

超宽带 TEM 喇叭天线的低频分离回路设计

徐晓敏 廖成* 陈凯亚 张敏 冯菊
(西南交通大学电磁场与微波技术研究所 成都 610031)

摘要: 在超宽带 TEM 喇叭天线的设计中, 往往由于低频性能优化和天线小型化两者难以兼顾, 而使得其应用受到限制。该文针对低频的反射问题, 基于带通滤波器并联的设计思路, 且区别于传统天线末端的低频反馈回路结构, 提出在超宽带 TEM 喇叭天线馈电过渡结构上设计低频分离回路结构, 减少低频分量在天线末端的反射, 从而改善天线的低频性能。采用该设计思路, 对一款超宽带 TEM 喇叭天线的结构进行改进并实现其优化设计。通过对比改进前后的天线性能, 其阻抗带宽的低频降至 0.1 GHz, 拓展了 12.5%, 同时天线端口馈电效率提升 10%, 结果验证了该设计思路和方法对于超宽带 TEM 喇叭天线低频优化的有效性。最终, 对阻抗特性以及该结构在不同频点下电流分布的分析, 进一步证实新思路的可行性。

关键词: 天线; TEM 喇叭; 超宽带; 低频分离结构; 带通结构

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)11-2954-06

DOI: 10.11999/JEIT160049

Design of Low-frequency Separation Structure for Ultra-wideband TEM Horn Antenna

XU Xiaomin LIAO Cheng CHEN Kaiya ZHANG Min FENG Ju

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In the design of ultra wideband TEM horn antenna, it is difficult to combine both the character optimization in low frequency and the miniaturization of an antenna, which always limits the usage of TEM horns in some applications. For the problem of low-frequency reflection, a structure, which is referred to the principle of band-pass filters in parallel and different from the conventional ones, is proposed in this paper for separating a fraction of low-frequency electric field component on the plates linking excitation port to radiation plates. It can greatly reduce the reflection of low-frequency component at the edge of radiation plates to improve the low frequency character of the antenna. In this paper, an ultra-wideband TEM horn antenna improved with the proposed structure is presented. Finally, the comparison of the improved antenna and the original one is exhibited, which shows that the impedance bandwidth is 12.5% wider with the low-cutoff frequency decreasing to 0.1 GHz and simultaneously the port-feed efficiency is increasing by 10%. The results confirm the validity of the proposed design to optimize the low frequency character. The feasibility is also validated in the end by analyzing the impedance and the magnitude distribution of currents in different frequencies, respectively.

Key words: Antenna; TEM horn; Ultra-wideband; Low-frequency separation structure; Band-pass structure

1 引言

TEM 喇叭天线具备良好的超宽带特性, 适用于军事、通信等多种领域, 即便是较高功率需求的应

用场合也能适用, 是最为常用的超宽带脉冲辐射天线^[1-4]。然而, TEM 喇叭天线在设计和优化上也面临着一些挑战。应用传输线理论进行分析, TEM 喇叭天线的结构对于低频段信号相当于开端的传输线, 其低频部分的电磁波往往会被天线反射, 进而对信号源存在潜在的危害。因此, 有效降低低频截止频率, 同时尽量减少低频直接反射, 对拓展超宽带 TEM 喇叭天线的应用十分必要。

提高天线低频辐射性能最直接的解决方法, 就是增大天线尺寸。文献[5]基于传输线理论粗略估计 TEM 喇叭天线的口径面高度至少达到半波长($\lambda/2$)时才能辐射相应的频率分量。依据这一关系估计,

收稿日期: 2016-01-13; 改回日期: 2016-06-08; 网络出版: 2016-09-01

*通信作者: 廖成 c.liao@swjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金委和中物院联合基金(U1330109), 高功率微波技术重点实验室自主研究项目(2014H01022), 中央高校基本科研业务费专项资金(2682015CX062)

Foundation Items: The Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (NSAF U1330109), The Research Program of the Key Laboratory of High Power Microwave Technology (2014H01022), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682015CX062)

