

文章编号: 2095-4980(2021)03-0453-05

一种电磁脉冲辐射系统设计

李强兵, 刘 丹

(中国航空工业集团公司 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333000)

摘 要: 提出一种电磁脉冲辐射系统设计方案, 此系统由 Marx 发生器、短路-锐化组合开关型脉冲形成线和带低频补偿的高功率超宽带横向电磁波(TEM)喇叭天线组成。Marx 发生器产生的单极脉冲经过短路-锐化组合开关型脉冲形成线锐化成双极脉冲, 然后馈入天线进行辐射。仿真结果表明, 在充电电压为 10 kV 时, 电磁脉冲源可产生脉冲宽度 1.41 ns、峰值功率 7.69 MW 的双极脉冲, 此双极脉冲频谱主要分布在 0~1.6 GHz 频率范围内; 高功率超宽带 TEM 喇叭天线带宽为 0.625~2.9 GHz(相对带宽为 129%), 功率容量可达 10 MW, 能有效地将电磁脉冲源产生的双极脉冲辐射出去。

关键词: 电磁脉冲; Marx 发生器; 短路-锐化组合开关型脉冲形成线; 高功率超宽带 TEM 喇叭天线

中图分类号: TN784

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019344

A design of electromagnetic pulse radiation system

LI Qiangbing, LIU Dan

(China Helicopter Research and Development Institute, Aviation Industry Corporation of China, Jingdezhen Jiangxi 333000, China)

Abstract: A design scheme of electromagnetic pulse radiation system is proposed. The system consists of a Marx generator, a chopping-peaking combination switch pulse forming line and a high-power ultra-wideband Transverse Electro-Magnetic(TEM) wave horn antenna with low-frequency compensation. The unipolar pulse generated by the Marx generator is formed into bipolar pulse by the chopping-peaking combination switch pulse forming line, and then fed into the antenna for radiation. The simulation results show that the electromagnetic pulse source can generate bipolar pulse with pulse width of 1.41 ns and peak power of 7.69 MW when the charging voltage is 10 kV. This bipolar pulse spectrum is mainly distributed in the frequency range of 0~1.6 GHz. The antenna bandwidth of high-power ultra-wideband TEM horn antenna is 0.625~2.9 GHz(the relative bandwidth is 129%) and the power capacity of the antenna can achieve 10 MW, which can effectively radiate bipolar pulses generated by electromagnetic pulse source.

Keywords: electromagnetic pulse; Marx generator; chopping-peaking combination switch pulse forming line; high-power ultra-wideband TEM horn antenna

高功率超宽带电磁脉冲技术是正在发展中的前沿研究领域之一, 已在目标识别、目标探测、医学等民用领域得到广泛应用, 在超宽带冲击雷达、电子干扰、微波武器等军事领域也有着十分重要的应用潜能^[1]。近年来, 高功率超宽带脉冲技术在国内外都取得了长足发展^[2-8]。中国工程物理研究院张晋琪等研制了我国首套宽谱电磁脉冲辐射系统^[9], 其辐射电场的中心频率为 200 MHz, 测试时, 在离辐射天线 6 m 处辐射电场的最大值可达 32.5 kV/m; 德国 DIEHL Munitionssysteme 公司生产的 DS110 电磁脉冲辐射系统^[10], 其辐射电场的中心频率为 375 MHz, 辐射峰值功率为 250 MW, 在距离辐射点 1 m 处的峰值场强为 125 kV/m; 俄罗斯 KOVALCHUK B M 等研制的脉冲辐射源^[11], 其产生的峰-峰值电压为 120 kV 的双极脉冲经频带为 0.2~2 GHz 的天线进行辐射, 在距离辐射天线 4 m 处测得辐射场强的最大值为 34 kV/m。

收稿日期: 2019-09-15; 修回日期: 2020-04-07

作者简介: 李强兵(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为从事直升机电磁兼容设计与研究。email:zichuansanjie@126.com

