7)可得该高功率源输出功率约为 73.2 MW。通过频谱分析得到该双极脉冲的归一化频谱,如图 12 所示,其中中心频率为 329 MHz,3 dB 频带为 109~461 MHz,百分比带宽 124%。

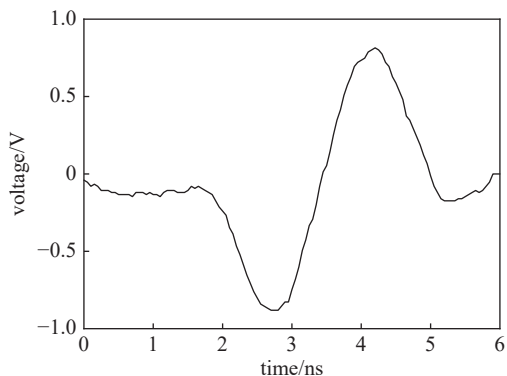


Fig. 11 Waveform of the high-power bipolar pulse for experiment

图 11 实验用高功率双极脉冲波形

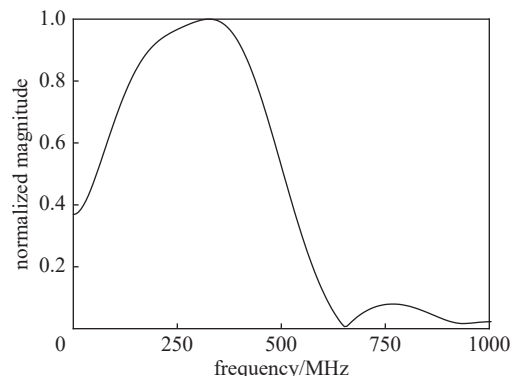


Fig. 12 Normalized spectrum of the high-power bipolar pulse for experiment

图 12 归一化实验用高功率双极脉冲频谱

当高功率超宽带组合天线输入该双极脉冲时,使用有效高度为 0.0148 m 的接收天线测量距离口径 10 m 处的天线辐射场。接收天线通过 2 个 20 dB 衰减器(衰减系数分别为 10.6 和 10.1)和 3 条同轴电缆(衰减系数分别为 1.31、1.55 和 1.04)与示波器连接。在重复频率 20 Hz,连续运行 1 min 期间,取辐射场波形的平均值,如图 13 所示。另对天线模型使用相同双极脉冲激励,并使用远场电压探针探测辐射场,得到仿真结果与之对照。可以看出,与仿真结果相比,实测结果未出现脉宽缩短,可判断天线在运行期间未发生击穿,其功率容量可达 73 MW。对辐射场波形作频谱分析,得到辐射场的归一化频谱,如图 14 所示,其中中心频率为 395 MHz,3 dB 频带为 290~489 MHz,百分比带宽 51%。

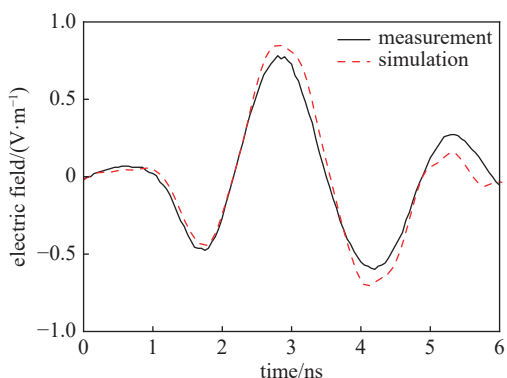


Fig. 13 Waveform of radiation field of the antenna at 10 m

图 13 天线辐射场波形(10 m)

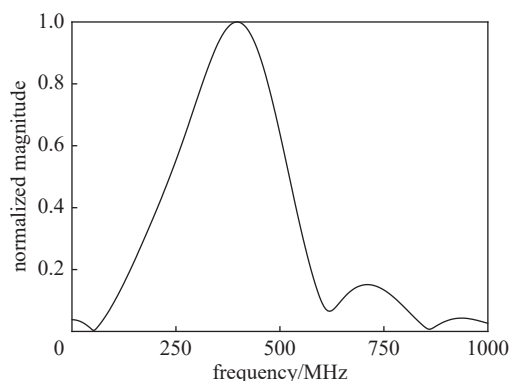


Fig. 14 Normalized spectrum of radiation field of the antenna at 10 m

图 14 天线辐射场归一化频谱(10 m)