若要保证较低频段电磁波的辐射，则天线尺寸将急剧增大，在某些对天线尺寸有上限要求的实际应用中并不可取。因此，对超宽带 TEM 喇叭天线的低频性能的优化，国内外学者展开了一些研究。主要可以分为几类。一是采取末端加载技术^[6,7]，这种方式往往间接增大了天线口径面积；二是直接对天线原末端边缘进行形变^[8-11]，其原理与天线末端加载类似，但效果并不明显；三是采用适当的巴伦设计，常见有 U 型巴伦^[9,10]、平面巴伦^[12]等；四是低频回路补偿技术^[13-16]，利用金属的外框构成反馈回路结构引导低频信号，使回路电阻吸收一定部分的低频能量，从而减小反射，改善低频性能。然而由于传统反馈回路结构给天线整体添加了外框，不可避免地使得天线的整体体积增大。另外，其设计思路和原理也多局限于天线末端电阻加载，目前文献中所展示出的结构设计大都趋于相同。

与传统的末端电阻加载不同，本文将等效滤波结构的理念应用到 3 维结构的时域天线中，提出把超宽带 TEM 喇叭天线视为带通系统，并以带通电

路并联关系为理论基础，构建低频的通带结构作为分离回路，以减少由于不必要的低频信号进入辐射极板后产生的能量反射，从而改善超宽带 TEM 喇叭天线的低频特性。等效滤波结构在 2 维平面结构(微带)天线中的应用已有不少的研究，如谐波抑制微带天线^[17-19]等；而低频分离回路的设计，将这一应用拓展至 3 维，为 3 维时域天线低频性能优化提供一种新的思路。

2 天线结构与回路设计

2.1 天线初始结构及传统反馈回路

超宽带 TEM 喇叭天线的初始结构如图 1(a)(简称天线 1)。天线 1 主射轴向上整体长约 1.1 m，整体为三段式结构：直线段、圆弧段和指数段，如图 1(b)，图 1(c)所示。直线段的规则矩形平行极板作为过渡结构，采用同轴线与其垂直的方式对天线进行馈电，另一端则直接连接辐射极板的喉部。设计中为了尽量减小连接处的不连续性，三段极板的连接处均相切。

经过优化设计，得到天线 1 主要结构的一组最

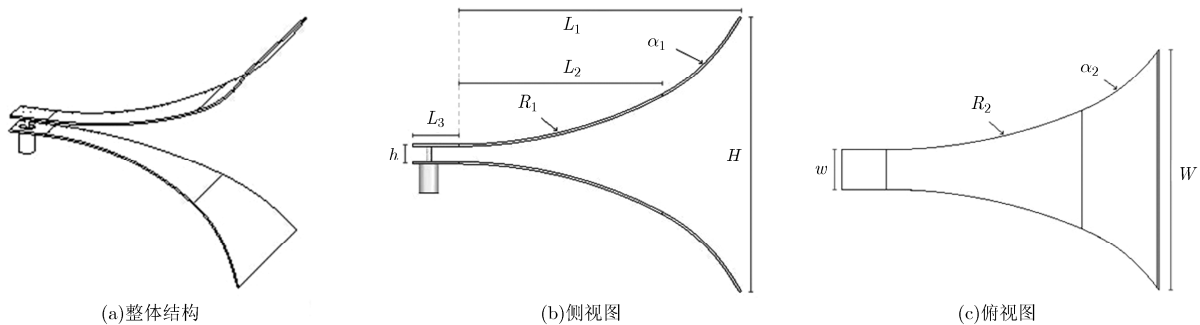


图 1 天线 1 的几何结构

优尺寸：口径面高度 $H=700.4$ mm，宽度 $W=622.6$ mm，辐射极板辐射向投影长度 $L_1=827.8$ mm，其中圆弧段投影长度 $L_2=543.2$ mm，对应曲率半径为 $R_1=1117.3$ mm， $R_2=1345.8$ mm，指数段对应调节指数 $\alpha_1=0.842$ ， $\alpha_2=0.862$ ，平行极板长度 $L_3=118.2$ mm，宽度 $w=106.8$ mm，间距 $h=40.72$ mm。

若依据传统的回路设计方法，从正负极板引出的两条反馈回路并联，其合阻抗等于天线端口处的特性阻抗，从而使低频回路匹配，并利用电阻加载消耗回流的信号能量^[13]，其等效电路如图 2 所示。