本文提出了一种电磁脉冲辐射系统设计方案，此系统由 Marx 发生器、短路-锐化组合开关型脉冲形成线和带低频补偿的高功率超宽带横向电磁波(TEM)喇叭天线组成。Marx 发生器产生的单极脉冲经短路-锐化组合开关型脉冲形成线锐化压缩形成双极脉冲，最后通过带低频补偿的高功率超宽带横向电磁波(TEM)喇叭天线进行辐射；同时为了实现短路-锐化组合开关型脉冲形成线与辐射天线间的匹配，对其进行了 $50\ \Omega$ 同轴化设计，并通过在辐射天线同轴馈电端填充尼龙以提高天线的耐压，增大天线的功率容量。仿真结果表明，电磁脉冲源产生的双极脉冲，其脉冲宽度为 $1.41\ \text{ns}$ ，峰值功率为 $7.69\ \text{MW}$ ，中心频率为 $0.64\ \text{GHz}$ ；带低频补偿的高功率超宽带 TEM 喇叭天线带宽为 $0.625\sim 2.9\ \text{GHz}$ (相对带宽为 129%)，功率容量可达 $10\ \text{MW}$ ，天线频带范围内，其最小增益为 $2.6\ \text{dBi}$ ，最大增益为 $6.16\ \text{dBi}$ 。

1 电磁脉冲辐射系统设计与仿真

1.1 Marx 发生器

提出的电磁脉冲辐射系统如图 1 所示。设计了一个自击穿三级 Marx 发生器作为电磁脉冲辐射系统的高压脉冲源，其电路如图 2 所示。Marx 发生器的工作原理：首先对储能电容并联充电，然后使其串联放电，从而使电压加倍获得脉冲电压输出^[12-13]。经仿真优化，保护电阻 R_0 为 $15\ \text{M}\Omega$ ，隔离电阻 $R_1\sim R_5$ 为 $1\ \text{M}\Omega$ ，储能电容 $C_1\sim C_3$ 为 $2.2\ \text{nF}$ 时，可得到较为理想的输出电压波形。

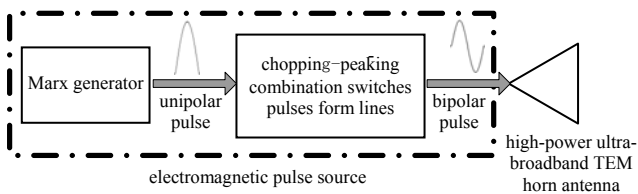


Fig.1 Electromagnetic pulse radiation system
图 1 电磁脉冲辐射系统

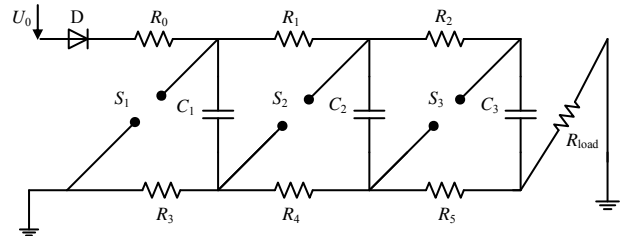


Fig.2 Self-breakdown three-stage Marx generator circuit
图 2 自击穿三级 Marx 发生器电路

自击穿三级 Marx 发生器放电的 Pspice 等效电路如图 3 所示，其中 C 为串联等效电容，其值为 $0.73\ \text{nF}$ ， L 为放电回路等效电感，其值为 $464.1\ \text{nH}$ ， S 为火花隙开关， R_{load} 为 $50\ \Omega$ 负载。当充电电压 $U_0=10\ \text{kV}$ ，火花隙开关发生击穿，Marx 发生器串联放电时，其在 R_{load} 上输出的电压及功率如图 4、图 5 所示。

图 4 为 R_{load} 上输出的单极脉冲电压波形，从图中可看出，脉冲的上升时间 $t_r=11.63\ \text{ns}$ ，半波脉宽为 $45\ \text{ns}$ ，其最大输出电压 $U_{max}=22.01\ \text{kV}$ 。图 5 为负载 R_{load} 上输出的脉冲功率，在 $t=25\ \text{ns}$ 左右时，负载输出功率达到最大值 $P_{max}=9.72\ \text{MW}$ 。

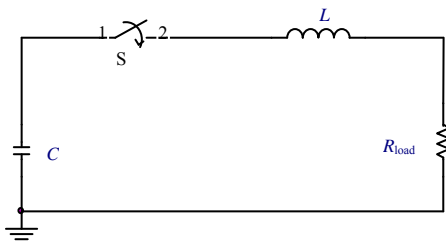


Fig.3 Self-breakdown three-stage Marx generator Pspice equivalent discharge circuit
图 3 自击穿三级 Marx 发生器 Pspice 放电电路

