



·高功率微波技术·

# 一种紧凑型宽带高功率微波源设计与测试研究\*

张 帆<sup>1,2</sup>, 田 川<sup>1</sup>, 马世川<sup>1</sup>, 解江远<sup>1</sup>, 金兆鑫<sup>1</sup>, 荆晓鹏<sup>1</sup>

(1. 西安电子工程研究所, 西安 710100; 2. 西北工业大学, 西安 710072)

**摘 要:** 设计了一款体积紧凑、工作在特高频波段的宽带高功率微波源, 系统利用 24 V 蓄电池供电, Marx 发生器作为驱动源, 采用四分之一波长开关振荡器调制产生宽带电磁脉冲, 激励高功率微带平板天线辐射, 测试结果显示系统工作中心频率为 425 MHz, 远场辐射场强-距离积峰峰值为 91.5 kV@1 m, 该微波源体积尺寸为 871 mm×370 mm×330 mm, 含电池质量小于 43 kg, 拓展了宽带高功率微波技术在无人机、机器人等平台的应用前景。

**关键词:** 宽带高功率微波; Marx 发生器; 微带天线; 开关振荡器

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220125

## Design and test of a compact wideband high power microwave source

Zhang Fan<sup>1,2</sup>, Tian Chuan<sup>1</sup>, Ma Shichuan<sup>1</sup>, Xie Jiangyuan<sup>1</sup>, Jin Zhaoxin<sup>1</sup>, Jing Xiaopeng<sup>1</sup>

(1. Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Wideband high power microwave is one of the main development directions of high power microwave in recent years. A wideband high power microwave system with small volume, working in UHF band is developed. The system powered by a 24V battery uses a Marx generator as the driving source. The wideband high power microwave is generated with a quarter wavelength switching oscillator and radiated with a high power microstrip flat plate antenna. The electromagnetic simulation model is established and the key factors are simulated and calculated. The test results show that the center frequency of the wideband high power microwave is 425 MHz, and the peak-to-peak value of the electric field radiation factor is 92kV@1m. The radiation waveform is basically consistent with the simulation results. The application prospect of wideband high power microwave in drone, robot and other platforms is expanded.

**Key words:** wideband high power microwave, Marx generator, microstrip antenna, switching oscillator

宽带高功率微波(HPM)是一种介于超宽带高功率微波和窄带高功率微波之间的高功率电磁脉冲形式<sup>[1]</sup>, 参照国际标准的 IEC61000-2-13 定义, 宽带高功率微波的辐射信号百分比带宽范围为 1%~25%, 典型的时域电场波形是持续一段时间的阻尼振荡脉冲。宽带高功率微波兼顾了超宽带频谱覆盖范围宽和窄带高功率微波功率谱密度高的特点, 在一定频段范围内能够对典型电子设备目标产生显著的电磁辐射效应, 所以在车辆拒止、扫雷排爆以及电磁防护研究等领域具有一定的应用潜力, 成为国内外高功率微波领域的一个重要研究方向<sup>[2-4]</sup>, 例如德国 DIEHL 公司研发的 Standard F 型手提箱式电磁脉冲模拟器<sup>[5]</sup>, 工作中心频率 350 MHz, 不含供电系统总质量仅 32 kg, 远场辐射场强-距离积峰峰值约为 100 kV@1 m, 应用于宽带强电磁脉冲效应研究。根据研究需要, 本文设计研制一款体积紧凑、工作在特高频(UHF)波段、远场辐射场强-距离积峰峰值大于 80 kV@1m 的高功率微波辐射系统。

### 1 紧凑型宽带高功率微波源设计及仿真

宽带高功率微波产生可采用 LC 振荡方式, 直接激励天线产生电磁波, 该方式不会产生相对论电子束和射线, 而且减少了二极管中间环节, 结构简单, 更容易做到小型化<sup>[6-8]</sup>, 所以设计了一款宽带高功率微波技术体制的辐射系统, 系统组成如图 1 所示, 主要由控制终端、24 V 电池、高压直流电源、Marx 发生器、脉冲调制器和高功率宽带天线部分组成, 系统工作过程如下: 蓄电池供电后设备进入待机发射状态, 微波发射指令通过光缆进入高压电源,

\* 收稿日期: 2022-04-26; 修订日期: 2022-06-23  
联系方式: 张 帆, qizhou171@163.com.