超宽带天线的有效电压增益可定义为

$$G_{ep} = \frac{2rE_p}{V_{pp}} \quad (8)$$

式中: E_p 为距天线 r 处辐射场波形的峰值, V_{pp} 为输入波形的峰-峰值。计算可得高功率超宽带组合天线的 G_{ep} 为 1.97。

4 结论

本文设计了一种采用直馈式巴伦的高功率超宽带组合天线,利用优化后的 Klopfenstein 阻抗渐变线设计 TEM 喇叭的结构以降低反射,并通过可调平板调节组合天线磁偶极子的面积以提高低频性能。与使用点馈式巴伦的组合天线相比,采用直馈式巴伦的组合天线避免了电场集中引起的介质击穿,功率容量提升了 6 倍。在此基

基础上,本文测试了该天线在全底宽 3 ns, 峰-峰值 121 kV, 中心频率 329 MHz 的高功率双极脉冲下的性能, 天线功率容量可达 73 MW, 有效电压增益 $G_{ep}=1.97$ 。后续可通过高功率超宽带组合天线进行组阵, 并对单元横纵向间距等参数进行优化, 以实现更高的有效电压增益。

参考文献:

- [1] Kraus J D, Marhefka R J. Antennas for all applications[M]. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2008.
- [2] Smith P D, Cloude S R. Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics, 5[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2002.
- [3] 徐刚, 陆巍, 丁恩燕, 等. 紧凑型宽谱高功率微波辐射器仿真设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 043001. (Xu Gang, Lu Wei, Ding Enyan, et al. Simulation design of an compact mesoband high power microwave radiator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 043001)
- [4] Koshelev V I, Buyanov Y I, Koval'chuk B M, et al. High-power ultrawideband electromagnetic pulse radiation[C]//Proceedings of the SPIE 3158, Intense Microwave Pulses V. 1997.
- [5] Andreev Y A, Buyanov Y I, Efremov A M, et al. Gigawatt-power-level ultrawideband radiation generator[C]//Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 99CH36358). 1999: 1337-1340.
- [6] Gubanov V P, Efremov A M, Koshelev V I, et al. Sources of high-power ultrawideband radiation pulses with a single antenna and a multielement array[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, 48(3): 312-320.
- [7] 周海京, 丁武, 孟凡宝, 等. 新型超宽带短脉冲天线的设计[C]//中国工程物理研究院科技年报(2001). 2001: 228-229. (Zhou Haijing, Ding Wu, Meng Fanbao, et al. Design of a new type of ultra-wideband short-pulse antenna[C]//Annual Report of China Academy of Engineering Physics (2001). 2001: 228-229)
- [8] 席晓莉, 原艳宁, 易超龙, 等. 电-磁振子组合型超宽带天线数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(1): 103-106. (Xi Xiaoli, Yuan Yanning, Yi Chaolong, et al. Numerical analysis of electric-magnetic vibrator combined ultrawideband antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 103-106)
- [9] 原艳宁, 席晓莉, 樊亚军. 不同渐变方式的喇叭结构对电-磁振子组合型超宽带天线特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(6): 971-974. (Yuan Yanning, Xi Xiaoli, Fan Yajun. Influence of horn structure on electric-magnetic vibrator combined UWB antenna characteristic[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6): 971-974)
- [10] 易超龙, 朱四桃, 樊亚军, 等. 超宽带天线辐射中心的时域测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1312-1314. (Yi Chaolong, Zhu Sitao, Fan Yajun, et al. Time-domain method of determining radiation centers of ultra wideband antennas[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(5): 1312-1314)
- [11] 易超龙, 樊亚军, 袁雪林, 等. 一种新型超宽带喇叭阵列天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(3): 409-412. (Yi Chaolong, Fan Yajun, Yuan Xuelin, et al. A novel compact Ultra Wide-Band horn array[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(3): 409-412)
- [12] Wang Shaofei, Xie Yanzhao. Design and optimization of high-power UWB combined antenna based on Klopfenstein impedance taper[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6960-6967.
- [13] Wang Shaofei, Xie Yanzhao, Gao Mingxiang, et al. Optimizing high-power ultra-wideband combined antennas for maximum radiation within finite aperture area[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(2): 834-842.
- [14] Wu Jiangniu, Zhao Zhiqin, Nie Zaiping, et al. A printed UWB vivaldi antenna using stepped connection structure between slotline and tapered patches[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 698-701.
- [15] Pozar D M. Microwave engineering[M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 2011.
- [16] Wu Hao, Yu Chuan. Design and simulation of ultra-wideband combined antenna for high-power microwave[C]//2022 IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE). 2022: 203-207.