

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211116

基于新型缝隙单元的微带全向阵列天线设计*

邢韶华¹ 曹源¹ 刘宇峰¹ 高扬²

(1.山西大学物理电子工程学院 太原 030006; 2.中国-白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室 太原 030006)

摘要:提出了一种新型串行馈电的全向缝隙阵列天线,在带状线两侧背靠背刻蚀8对圆环缝隙,在缝隙内部加载一个Y形缝隙,延长Y形缝隙的长,并在顶部刻蚀横槽,形成最终的Y-T型缝隙结构,用以提升单元辐射性能。采用遗传算法(GA)对阵列进一步优化,使其工作带宽进一步扩宽,增益有所提升。根据设计结果加工制作了天线样品,实际测试表明,天线的 $|S_{11}| < -10$ dB阻抗带宽为7.93% (5.56~6.02 GHz),带宽内峰值增益均高于8.99 dBi。工作在5.8 GHz处,E面旁瓣水平低于-10.11 dB,峰值增益为9.43 dBi,且有稳定的全向辐射性能。

关键词:全向天线;带状线;缝隙阵列;遗传算法;串行馈电

中图分类号: TN823⁺.27 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1025

Design of omnidirectional microstrip array antenna based on novel slot unit

Xing Shaohua¹ Cao Yuan¹ Liu Yufeng¹ Gao Yang²

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. China-Belarus Belt and Road Joint Laboratory on Electromagnetic Environment Effect, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A new serial-fed omnidirectional slot array antenna is proposed. Eight annular slots are etched back to back on both sides of the stripline, and a Y-shaped slot is loaded inside the slot to extend the length of the Y-shaped slot. The top is etched with horizontal grooves to form the final Y-T slot structure to improve the unit radiation performance. Genetic algorithm (GA) is used to further optimize the array so that its working bandwidth is further widened and the gain is improved. According to the design results, the antenna samples are fabricated. The actual measurement shows that the impedance bandwidth $|S_{11}| < -10$ dB of the antenna is 7.93% (5.56~6.02 GHz), and the peak gain in the bandwidth is higher than 8.99 dBi. Operating at 5.8 GHz, the E-plane sidelobe level is lower than -10.11 dB, the peak gain is 9.43 dBi, and it has stable omnidirectional radiation performance.

Keywords: omnidirectional antenna; stripline; slot array; genetic algorithm; serial feed

0 引言

近年来,随着蓬勃发展的无线通信系统市场对于高性能全向天线的需求日益增长。基于需求,研究团队开发了各种天线形式。文献[1]提出的高增益同轴共线天线,将馈电电缆对全向辐射方向图的影响降至最低,提升了增益,但带宽窄的问题仍然存在。微带贴片天线同样存在着带宽窄、增益低的问题^[2-3]。文献[2]提出的一种具有周期性微带壁垒线的增益增强贴片天线,提高了天线增益,但带宽窄的问题仍未解决。文献[3]提出了一种宽带薄型双U槽微带贴片天线,带宽远远高于文献[1],由于结构局限性,天线增益较低。文献[4]设计的新型宽带圆极化缝隙微带天线。结合多种谐振模式,提高了天线带宽,但馈电结构过于复杂。文献[5]通过在矩形环蚀刻叉形条和一个矩形缺陷接

地结构,改善了天线高频部分带宽,但增益不理想。而对于经典的单极子和垂直偶极子全向天线^[6-7],他们的增益和带宽性能有限。文献[6]提出了一种可扩展的双极化天线,采用紧凑型腔和缝隙偶极子混合结构进行全向辐射。文献[7]提出的具有扼流结构的新型套简单极天线,有效拓宽了其阻抗带宽。文献[8]提出了一种宽带全向水平极化天线,通过阶梯状边缘和背面微扰提升天线带宽。在提升带宽的方法上,文献[9]通过在贴片上开槽来扩展带宽。文献[10]提出了一种宽带高效堆叠微带天线,通过引入空气腔提升带宽。文献[11]通过扳手形微带馈线扩宽天线带宽。文献[12]通过在微带天线辐射层顶部设置渐变缝隙并在天线体上方放置矩形槽形成耦合,从而达到展宽带宽的效果。理想的全向天线应该具备结构简单,较宽的带

收稿日期:2022-08-18

* 基金项目:中国-白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室开放基金(ZBKF2022020102)项目资助