2.2 低频分离回路原理及天线改进

本文提出的低频分离回路是作用在馈电端口与辐射喉部之间的过渡结构中的，即在激励信号进入辐射极板之前，尽量减少原低频截止频率附近的低频段激励进入喇叭辐射结构，即把部分低频激励从

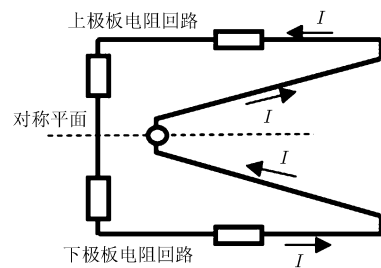


图 2 传统低频回路等效电路

总的激励中分离开，这与图 2 中传统的低频反馈回路设计一般都采用末端加载的方式明显不同，为了区别，因而称之为低频分离回路。

实现低频分离的理论基础是电路中的滤波器并联电路。在电路中，要展览一个简单带通电路的低频截止频率，通常可以采用通带合成的方式来实现，

如图3(a)示意。图3(b)给出了相应的频谱关系,输入信号的频谱($f_L \sim f_H$)被分成了两个通带,电路1对应的通带1(频率范围: $f_i \sim f_H$),电路2对应的通带2(频率范围: $f_L \sim f_i$)。当原电路仅有带通滤波电路1时,电路的通频带对应于图3(b)的通带1;而当电路1并联上带通滤波电路2时,输入信号中的部分信号(通带2)则被分离出来,从电路2中完成传输,以减少信号反射。

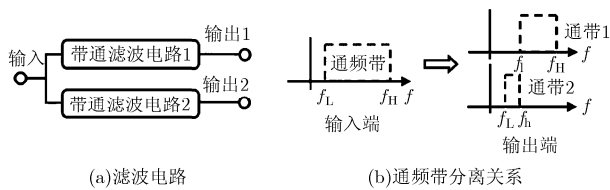


图3 电路中通频带分离示意图

与之类似,有限阻抗带宽的时域天线在工作频带内对激励信号有效响应,而带外激励则被较大反射。基于这种相似性,图4以TEM喇叭天线为例,其天线部分一般可以等效为一个辐射阻抗 Z_r ,辐射带宽有限,可将其视为带通电路,而低频回路结构则可以为一部分信号提供另一条通路,利用这条通路,使得原本在辐射极板末端被反射的部分低频信号在其进入辐射极板前即被分离,从而有效地降低低频的反射。

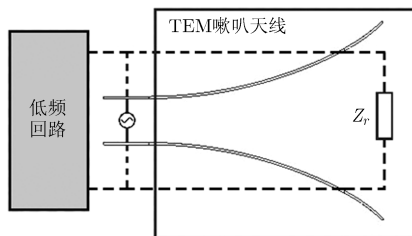


图4 TEM喇叭天线结构改进

基于这一思路对天线进行改进,利用带通结构来建立低频分离回路,得到带回路的喇叭天线(简称改进后天线),如图5所示。该天线相较于天线1,其平行极板和辐射极板的几何结构均不作改动,仅在天线后部添加一个新的低频分离回路结构(后文简称为分离回路结构)。分离回路结构是由上下对称的平行金属板连接一个部分柱面结构的金属片组成,其中,下平板与同轴馈线的外导体表面连接,上平板与天线1的上平行极板平行,构成一个平行板电容器结构。考虑到平行板结构的电容特性和环形回路结构的电感特性,假设以简单的RLC串联谐振电路(窄带通)去等效该分离回路结构,并且令谐

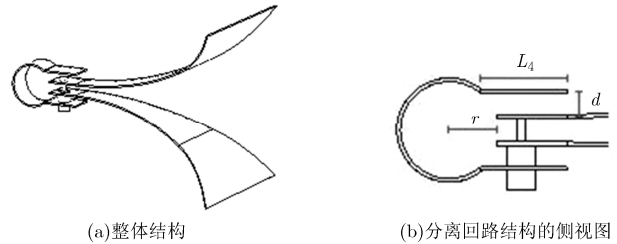


图5 改进后天线的几何结构

振中心频率 ω_0 满足:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 2\pi \left(\frac{f_L + f_H}{2} \right) \quad (1)$$