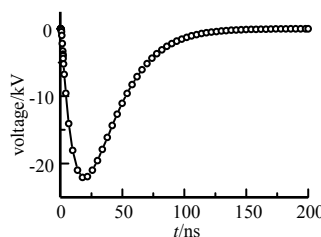


Fig.4 Load output voltage waveform
图 4 负载输出电压波形

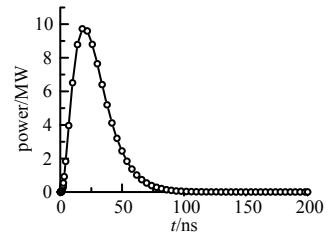


Fig.5 Load output power
图 5 负载输出功率

1.2 短路-锐化组合开关型脉冲形成线

设计了一个带锐化开关的短路-锐化组合开关型脉冲形成线^[14]，用于对 Marx 发生器产生的单极脉冲进行锐化和压缩，形成双极脉冲，其结构如图 6 所示。其中 peaking1 开关为锐化开关，双极脉冲的脉冲宽度由 peaking, chopping 开关间的距离 L 决定， $L=10\ \text{cm}$ 。

将 Marx 发生器与短路-锐化组合开关型脉冲形成线相连接组成电磁脉冲源，其 Pspice 等效电路如图 7 所示， $V1$ 为 Marx 发生器输出电压波形，如图 4 所示， T_1, T_2, T_3 为传输线， T_2 的电长度为 $0.33\ \text{ns}$ ， R_1 为 $50\ \Omega$ 负载，Marx 发生器输入的单极脉冲经脉冲形成线锐化压缩，输出电压波形、频谱分布及功率如图 8 所示。

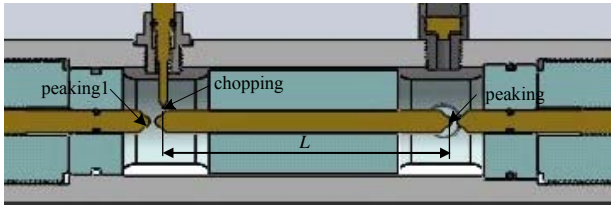


Fig.6 Chopping-peaking combination switch pulse forming line
图 6 Chopping-peaking 组合开关型脉冲形成线

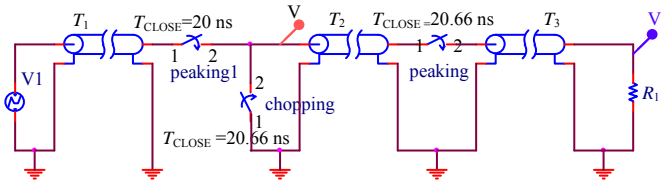


Fig.7 Pspice equivalent circuit of pulse power source
图 7 脉冲功率源 Pspice 等效电路

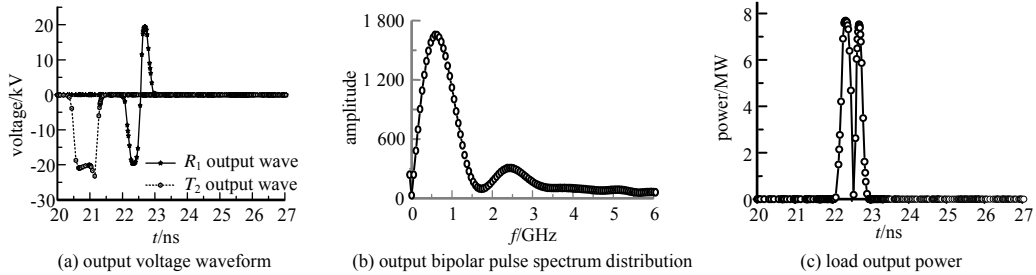


Fig.8 Voltage waveform, spectrum distribution and power of load output
图 8 负载输出电压波形、频谱分布及功率

由图 8(a)可知：脉冲源 V1 输出电压波形经开关 peaking1 锐化后，形成上升沿为 0.19 ns，脉宽为 1.21 ns，峰值电压为 -23.22 kV 的脉冲波形；此波形经短路-锐化组合开关型脉冲形成线之后，形成脉宽为 1.41 ns，峰-峰值电压为 39.1 kV 的双极脉冲。由图 8(b)可以看出，负载输出的双极脉冲频谱分布在低频段，其主要分布于 0~1.6 GHz 频率范围内，其频域峰值位于 0.64 GHz 处。从图 8(c)可知，在 $t=22.33$ ns 处时，负载输出功率达到最大，其峰值功率为 7.69 MW。