宽,稳定的全向辐射增益,有较高的定向性,然而现有的天线设计很难全面兼顾所有性能要求。因此,对于一种新型微带全向阵列天线的研究具有极大的应用价值。

本文提出了一种基于新型环型缝隙的微带全向阵列天线,采用简单的带状线结构,通过设计环形缝隙结构,在其内部蚀刻 Y-T 形缝隙,设计了一款带宽提升的全向天线。首先在带状线两侧背靠背蚀刻 8 对圆环缝隙,在圆环单元蚀刻 Y 形缝隙,然后延长 Y 形缝隙的长并蚀刻一个横槽,构成了最终的 Y-T 形谐振结构。通过遗传算法(genetic algorithm, GA)优化天线的结构参数并加工制作了实物。实测结果表明,天线阻抗带宽为 8.62% (5.6~6.0 GHz),且在带宽内天线的增益均大于 8.99 dBi,峰值增益为 9.98 dBi。

1 天线的结构与与设计

图 1 为本文所提出的天线结构,整个天线的尺寸为 251 mm×22 mm,带状线中间所填充的介质为厚度为 $h=3$ mm,相对介电常数为 $\epsilon_r=2.55$ 的聚四氟乙烯,天线采用侧馈,中心导带的线宽 $W_c=2.16$ mm。两个平行的接地板上蚀刻 8 对背靠背的圆环加载同向 Y-T 形缝隙作为辐射结构,缝隙间间距为 D_f 。第一个缝隙距馈电端的距离 $L_f=20$ mm,终端及侧面均开放。

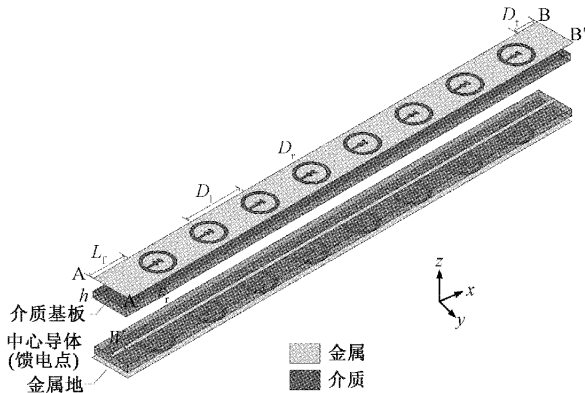
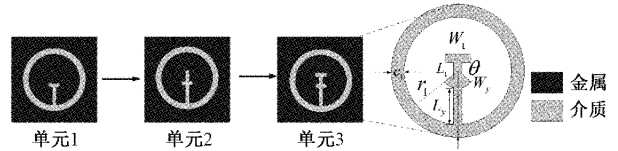


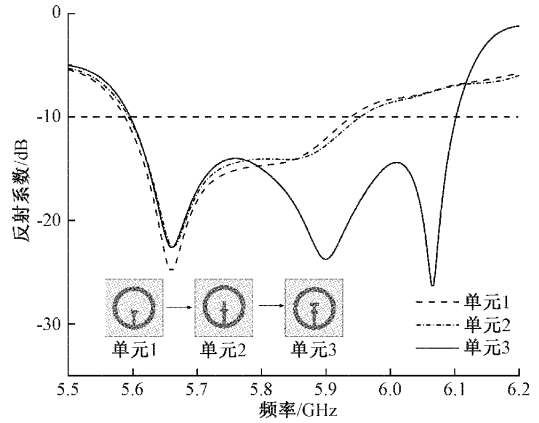
图 1 天线三维结构

图 2 为缝隙单元的设计过程及对应反射系数的仿真。天线 1 的缝隙单元为圆环加载一个 Y 形缝隙,相对带宽为 6.03% (5.59~5.94 GHz)。延长 Y 形缝隙长度,构成天线 2 的缝隙单元,相对带宽 6.2% (5.59~5.95 GHz)。在天线 2 缝隙单元上蚀刻一个横槽,构成了最终的 Y-T 型谐振结构,相对带宽增长到 8.62% (5.60~6.10 GHz),相对于天线 1 设计相对带宽提升了 2.59%。