同时尽量使得谐振处窄通带的上限频率 f_h 接近原低频截止频率 f_L ,由此即可实现如图3(b)基于通带合成的阻抗带宽扩展。

考虑到反馈回路设计与天线本身相互影响,目前还没有较为准确的方法来估算3维复杂结构的分布参数,因此在设计时可结合优化算法来获取最优尺寸参数,减少设计复杂程度。

3 数值结果与分析

3.1 天线的改进设计

基于2.2节的原理分析,采用图5所示的3维低频分离回路结构对初始天线进行改进。经过优化设计,得到该分离回路结构的尺寸为: $L_4=142.5$ mm, $d=36.33$ mm, $r=53.44$ mm。

为了分析改进结果,采用脉宽为2 ns的高斯脉冲作为激励,对改进前后的天线分别进行模拟计算,得到对比结果。

图6展示了两个天线在0.09~1.20 GHz频率区间内的电压驻波比(VSWR)曲线对比。结果表明,相比于天线1,频率在处于0.09~0.20 GHz范围内时,改进后天线的VSWR曲线明显降低,满足了小于2的同时,对其他频点的影响并不明显。通过分别计算改进前后天线激励端口反射波的频谱并对比,改进后天线在0.10~0.20 GHz频率区间的反射能量被明显抑制,幅值上仅约为原来的50%,这一部分信号反射的降低,是提高馈电效率^[20]的主要因素。根据计算,天线1馈电效率为63.20%,而改进后天线的馈电效率为73.01%,相比提高近10%。通过对比改进前后天线的阻抗带宽,可以直观地看出低频分离回路设计的有效性。

低频分离回路的添加使得天线阻抗带宽向低频方向展宽了约12.5%,并且对原有远场辐射波形的影响并不明显。图7对比了天线主射方向上的远场辐射波形,其波形的主要部分完全吻合,仅波形尾部存在较小的差异,可见两条曲线有较为良好的吻

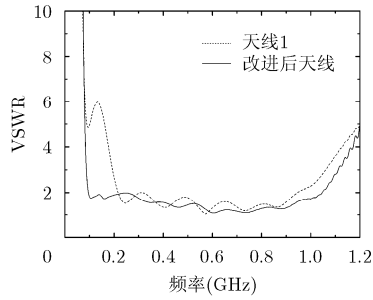


图 6 VSWR 曲线对比

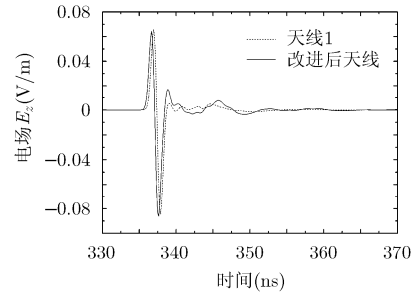


图 7 主射方向远场辐射波形对比

合度，这表明改进后的天线在减小了低频反射的基础上，仍能够较好地保持原有天线性能。图 8(a)进一步细致对比了天线改进前后工作在 0.15 GHz 和 0.30 GHz 时的远场方向图。当天线工作在 0.15 GHz 时，改进后天线的主波束完全偏离 90° 方向(原主射方向)，偏向分离回路的开口方向，且增益明显降低；当天线工作在 0.30 GHz 时，改进后天线的增益有所提高，并且主波束右侧的副瓣明显降低。这表明分离回路结构有效地分离了 0.15 GHz 附近频点的激励信号，并通过一定的辐射减少能量返回激励源，同时，分离回路结构并没有破坏 0.30 GHz 处的天线辐射性能。另外，超宽带时域天线的辐射特性常用归一化能量方向图来描述，如图 8(b)所示。通过对比，改进前后天线的归一化能量方向图波束主瓣较为吻合，改进后的副瓣向后偏转，且后瓣降低约 2 dB，可见天线改进后仍保持了较好的前向辐射性能。