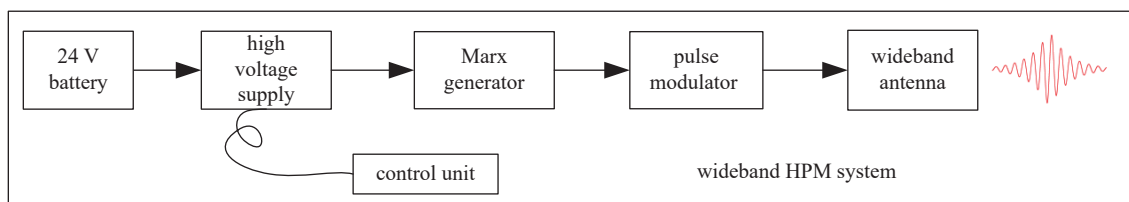


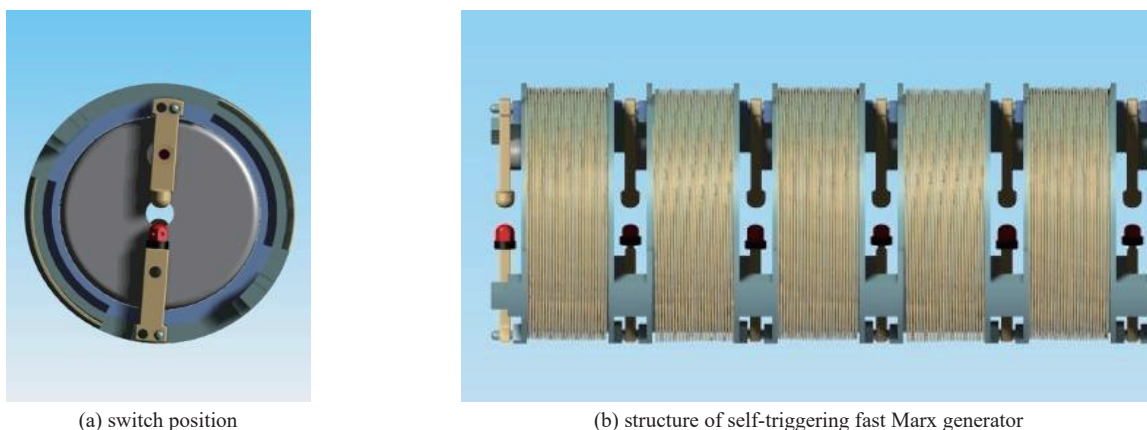
Fig. 1 System diagram of the compact wideband HPM source

图 1 紧凑型宽带高功率微波源系统框图

接收到发射指令后, 高压电源将电池的 24 V 低压转化为数十 kV 高压, 对 Marx 发生器的储能电容进行充电, 到达发生器前级开关自击穿电压后, 发生器开关一致导通, 输出数百 kV 的高压脉冲, 该脉冲经过调制器进行高频脉冲整形, 随后激励宽带天线向自由空间辐射。

### 1.1 驱动源设计

驱动源是产生高功率微波的动力来源, 不仅要求输出电压幅值达数百 kV, 而且体积紧凑, 采用自击穿式快前沿 Marx 发生器设计, 发生器的结构设计非常关键<sup>[9-10]</sup>, 直接影响其输出脉冲前沿, 设计采用同轴结构, 如图 2 所示, 该结构不仅减小了回路电感, 而且所有气体开关置于同一条光路上, 前一级开关放电时能够对后级开关产生紫外预电离效果, 提高了多级气体火花开关运行的稳定性, 同时为了保证系统脉冲重复频率, 采用电感隔离设计。上述设计使得 Marx 发生器具备了模块化能力, 安装简便, 可根据需求增减发生器的级数, 输出电压可控。