图 3 为 3 种单元在 5.8 GHz 处的瞬时电流分布图,由图可知,当缝隙单元仅为圆环加载一个 Y 形缝隙时,电流主要分布在圆周及 Y 形缝隙上。当延长 Y 形缝隙时,虽然电流的路径得以延伸,但没有产生新的谐振,因此带宽改善并不明显。当蚀刻横槽形成 T 形缝隙后,电流主要集中在圆周两侧及 Y-T 形缝隙上,T 形缝隙在高频部分产生新的

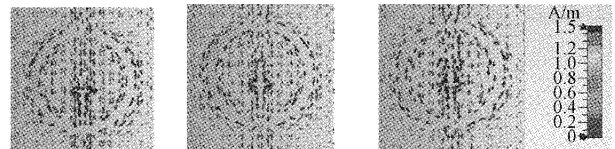


(a) 天线单元的设计过程



(b) 反射系数比较

图 2 3 种缝隙单元



(a) 单元 1 (b) 单元 2 (c) 单元 3

图 3 3 种单元在 5.8 GHz 处的电流分布

谐振,通过调节其结构尺寸便可以有效的改善天线的带宽。

图 4 为所设计的天线工作在 5.8 GHz 时仿真的瞬时电流,电流沿着中心导带流动,电磁能量被耦合到缝隙辐射,沿圆周两侧和垂直方向上的 Y-T 形缝隙上的同相电流在远场相互作用,形成宽带高增益全向辐射。

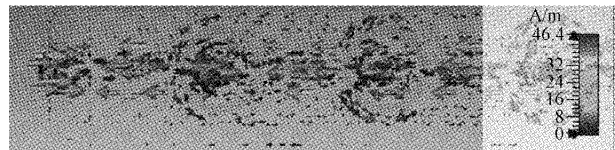


图 4 5.8 GHz 处瞬时电流分布

2 参数分析及优化

2.1 主要参数分析

为了分析天线结构参数对谐振频率及带宽的影响,对部分重要参数进行分析。环宽 c_1 对天线的阻抗匹配影响较大,如图 5 所示。当 c_1 较小时,天线在 6.0 GHz 处匹配较差,导致带宽变窄,而在 5.8 GHz 处匹配良好,这是由于环宽较窄,环形缝隙的等效电感较大,天线的谐振频率位于低频。而 c_1 过大会导致天线阻抗匹配变差,因此选择 $c_1=1.6$ mm。

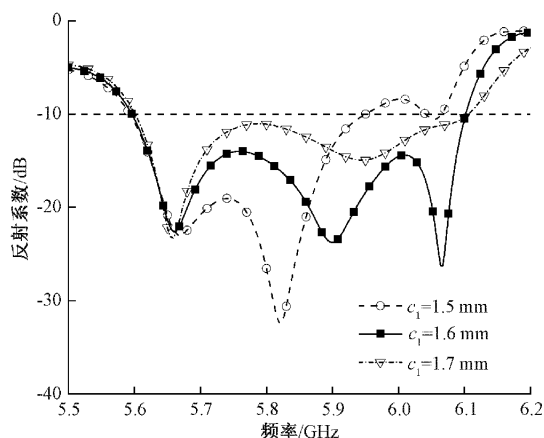


图5 圆环 c_1 的影响

图6示出了 θ, L_t 对天线阻抗带宽的影响。Y形缝隙弧形部分角度 θ 是决定天线是否能在高频处产生良好阻抗匹配的关键参数,由图6(a)可知, θ 过大或者过小都无法使天线工作在高频处,极大的影响天线的带宽。对于T形而言,其结构参数决定能否在高频产生谐振。在本设计中,为了便于分析,将T形缝隙的横向和竖直部分设计为等长,即 $W_t = L_t + W_y$,可直接分析参数 L_t 对天线性能的影响情况。如图6(b)所示,随着 L_t 的增大,天线的带宽增大,持续增大同样无法使天线在高频处谐振,带宽变窄,这也验证了并不是在垂直方向电流路径越长越好。

2.2 优化设计

所设计的带状线的中心导带的线宽 $W_c = 1.4$ mm,中间填充介质的相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.55$,损耗正切角为 $\tan\delta = 0.003$,天线在 5.8 GHz 下的工作波长可由如下公式计算得出:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