3.2 低频分离回路分析

根据图 5 的低频分离回路结构，平行极板间距 d 和圆环结构半径 r 是影响分离回路结构性能的主要参数，图 9(a)和图 9(b)分别考察两者对 VSWR 曲线的影响。从曲线上看，两个参数的变化对 0.1~0.2 GHz 频段内的 VSWR 参数均有影响，并存在一个

最优值使得该频段范围内的 VSWR 降到 2 以下。另外，极板间距 d 还对 1 GHz 以上的频段有明显影响。

根据 S_{11} 参数分别计算两种天线的馈电端口特性阻抗。图 10 表明了馈电端口在扩展的带宽(即 0.1~0.2 GHz)范围内，其特性阻抗明显减小，而其他频段的阻抗变化未受太大影响。进一步，通过并联关系，由图 10 曲线反推计算得到分离回路结构的阻抗曲线，如图 11 所示。曲线在 0.1~0.2 GHz 附近区域的幅值明显较小，恰好符合带通的特性，可见，分离回路结构为该频段范围内的信号提供了较好匹配的通路，这与开始的设计思路吻合，说明了其合理性。

不同频点表面电流的对比可以更直观地说明分离回路结构的作用效果。图 12 显示了 0.1 GHz 频点上的最大电流值大于其他 3 个频点上的最大电流值，这表明分离回路结构对 0.1 GHz 频点附近的频率具备一定的选择效果，为 0.1~0.2 GHz 附近(由图 11 中阻抗曲线体现)的低频部分提供了回流通路，与设计目标符合，表明设计思路的正确性。

4 结论

基于带通结构并联设计思路，以超宽带 TEM 喇叭天线单元为基础，设计并结合优化算法得到一

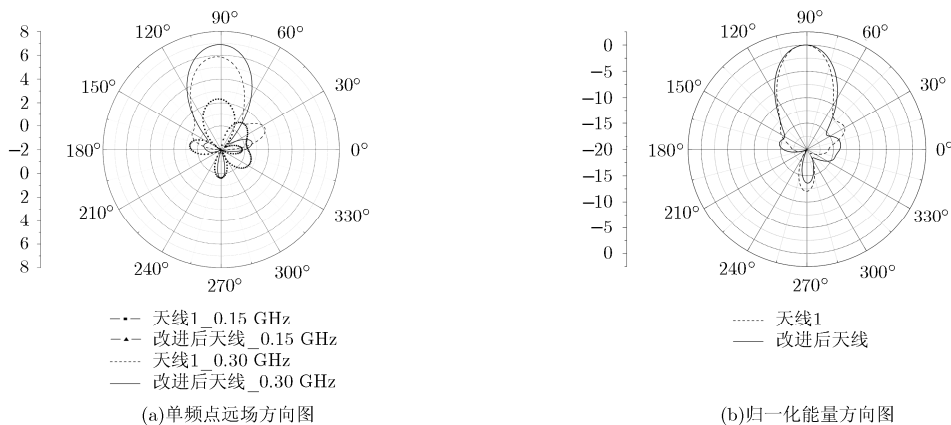


图 8 天线方向图对比

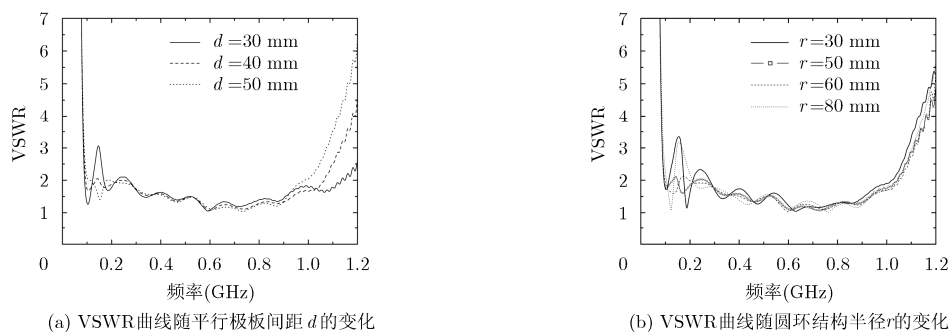
(a) VSWR曲线随平行极板间距 d 的变化(b) VSWR曲线随圆环结构半径 r 的变化