(a) switch position

(b) structure of self-triggering fast Marx generator

Fig. 2 Switch position and structure of self-triggering fast Marx generator

图 2 开关位置和自触发式快前沿 Marx 发生器结构示意图

设计 Marx 发生器级数为 8 级, 发生器单级电容工作电压范围为 25~35 kV, 电容采用定制小体积穿孔高压陶瓷电容, 每级电容值为 1.6 nF, 该电容的最高直流耐压可达 80 kV, 利用上述电路设计参数进行发生器全电路仿真, 仿真结果如图 3 所示, 当发生器每级电容充电 30 kV 时, Marx 发生器输出电压峰值可达 220 kV。

### 1.2 天线设计

高功率微波源天线的峰值功率可达数 GW<sup>[11-12]</sup>, 喇叭天线是一种常见的高功率发射天线, 但是体积尺寸较大, 无法达到紧凑型设计要求, 微带贴片天线是一种基于传输线辐射理论的行波天线, 具有剖面低、体积小、易于与载体共形等特点, 但是本系统天线工作频率较低, 峰值发射功率极大, 传统的光刻基板贴片天线不再适用, 本系统采用一种单层矩形微带高功率容量天线<sup>[13]</sup>, 为了实现高功率, 传输介质将采用具备电负性特点的六氟化硫绝缘气体代替, 微带贴片采用大尺寸金属平板代替, 天线结构设计尺寸 370 mm×330 mm×60 mm, 天线在瞬态电磁仿真软件中计算, 其  $S_{11}$  参数、中心频率三维辐射方向图以及内部电场分布仿真计算结果如图 4 所示, 可见天线在工作频点反射系数低于 -25 dB, 辐射波束聚焦效果较好, 电场分布计算结果表明传输线及天线馈电巴伦处的电场强度较大, 所以在绝缘结构设计中应该重视。