为了实现短路-锐化组合开关型脉冲形成线与高功率超宽带 TEM 喇叭天线间的匹配，本文对短路-锐化组合开关型脉冲形成线进行了 50 Ω 同轴化设计，其 HFSS 模型如图 9 所示。同轴线的内导体半径为 4.1 mm，外导体的外半径为 30 mm，内半径为 20 mm；内外导体间介质为聚甲醛，其介电常数为 3.7，聚甲醛具有抗热强度高、弯曲强度高、耐高压等优点，此同轴结构的阻抗仿真结果如图 10 所示。

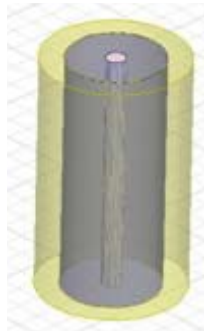


Fig.9 HFSS coaxial model of pulse forming line
图 9 脉冲形成线 HFSS 同轴模型

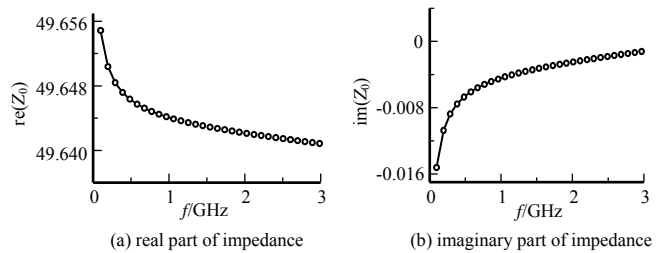


Fig.10 Characteristic impedance simulation results of the coaxial structure
图 10 同轴结构特性阻抗仿真结果

由图 10 可知，同轴结构在 0.1~3 GHz 频率范围，其特性阻抗实部稳定在 49.65 Ω 左右，特性阻抗虚部在 -0.016~0 范围内变化，因此同轴结构在 0.1~3 GHz 的范围内都能与阻抗为 50 Ω 的辐射天线较好实现匹配。

1.3 带低频补偿的高功率超宽带 TEM 喇叭天线

本文设计了一个带低频补偿的 TEM 喇叭天线，在低频段，TEM 喇叭天线的端口相当于开路，能量传播到天线端口处会产生反射，可通过加载补偿电路吸收这部分能量，进而拓展 TEM 喇叭天线的低频带宽^[15-17]，此天线的结构如图 11 所示。对天线进行仿真优化，当 $a=75$ mm, $b=110$ mm 时，其仿真结果较为理想。图 12 为天线 S_{11} 参数及增益，从图 12(a)中可以看出，天线带宽为 0.625~2.9 GHz，相对带宽为 129%，满足超宽带天线的要求，且天线带宽覆盖了大部分双极脉冲的频谱分布范围，可对双极脉冲实现有效辐射；从图 12(b)中可以看出，在低频段，天线的增益较为稳定，为 2.6 dBi 左右；当频率大于 1.5 GHz 时，其增益出现了较为明显的增大，整个频带范围内天线的最大值为 6.16 dBi。

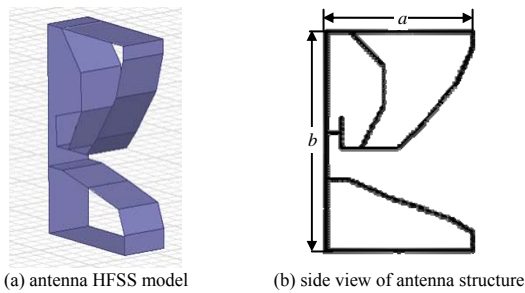


Fig.11 TEM horn antenna structure with low-frequency compensation
图 11 带低频补偿的 TEM 喇叭天线结构图

