

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2315056

基于 Koch 雪花分形结构的缝隙平面阵列天线设计^{*}

李昱邈 王慧珍 薛嘉璐 邢韶华 刘宇峰

(山西大学物理电子工程学院 太原 030006)

摘要: 本文提出了一种基于 Koch 雪花六边分形结构的缝隙单元,基于该分形单元设计了一款工作于 5.8 GHz 的 4×4 缝隙阵列天线。天线采用并行功分网络馈电,获得了高定向性、高增益特性。根据设计结果加工制作了天线样品并测试。测量结果表明,天线阻抗带宽 5.7% (5.56~5.89 GHz),阻抗匹配良好。在工作频率处,天线呈现良好的定向辐射特性和稳定增益,辐射增益达到 19.85 dBi,对应口径效率为 80.69%。3-dB 增益带宽达到 18.40% (5.13~6.20 GHz)。

关键词: 平面阵列天线; Koch 雪花分形; 并行馈电; 高增益

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

High-gain slot array antenna design utilizing Koch snowflake fractal structure

Li Yumiao Wang Huizhen Xue Jialu Xing Shaohua Liu Yufeng

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This paper presents a novel approach to the design of a 4×4 slot array antenna operating at 5.8 GHz, utilizing a slot element based on the Koch Snowflake hexagonal fractal structure. The antenna is fed by a parallel feeding network, resulting in characteristics of high directivity. The proposed design was experimentally validated through fabrication and testing. Measurement results indicate a 5.7% impedance bandwidth (5.56~5.89 GHz) with well-matched impedance. At the operating frequency, the antenna exhibits commendable directional radiation characteristics and stable gain, achieving a peak gain of 19.85 dBi and a corresponding aperture efficiency of 80.69%. Moreover, the 3-dB gain bandwidth extends to 18.40% (5.13~6.20 GHz), demonstrating the efficacy of the Koch Snowflake fractal structure in enhancing the performance of slot array antennas.

Keywords: planar array antenna; Koch snowflake fractal; broadband; high gain

0 引言

目前全球无线通信正在飞速发展,对天线的性能要求与日俱增。微带阵列天线因其重量轻、易加工、易集成等优点,引起国内外学者的广泛关注。文献[1]提出一种新型波束倾斜圆极化阵列天线,在工作频率处,天线增益达到 26.2 dBi,对应口径效率为 93.2%,但 3-dB 增益带宽仅为 6.7%。文献[2]采用双边短接的磁流馈入天线元件设计了一个双辐射器结构,从而扩展了天线的带宽。实验结果表明天线的阻抗带宽为 26.1% (9.11~11.84 GHz),但增益较低。文献[3]介绍了一种附带相位矫正结构的喇叭天线,通过在喇叭口径上刻蚀二次曲线来改善天线增益性能。文献[4]通过不均匀地刻蚀天线单元的两个横向槽的辐射贴片

片,以拓展天线带宽,实测结果表明天线的阻抗带宽达到 22% (25.1~31.3 GHz),3-dB 增益带宽为 27.9%。文献[2-4]与文献[1]相比,天线的带宽均有所改善,但天线增益都出现了不同程度的下降。文献[5]提出了一种双矩形开环贴片,采用双面平行带线(double-sided parallel strip line, DSPSL)结构和渐变式阻抗变换器实现等功分宽带阻抗匹配,实测结果表明天线的阻抗带宽可达 27.5% (3.41~4.51 GHz),最高增益为 13 dBi。文献[6]设计了一种轻薄的圆极化天线,采用单馈微扰法来设计天线的单元,在一定程度上减轻了由于薄基板带来的阻抗带宽窄的问题。加工实测后,其阻抗带宽为 4.0% (5.69~5.92 GHz)。文献[7]同样设计了一种高定向性微带天线,通过在贴片周围排布 3 只大小不同、带有金属化导电过孔的