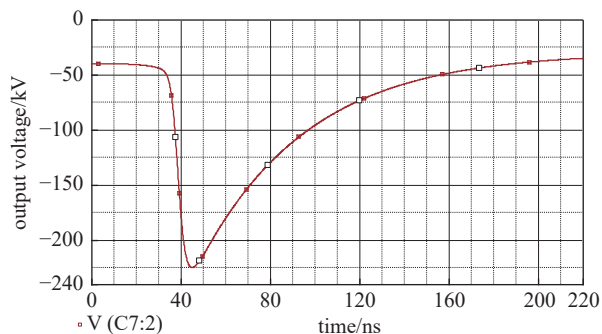


Fig. 3 Simulation waveform of the Marx generator

图 3 Marx 发生器电路仿真输出波形

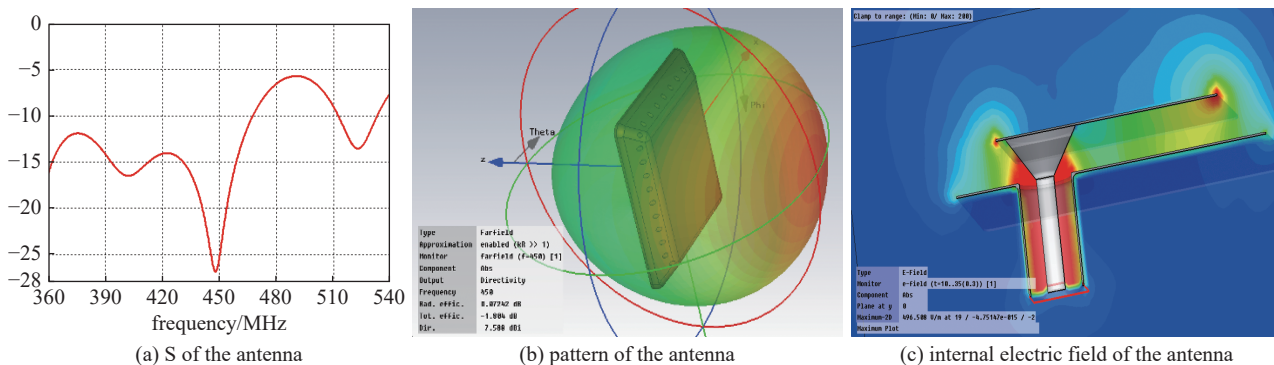


Fig. 4 S11, pattern and internal electric field of the high power microstrip antenna

图4 高功率微带平板天线 S11 参数、方向图及内部电场仿真结果

天线需要馈入指定工作频段内的电磁脉冲才能有效辐射宽带高功率微波，而衰减振荡的宽带电磁脉冲是理想的天线激励信号，本系统脉冲调制器采用四分之一波长开关振荡器，该设计理念由美国科学家 C.E.Baum 提出<sup>[14]</sup>，开关振荡器与天线失配工作的电路原理如图 5 所示，驱动源首先对传输线充电，然后对地 Chopping 开关导通，产生阶跃脉冲往天线方向传播，如果传输线与天线负载之间存在很强的失配关系，那么激励脉冲在负载正反射和短路开关的负反射之间来回反射形成谐振，同时天线向外辐射能量，传输线的长度决定了谐振脉冲的频率，约为谐振频率对应波长的 1/4。

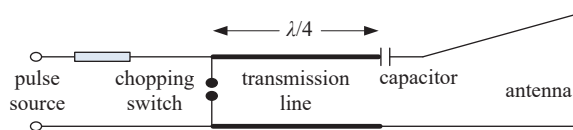


Fig. 5 Schematic diagram of the  $\lambda/4$  switching oscillator with mismatched antenna

图5 四分之一波长开关谐振器与天线失配工作电路原理图

传统的开关振荡器一般利用低阻抗传输线和高阻天线负载达到阻抗明显失配目标<sup>[15-16]</sup>，低阻传输线的阻抗通常设计为  $\Omega$ ，内外导体间的距离只有几 mm，实际应用中加工和安装精度要求很高，本系统采用 Chopping 开关和耦合电容器的脉冲调制方案，具体结构如图 6 所示，环形 Chopping 开关设置在锥形过渡段之后，开关采用锯齿状设计，提高多通道放电概率，降低开关电感，传输线末端与天线并未直接相连，而是采用高分子材料构建了集总电容，天线只能通过该电容耦合高频分量，天线的功率容量设计压力也会减小。

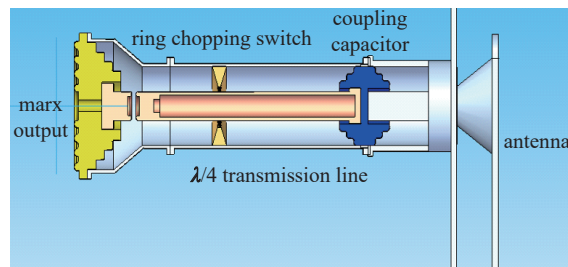


Fig. 6 Structure of wideband pulse modulator based on ring chopping switch and coupling capacitor

图6 基于环形短路开关和耦合电容器的宽带脉冲调制器结构示意图

根据四分之一波长开关振荡器设计理论，为了调制中心频率 450 MHz 的宽谱电磁脉冲，当采用  $SF_6$  作为绝缘介质时设计传输线长度约为 167 mm。为了验证上述设计，建立电路仿真模型如图 7 所示，传输线长度设置为 0.55 ns，