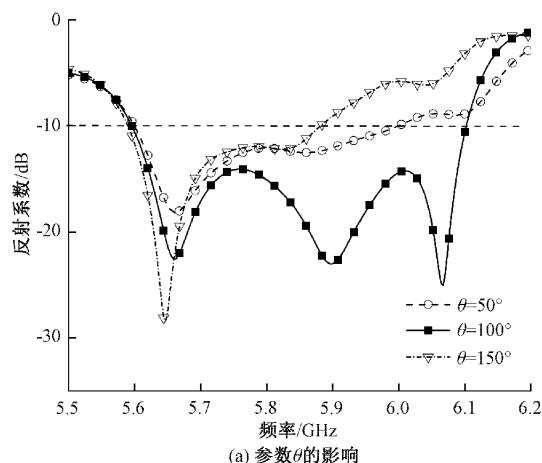
式中: f_0 为自由空间中的波长,工作波长为 $\lambda = 31.8$ mm。

为了使天线获得最佳的带宽及增益,使用遗传算法(GA)对天线的结构参数进行优化。

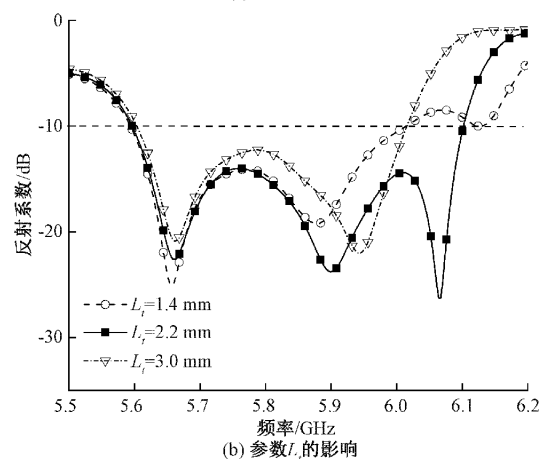
遗传算法是一种模仿自然界生物进化机制而形成的随机全局搜索和优化方法,该算法区别于其他算法的特点是从解的集合搜索最优解,且它可以同时处理多个个体,易于并行计算。取重要参数在较优性能时的初始值作为算法的初始个体。将参数范围设置为初始值的左右各 10%,为了减少每一代所需的求解器的计算次数,提高优化的效率,将种群大小设置为 4×10 ,变异率为 60%,随机种子设置为 1,最大的迭代次数为 55 次,得到的最大的求解次数约为 1 121 次,且精度满足要求。定义的适应度函数如下:

$$F = C_1 \times S_{11} + C_2 \times MaxGain + C_3 \times Bandwidth \quad (2)$$

式中: $MaxGain$ 为峰值增益,设置其目标在带宽内优于 10 dBi, $Bandwidth$ 为 5.8 GHz 下 $|S_{11}| < -10$ dB 的阻抗



(a) 参数 θ 的影响



(b) 参数 L_t 的影响

图6 Y-T 缝隙单元参数扫描结果

带宽。

优化的主要目标为带宽的提升,因此分别将权重因子设置为 $C_1 = 0.1, C_2 = 0.3$ 及 $C_3 = 0.6$,最终优化后的参数如下:

$W_y = 1.08$ mm; $W_t = 2.22$ mm; $\theta = 101^\circ$; $r_1 = 8.30$ mm; $c_1 = 1.08$ mm; $L_y = 4.00$ mm; $D_t = 15.53$ mm (0.49λ)。

3 结果与分析

对优化结果进行实物加工,如图7所示。天线全长度 247.6 mm,宽度为 20.1 mm。中心导体和金属地板印刷在其中 1 块基板上,另 1 块基板一侧只印刷金属接地板,将第 2 块基板贴合组成天线。

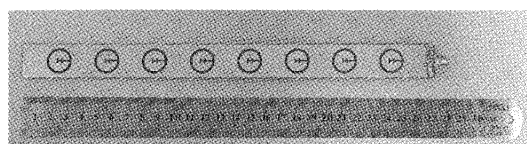


图7 天线实物

图8是天线实测和仿真的反射系数,可以看到,两曲线比较吻合,实测天线 $|S_{11}| < -10$ dB 的阻抗带宽为 7.93%

(5.56 GHz~6.02 GHz), 误差主要来源于 SMA 焊接部分以及工艺误差导致阻抗匹配变差。图 9 为微波暗室实际测试环境, 完成辐射方向图和增益的测量。