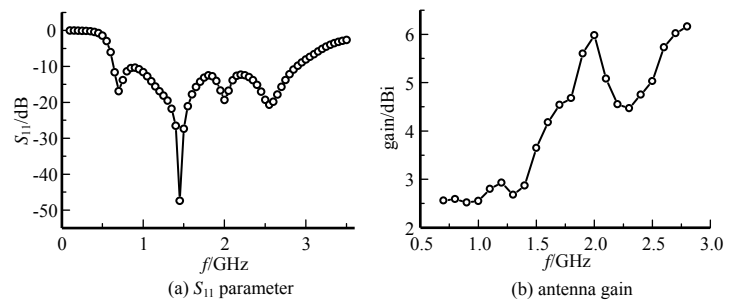


Fig.12 S_{11} parameters and gain of antenna
图 12 天线 S_{11} 和增益

当大功率信号馈入天线时, 馈电端内外导体间易发生击穿, 从而限制天线的功率容量(天线所能承载而不发生绝缘击穿的最大功率), 本文在馈电端内外导体间填充介电强度为 18 MV/m 的尼龙介质, 以增加天线的功率容量。馈电端口处内导体半径为 0.635 mm , 外导体内半径为 3.5 mm 。当天线馈电端输入功率为 10 MW 时, 天线及馈电端口处的电场分布如图 13 所示。从图 13 可知, 整个天线结构中, 天线的馈电端电场最大, 其他部位电场较低。馈电端口处从内导体到外导体间电场强度逐渐降低, 在靠近外导体处, 其电场强度为 8 MV/m , 低于尼龙的击穿电压 18 MV/m , 天线馈电端不会出现内外导体击穿。因此当电磁脉冲源将峰值功率为 7.69 MW 的双极脉冲馈入天线时, 天线可将其有效辐射出去而不会发生击穿。

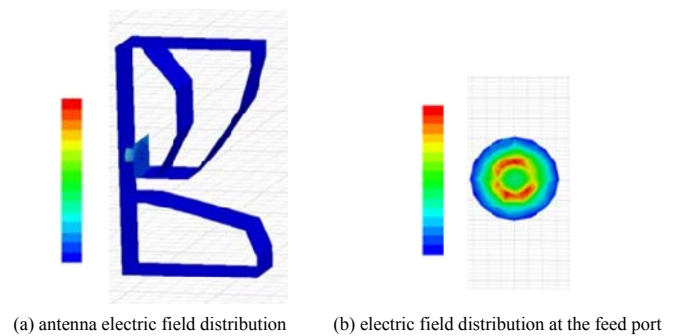


Fig.13 Electric field distribution at the antenna and feed port
图 13 天线及端口处电场分布

2 结论

本文提出一种电磁脉冲辐射系统设计方案, 并对其各组成部分: Marx 发生器、短路-锐化组合开关型脉冲形成线及带低频补偿的高功率超宽带 TEM 喇叭天线, 进行了仿真优化, 最终得到输出脉宽为 1.41 ns 、峰值功率为 7.69 MW 的电磁脉冲源; 同时通过对 TEM 喇叭天线增加补偿电路及在馈电端口填充耐高压的尼龙介质, 拓展了 TEM 喇叭天线的低频带宽并提高了功率容量, 在 $0.625 \sim 2.9 \text{ GHz}$ 频段范围内 S_{11} 参数小于 -10 dB , 相对带宽达到 129% , 功率容量达到 10 MW , 天线能有效将电磁脉冲源产生的双极脉冲辐射出去。

参考文献:

- [1] 黄裕年,任国光. 高功率超宽带电磁脉冲技术[J]. 微波学报, 2002,18(4):90-94. (HUANG Yunian,REN Guoguang. High power ultra-wideband electromagnetic pulse technology[J]. Journal of Microwaves, 2002,18(4):90-94.)
- [2] XU W,SUN X. Numerical investigation of electromagnetic pulse welded interfaces between dissimilar metals[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016,21(7):592-599.
- [3] EFREMOV A M,KOSHELEV V I,KOVALCHUK B M,et al. Generation and radiation of ultra-wideband electromagnetic pulses with high stability and effective potential[J]. Laser and Particle Beams,2014,32(3):413-418.
- [4] LEE Kun-A,KO Kwang-Cheol. Propagation model of high-power electromagnetic pulse by using a serial-parallel resistors circuit[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014,42(10):3309-3312.
- [5] BAEK Ji-Eun,CHO Young-Maan,KO Kwang-Cheol. Damage modeling of a low-noise amplifier in an RF front-end induced by a high power electromagnetic pulse[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017,45(5):798-804.
- [6] ANNENKOV V V,VOLCHOK E P,TIMOFEEV I V. Generation of high-power electromagnetic radiation by a beam-driven plasma antenna[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2016,58(4):045009-1-7.
- [7] KIM Dongsung,YU Dongho,SAWANT Ashwini,et al. Remote detection of radioactive material using high-power pulsed electromagnetic radiation[J]. Nature Communication, 2017,8(1):1-9.
- [8] ELMANSOURI M A,FILIPOVIC D S. Reduced-size TEM horn for short-pulse high-power electromagnetic systems[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Memphis,TN,USA:IEEE, 2014:828-829.