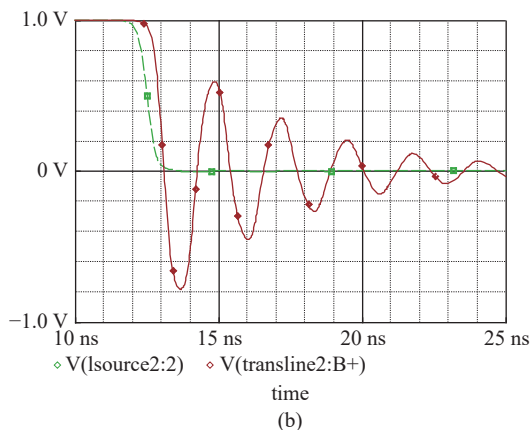
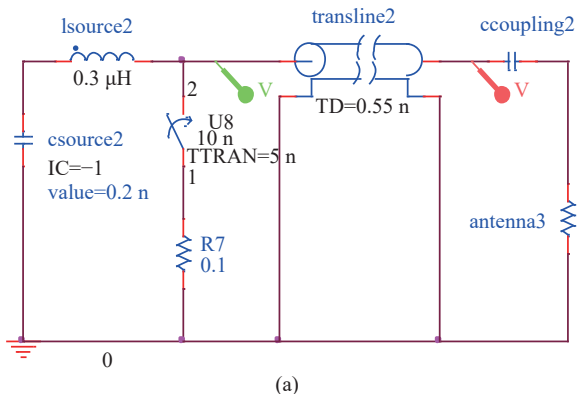


Fig. 7 Simulation model and results of the  $\lambda/4$  switching oscillator

图7 1/4 波长开关振荡器电路仿真模型及计算结果

驱动源充电采用电容模拟,初始时刻传输线充电 1 V,模拟气体开关的短路开关设置在 10 ns 时导通,计算过程对传输线的输入和输出端电压实时监测,仿真计算结果显示在耦合电容的前端得到了衰减振荡波形,波形振荡周期约为 2.2 ns。

按照上述设计,完成了宽带高功率辐射系统的结构设计和加工,宽带高功率微波源整体结构如图 8 所示,其中宽谱平板发射天线置于前端,非金属透波天线罩体内部填充高压绝缘气体,脉冲调制器位于天线和脉冲驱动源中间,考虑结构受力因素,脉冲调制器利用三角支撑支架固定在底座上方,驱动源 Marx 发生器采用卡箍固定在电源顶部,电源和供电单元采用金属屏蔽箱保护,防止雨水和灰尘影响设备工作状态。经测量,本宽带高功率微波辐射系统的实际空间尺寸为 871 mm(长)×370 mm(宽)×330 mm(高),含储能电池系统的总质量为 42.4 kg。

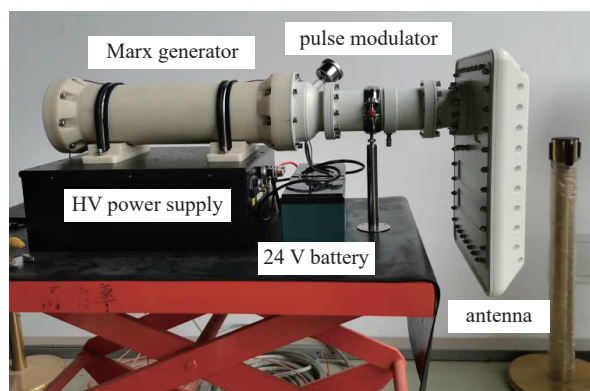


Fig. 8 The compact wideband HPM source

图 8 紧凑型宽带高功率微波源

## 2 紧凑型宽带高功率微波源试验测试

系统组装完成后,对高功率微波源系统的工作频段和远场辐射场强-距离积等关键指标进行测试,测试依据 GJB8218-2014 进行测试,测试现场布局如图 9 所示,首先将系统架设一定高度,减少地面反射对输出指标的影响,然后将接收 TEM 喇叭天线置于系统辐射轴线的指定距离处(主机与接收天线满足远场条件,本测试设定距离为 5 m),接收的微波信号经双屏蔽测试微波电缆以及多级衰减器后送入屏蔽室内的数字示波器测量通道,同时对  $\lambda/4$  开关振荡器内部的电压波形进行测量。