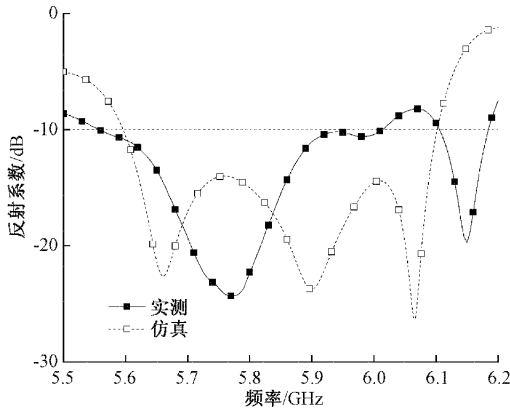


图 8 反射系数实测结果

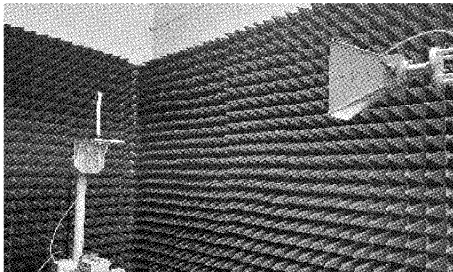
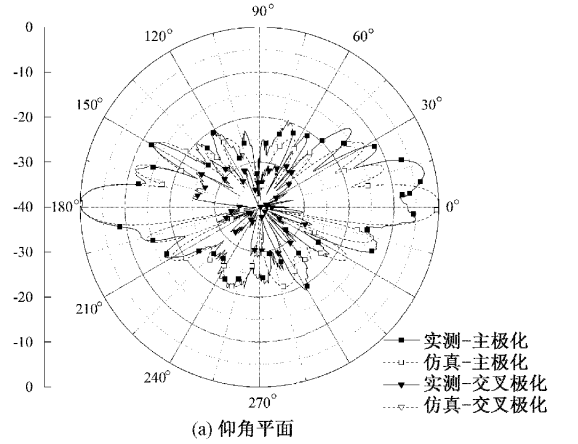
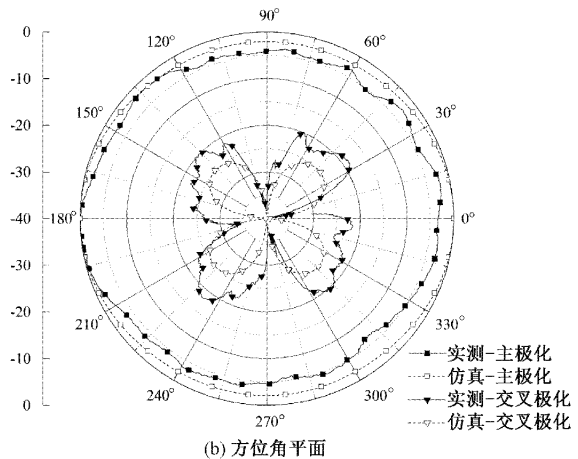


图 9 天线实际测试环境

图 10 为在 5.8 GHz 处仰角平面(E-plane)和方位角平面(H-plane)方向图。可以看出, 实测和仿真结果基本吻合, 在工作频率处最大增益为 9.98 dBi, E-plane 的波束宽度为 10.3°, 旁瓣比主瓣低 19.54 dB, 交叉极化低于 -18.20 dB。辐射方向图的主波束出现 6.61°偏转以及未达到峰值问题, 是由于两块基板在馈电口未精准对齐, 导致了两侧的缝隙不能同时激励, 因此, 两侧缝隙上的同相电流幅值出现较小的偏差, 从而导致上述误差。



(a) 仰角平面



(b) 方位角平面

图 10 5.8 GHz 处辐射方向图

将本文提出的缝隙结构与之前学者的研究成果相互对比, 同时对比了经典的缝隙结构, 如表 1 所示。本文提出的天线结构相比文献[13-15], 在保持 11.1 dBi 增益的同时, 带宽分别提升 4.02%、3.62%、1.21%。相比圆环、圆环 Y 结构, 带宽分别提升了 3.62%、2.82%。可以看出, 本文提出的缝隙结构在保持高增益特性的同时, 能够有效提升天线的带宽。这突出了本文所设计天线的创新性与优势。

表 1 不同缝隙单元阵列天线性能对比

缝隙单元	文献[13]	圆环	文献[14]	圆环 Y	文献[15]	圆环 Y-T
带宽/%	4.6	5	5	5.8	7.41	8.62
5.8 GHz 处增益/dBi	10	11	10.6	10.6	10.9	10.9
峰值增益/dBi	10	11	10.6	10.7	11.1	11.1
E 面主瓣倾角/(°)	-2~4	-1~5	-5~8	-1~5	-1~5	-2~5