- [9] 张晋琪,杨周炳,孟凡宝,等. 新型宽谱电磁脉冲试验系统[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(7):1969–1973. (ZHANG Jinqi, YANG Zhoubing, MENG Fanbao, et al. Novel wide-spectrum electromagnetic pulse test system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(7):1969–1973.)
- [10] PRATHER W D, BAUM C E, TORRES R J. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004,46(3):335–344.
- [11] KOVALCHUK B M, KREMNEV V V, PLISKO V V, et al. High-power ultrawideband radiation source[J]. Laser and Particle Beams, 2003,21(2):211–217.
- [12] 张永民,陈维青,杨莉,等. 储能型 Marx 发生器的串联电感计算[J]. 高电压技术, 2009,35(3):651–656. (ZHANG Yongmin, CHEN Weiqing, YANG Li, et al. Inductance calculation of storage Marx generator[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(3):651–656.)
- [13] 徐刚,张晋琪,张现福,等. 1 MV 紧凑型重频 Marx 发生器绝缘设计和数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(11):1933–1935. (XU Gang, ZHANG Jinqi, ZHANG Xianfu, et al. Electrical insulation design and numerical simulation analysis of 1 MV compact repetitive Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20(11):1933–1935.)
- [14] 丁恩燕,张现福,陆巍,等. 短路-锐化开关组合形成超宽带双极脉冲试验分析[J]. 高电压技术, 2010,36(10):2555–2559. (DING Enyan, ZHANG Xianfu, LU Wei, et al. Experimental analysis of UWB bipolar pulse with chopping-peaking switch[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(10):2555–2559.)
- [15] WANG Shaofei, XIE Yanzhao, GAO Mingxiang, et al. Optimizing high-power ultra-wideband combined antennas for maximum radiation with finite aperture area[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,67(2):834–842.
- [16] LIU J J, ESSELLE K P, HAY S G, et al. Planar ultra-wideband antenna with five notched stop bands[J]. Electronics Letters, 2013,49(9):579–580.
- [17] 夏景,孔娃,王刚. 低频补偿 TEM 喇叭天线的仿真与测试[J]. 现代雷达, 2010,32(3):73–76. (XIA Jing, KONG Wa, WANG Gang. Simulation and measurement of a TEM horn antenna with low-frequency compensation[J]. Modern Radar, 2010,32(3):73–76.)

(上接第 441 页)

参考文献:

- [1] SHASTRY P N, RAKSAPHAENG P, ODETI G. A novel planar ultra-wideband biconical antenna[C]// 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Singapore:IEEE, 2019:542–544.
- [2] LEVINE E, MATZNER H. A relatively flat dual-horn antenna[C]// 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). Tel-Aviv(IL), Israel:IEEE, 2017:1–4.
- [3] SEVSKIY S, WIESBECK W. Ultra-broadband omnidirectional printed dipole arrays[C]// 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Washington, DC, USA:IEEE, 2005:545–548.
- [4] FENG G R, CHEN L, XUE X S, et al. Broadband circularly polarized crossed-dipole antenna with a single asymmetrical cross-loop[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):3184–3187.
- [5] ZHAO Z P, LI Y P, WANG L, et al. Design of broadband circularly polarized antenna via loading coupled rotated dipoles[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019,61(2):425–430.
- [6] PAN Y, CUI Y H, QI C L, et al. Evaluation of dual-polarised triple-band multi-beam MIMO antennas for WLAN/WiMAX applications[J]. IEEE Microwaves Antennas & Propagation, 2017,11(10):1469–1475.
- [7] 李杰,陈星. 超宽带双极化平面交叉偶极子天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):632–635. (LI Jie, CHEN Xing. Design of ultra-wideband dual-polarized planar cross-dipole antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):632–635.)
- [8] LIU Y, YI H, WANG F, et al. A novel miniaturized broadband dual-polarized dipole antenna for base station[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013(12):1335–1338.
- [9] HUANG H, LIU Y, GONG S. Broadband dual-polarized omnidirectional antenna for 2G/3G/LTE/WiFi applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15):576–579.
- [10] WU B Q, LUK K. A broadband dual-polarized magneto-electric dipole antenna with simple feeds[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8):60–63.
- [11] MOK W C, CHAN K F, SO K K, et al. 3D printed dual polarized magneto-electric dipole antenna[C]// 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Singapore:IEEE, 2019:1194–1196.