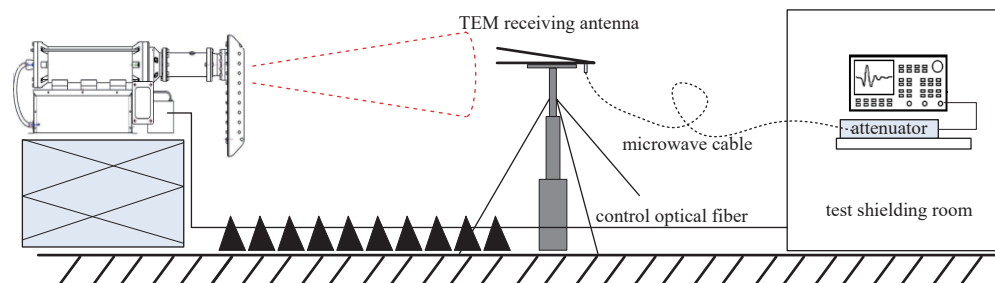


Fig. 9 Test layout for main parameters of high power microwave source

图 9 高功率微波源主要指标测试布局示意图

宽带高功率微波源测试现场如图 10 所示,Marx 发生器充电电压 27 kV,利用两台示波器分别监测输出电场和  $\lambda/4$  开关振荡器内部的电压波形,对测试波形放大,图(b)为开关振荡器工作电压波形,可见电压幅值初始快速上升,在经过 Chopping 开关对地短路后电压迅速归零并产生显著振荡,波形趋势与仿真结果完全吻合,而且通过调整开关距离耦合电容的距离时,振荡周期发生了明显变化,图(a)为辐射电场时域波形,可见是典型的宽带阻尼振荡波形,脉宽(半高宽)约为 8 ns,经过 FFT 处理后中心频率为 425 MHz,该数值小于设计值 450 MHz,这是由于耦合

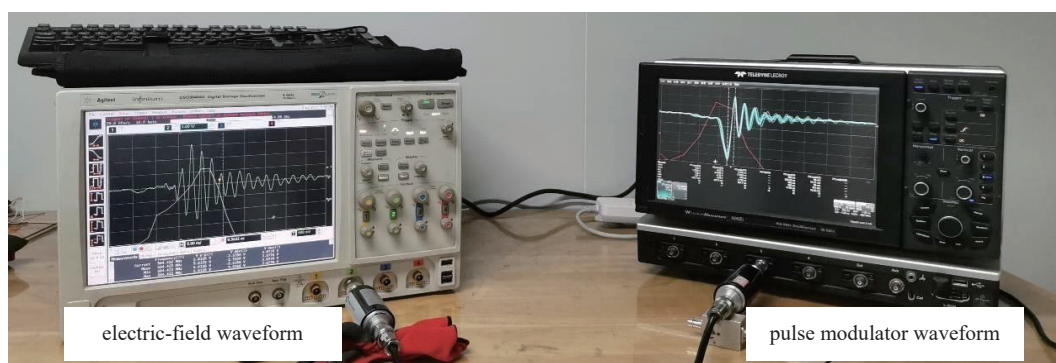


Fig. 10 Waveforms of the wideband high power microwave source

图 10 宽带高功率辐射源测试波形

电容器的存在增加了四分之一波长传输线的长度,从而导致开关振荡器的输出频率略低,经过标定,测试线缆和衰减器回路总衰减为 36.9 dB,结合 TEM 喇叭天线有效接收高度计算得到 5 m 处的电场峰峰值为 18.3 kV/m,则系统的远场辐射场强-距离积峰峰值为 91.5 kV@1 m,满足设计指标要求。