图9 VSWR随参数变化曲线

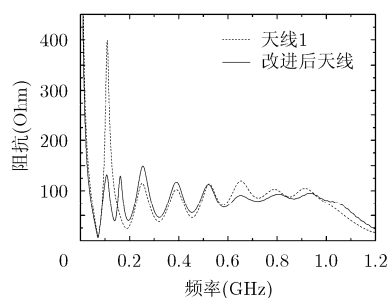


图10 馈电端口阻抗随频率变化曲线

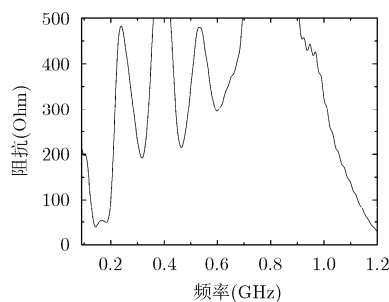


图11 分离回路结构阻抗随频率变化曲线

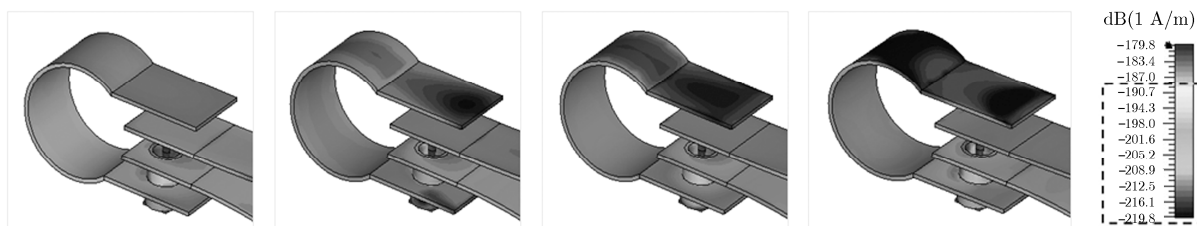


图12 低频分离结构表面电流随频率变化对比

(从左到右, 依次为 0.1 GHz, 0.3 GHz, 0.7 GHz, 1.0 GHz; 回路结构电流数值分布在图例的虚线框中体现, 深色表示数值较小)

种等效为带通电路的低频分离回路结构。改进后天线的阻抗带宽向低频扩展了 12.5%, 低频截止频率达到 0.1 GHz, 端口处馈电效率 73.01%, 提升近 10%, 减小了能量反射, 达到设计目的。通过分析, 该结构在 0.1~0.2 GHz 区间内的阻抗明显较小, 同时其表面电流在该频率区间内相对较大, 表明该分离回路结构具备类似于带通的效果, 从而验证了设计思路和方法的可行性。这种频率分离的设计思路也为 3 维时域天线的低频优化设计、3 维带阻天线的设计提供另一种思路导向。

参考文献

- [1] 邵金进, 纪奕才, 方广有, 等. 用于公路检测的超宽带横向电磁波喇叭天线[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 723-728. doi: 10.13443/j.ejors.2013071401.
- SHAO Jinjin, JI Yicai, FANG Guangyou, *et al.* Ultra-wideband TEM horn antenna for road investigation[J].

- Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(4): 723-728. doi: 10.13443/j.ejors.2013071401.
- [2] KESKIN A K, SENTURK M D, TURK A S, *et al.* Quasi TEM-horn antenna array for rescue radar buried victims under rubble[C]. 2015 8th IEEE International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Florence, Italy, 2015: 1-3. doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292686.
- [3] SHAO J, FANG G, FAN J, *et al.* TEM horn antenna loaded with absorbing material for GPR applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 523-527. doi: 10.1109/LAWP.2014.2311436.
- [4] TURK A S, KESKIN A K, and SENTURK M D. Dielectric loaded TEM horn-fed ridged horn antenna design for ultrawideband ground-penetrating impulse radar[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2015 23(5): 1479-1488. doi: 10.3906/elk-1303-48.
- [5] KOLOKOTRONIS D A, HUANG Y, and ZHANG J T.