图 11 为天线的实测和仿真增益曲线, 可以看出, 5.8 GHz 实测增益为 9.43 dBi, 出现 1.52 dBi 的误差, 这可能是由于天线加工以及测试环境导致的。天线在带宽

内相邻频点增益变化量低于 0.49 dBi。结果表明, 所提出的天线在工作频带内保持稳定的全向辐射性能。

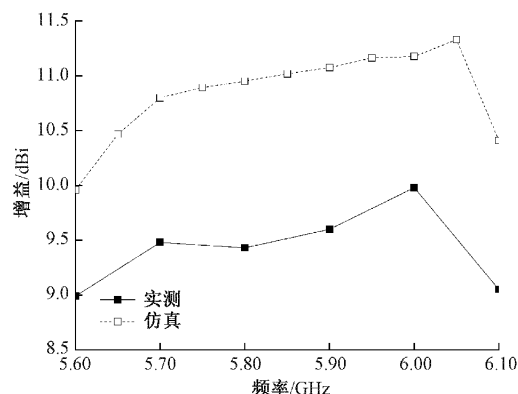


图11 天线实测和仿真的增益比较

4 结 论

本文设计了一种新型全向环形缝隙阵列天线。天线的辐射结构在圆环缝隙基础上加载 Y-T 形缝隙结构,改善了天线带宽。实测结果表明,天线 -10 dB 阻抗带宽为 7.93% (5.56~6.02 GHz),带宽内峰值增益均高于 8.99 dBi,且有较好的全向辐射性能。在 5.8 GHz 处,E 面旁瓣水平低于 -10.11 dB,峰值增益为 9.43 dBi。天线在水平面增益变化、交叉极化及不圆度等性能方面均有不错的表现。天线结构简单,体积小,易集成,具有极大的应用价值。

参考文献

- [1] HOSSEINI-FAHRAJI A, MANTEGHI M. Design of a broadband high-gain end-fed coaxial collinear antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(9):1770-1774.
- [2] CHEN X N, WEI Y M, LI Y X, et al. A gain-enhanced patch antenna with a periodic microstrip rampart line[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2022, 3: 83-88.
- [3] FAN T Q, JIANG B T, LIU R Z, et al. A novel double U-slot microstrip patch antenna design for low-profile and broad bandwidth applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(4):2543-2549.
- [4] WANG L, ZHANG Z M, EN Y F. Performance enhancement of broadband circularly polarized slot-microstrip antenna using parasitic elements[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(12): 2255-2259.
- [5] LI L, ZHANG X L, YIN X L, et al. A compact triple-band printed monopole antenna for WLAN/WiMAX applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1853-1855.
- [6] ZHANG Y J, LI Y. Scalable omnidirectional dual-polarized antenna using cavity and slot-dipole hybrid structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(6): 4215-4223.
- [7] ZHANG X H, DAI X W, SUN W, et al. Sleeve monopole antenna with choke structure for broadband application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(7):1230-1233.
- [8] 张石磊,叶明. 一种提高全向水平极化天线带宽的设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(3): 40-44.
- [9] 高原,孙兆锋,彭斌,等. 表面开槽的宽带遥测微带天线设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 14-17.
- [10] 李荣政,王沛. 低成本宽带高效率堆叠贴片天线[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 26-30.
- [11] 高明明,宋杨,南敬昌,等. 紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 149-156.
- [12] 张宁,张霞. 基于通信卫星的非对称圆环毫米波微带天线[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6): 79-82.
- [13] CHEN X, HUANG K M, XU X B. A novel planar slot array antenna with omnidirectional pattern[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(12): 4853-4857.
- [14] 曹源,刘宇峰,张骄,等. 一种基于 CSRR 结构的全向微带缝隙阵列天线设计[J]. 测试技术学报, 2021, 35(5): 456-460.
- [15] 刘宇峰,曹源,张骄,等. 一种全向环形缝隙阵列天线设计[J]. 测试技术学报, 2022, 36(3): 272-276.

作者简介

邢韶华,硕士研究生,主要研究方向为微带天线设计。

E-mail: sxuxing_shaohua@163.com

刘宇峰(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为天线设计、电磁场数值计算等。

E-mail: liuyufeng@sxu.edu.cn