### 3 结 论

本文简要阐述了宽带高功率微波的标准定义,并且对其技术特征进行了分析,在此基础上设计了一种紧凑宽带高功率微波源,系统利用 24 V 蓄电池供电,采用四分之一波长开关振荡器调制产生宽带电磁脉冲,激励高功率微带平板天线辐射,测试结果显示系统工作中心频率为 425 MHz,远场辐射场强-距离积峰峰值为 91.5 kV@1 m,该微波源体积尺寸为 871 mm×370 mm×330 mm,含电池重量仅为 43 kg,测试显示微波源的输出能力还有提升空间,下一步需要优化调制器内部结构设计,通过增加充气压力来提升输出场强,未来可将该系统搭载在无人机、机器人等小尺寸平台上实现车辆迫停、扫雷排爆等应用。

### 参考文献:

- [1] Prather W D, Baum C E, Torres R J, et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 335-344.
- [2] HPEM car stop non-violent system for selective stopping of vehicles in dynamic scenarios[R]. Diehl-JC-2011.
- [3] 阮存军, 刘濮鲲, 高怀林. 高功率微波定向能车辆阻停系统的技术发展及应用[J]. *微波学报*, 2010, 26(s1): 712-716. (Ruan Cunjun, Liu Pukun, Gao Huailin. The development and applications of directed energy vehicle stopper system with high power microwave[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(s1): 712-716)
- [4] Giri D V. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications[M]. Cambridge: Harvard University Press, 2004: 117-136.
- [5] HPEM car stop non-violent system for selective stopping of vehicles in dynamic scenarios[P].
- [6] Lawrance J, Baum C E, Prather W D, et al. High-power mesoband sources[C]//Proceedings of ICEEA. 2005.
- [7] Fan Yajun, Liu Guozhi, Liu Xiaolong, et al. A compact subnanosecond pulse generator[C]//Proceedings of the 1st Euro-Asian Pulsed Power Conference. 2006: 246-248.
- [8] Lee J M, Kwon H O, Hwang S M, et al. Design of a damped sinusoidal oscillator system[C]//Proceedings of 2011 IEEE Pulsed Power Conference. 2011: 414-419.
- [9] 王嘉煜, 何鹏军, 闫自让, 等. Marx发生器开关击穿特性研究[J]. *火控雷达技术*, 2014, 43(3): 79-82. (Wang Jiayu, He Pengjun, Yan Zirang, et al. Research on switch breakdown characteristic of Marx generator[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2014, 43(3): 79-82)
- [10] 吴朝阳, 张现福, 张晋琪, 等. 14级紧凑型重复频率Marx发生器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(s1): 169-172. (Wu Zhaoyang, Zhang Xianfu, Zhang Jinqi, et al. Development of 14-staged compact and repetitive Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(s1): 169-172)
- [11] Hong K D, Braidwood S W. Resonant antenna-source system for generation of high-power wideband pulses[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(5): 1705-1711.
- [12] 孟凡宝, 杨周炳, 吴文涛, 等. 高功率超宽带同轴双锥天线的设计和实验[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(2): 245-247. (Meng Fanbao, Yang Zhoubing, Wu Wentao, et al. Design and experiment of high power ultra wide band coaxial biconical antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(2): 245-247)
- [13] 徐刚, 廖勇, 谢平, 等. 宽带高功率贴片天线优化设计与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(10): 2388-2392. (Xu Gang, Liao Yong, Xie Ping, et al. Optimal design and experiment on high power wideband patch antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(10): 2388-2392)
- [14] Giri D V, Tesche F M, Abdalla M D, et al. Switched oscillators and their integration into helical antennas[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(6): 1411-1426.
- [15] 廖勇, 谢平, 徐刚, 等. 高功率宽谱开关振荡器[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 998-1002. (Liao Yong, Xie Ping, Xu Gang, et al. High power wideband switched oscillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 998-1002)
- [16] Andreev Y A, Efmov A M, Koshelev V I, et al. A source of high-power pulses of elliptically polarized ultrawideband radiation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 104703.