- Design of TEM horn antennas for impulse radar[C]. IEEE High Frequency Postgraduate Student Colloquium, Leeds, 1999: 120-126. doi: 10.1109/HFPSC.1999.809291.
- [6] OLOUMI D, MOUSAVI P, PETTERSSON M, *et al.* A modified TEM horn antenna customized for oil well monitoring applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 5902-5909. doi: 10.1109/TAP.2013.2281720.
- [7] CHEN Yongguang, WANG Yun, and WANG Qingguo. A new type of TEM horn antenna for high-altitude electromagnetic pulse simulator[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(5): 1021-1024. doi: 10.1109/LAWP.2013.2278202.
- [8] JAMALI A A and MARKLEIN R. Design and optimization of ultra-wideband TEM horn antennas for GPR applications[C]. 2011 XXXth URSI IEEE General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey, 2011: 1-4. doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050360.
- [9] SCHOEMAN K, MEYER P, and DE VILLIERS D. Exponential TEM horn with a convex triangular arc[C]. 2013 IEEE AFRICON, Pointe-Aux-Piments, Mauritius, 2013: 1-5. doi: 10.1109/AFRCON.2013.6757614.
- [10] KARSHENAS F, MALLAHZADEH A R, and IMANI A. Modified TEM horn antenna for wideband applications[C]. 2009 ANTEM/URSI 2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting, Toronto, Canada, 2009: 1-5. doi: 10.1109/ANTEMURSI.2009.4805077.
- [11] AMERI A A H, KOMPA G, and BANGERT A. Study about TEM horn size reduction for ultrawideband radar application[C]. 2011 IEEE Microwave Conference (GeMIC), Darmstadt, Germany., 2011: 1-4.
- [12] CHUNG K, PYUN S, and CHOI J. Design of an ultrawideband TEM horn antenna with a microstrip-type balun[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(10): 3410-3413. doi: 10.1109/TAP.2005.856396.
- [13] 廖勇, 张秦岭, 陆巍, 等. TEM 喇叭天线低频补偿实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1247-1250.
- LIAO Yong, ZHANG Qinling, LU Wei, *et al.* Experiment of low-frequency-compensated TEM horn antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1247-1250.
- [14] 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.
- [15] MEHRDADIAN A and FOROORAGHI K. Design and fabrication of a novel ultrawideband combined antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 95-98. doi: 10.1109/LAWP.2013.2296559.
- [16] ELSHERBINI A and SARABANDI K. ENVELOP antenna: a class of very low profile UWB directive antennas for radar and communication diversity applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(3): 1055-1062. doi: 10.1109/TAP.2012.2229951.
- [17] 周治立, 李莉, 洪劲松, 等. 一种新颖的结构紧凑型谐波抑制天线[C]. 2011 年全国微波毫米波会议, 中国青岛, 2011: 497-499.
- ZHOU Zhili, LI Li, HONG Jinsong, *et al.* A novel compact harmonic suppression antenna[C]. 2011. National Microwave Millimeter Wave Conference, Qingdao, China, 2011: 497-499.
- [18] 施荣华, 徐曦, 董健. 一种双陷波超宽带天线设计与研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 482-487. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00643.
- SHI Ronghua, XU Xi, and DONG Jian. Design and analysis of a dual band-notched UWB antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 482-487. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00643.
- [19] 董健, 胡国强, 徐曦, 等. 一种可控三陷波超宽带天线设计与研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(9): 2277-2281. doi: 10.11999/JEIT141566.
- DONG Jian, HU Guoqiang, XU Xi, *et al.* Design and analysis of controllable tri-band-notched ultrawide band antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2277-2281. doi: 10.11999/JEIT141566.
- [20] 王建国, 田春明, 夏洪富, 等. 复合振子天线辐射特性的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(4): 581-585.
- WANG Jianguo, TIAN Chunming, XIA Hongfu, *et al.* Numerical simulations on radiation properties of combined-oscillator antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 581-585.
- 徐晓敏: 男, 1991 年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学、天线原理与设计等.
- 廖成: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算电磁学、电磁散射与逆散射和天线理论及应用研究等.
- 陈凯亚: 男, 1971 年生, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为天线原理与设计、功率放大器的线性化技术等.