收稿日期:2023-11-23

^{*} 基金项目:山西省高等学校大学生创新创业训练计划项目(S202210108030)资助

寄生贴片来拓展阻抗带宽。实测后,天线的阻抗带宽为 2.2% (5.74~5.86 GHz) 峰值增益为 8.0 dBi。文献[8]利用反射器和寄生贴片引入两个新的谐振频率来拓宽带宽,测试结果表明,该天线的带宽可达 41.9% (2.00~3.06 GHz),但最高增益仅为 7.3 dBi。文献[9]提出一种由 5 块 FR4 介质基板堆叠形成的宽带贴片天线,通过基板层引入空气腔来提升带宽。文献[10]提出了一种在天线贴片和地板上开槽来拓展带宽的方法。文献[11]通过扳手型微带馈线拓展天线带宽。文献[12]通过在 C 型贴片上添加缝隙和枝节来拓展天线带宽,实测表明天线阻抗带宽可达 46.1% (2.78~4.45 GHz),但增益在 3.3 dBi 附近。文献[13]也通过在天线 C 形贴片上切角和在接地板上增加微扰结构来拓展天线带宽。实测结果虽表明天线具有较宽的带宽,但峰值增益仅为 6 dBi。文献[14]提出一种顶部为 S 形倒枝节的圆极化天线,通过在微带线上加载矩形短截线来改善天线的阻抗带宽,实测结果表明天线实现了带宽性能,但峰值增益在 5 dB 以内。由此可见,天线的宽带宽和高增益互相矛盾,在卫星通信、导航遥测遥控和医疗器件等诸多领域中对天线的增益和带宽都有要求,因此设计一种新型的尽可能兼顾宽带宽和高增益的天线尤为重要。

本文设计了一款基于 Koch 雪花分形环缝隙单元结构天线阵列。通过将传统的三角缝隙环、六边缝隙环演变得到 Koch 雪花六边分形结构,基于该分形结构设计了一款高增益 4×4 平面微带缝隙阵列天线。测量结果表明,天线的 3-dB 增益带宽达到 18.40%,阻抗带宽为 5.7% (5.56~5.89 GHz),峰值增益为 19.85 dBi。

1 天线的结构与设计

1.1 缝隙单元设计

Koch 分形^[15]是最常见分形曲线,由瑞典数学家 Helge von Koch 提出,如图 1 所示。将分形结构应用于天线的设计,可实现结构小型化^[16]。本文所提出的天线阵列辐射单元采用 Koch 一阶六边分形演变后的结构,如图 2(b)所示。演变前六边形外切圆直径 $L \approx 0.36\lambda_0$, 其中是 λ_0 为 5.8 GHz 处的自由空间波长,演变后分形的每一个小边长度取 $L/6$ 。

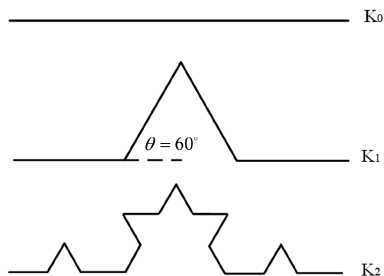


图 1 Koch 曲线的演变过程

采用上述提出的 Koch 分形演变,以基本图形三角形,六边形作为初始单元结构,将每一个边长进行三等分,将中

间 $1/3$ 边长用以该线段为边的等边三角形的两条边代替,演变过程如图 2 所示。本文选择图 2(b)中演变后的分形结构来设计辐射缝隙单元。

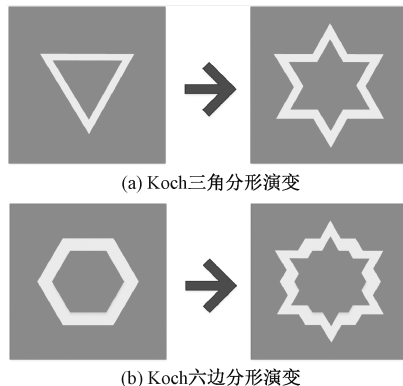
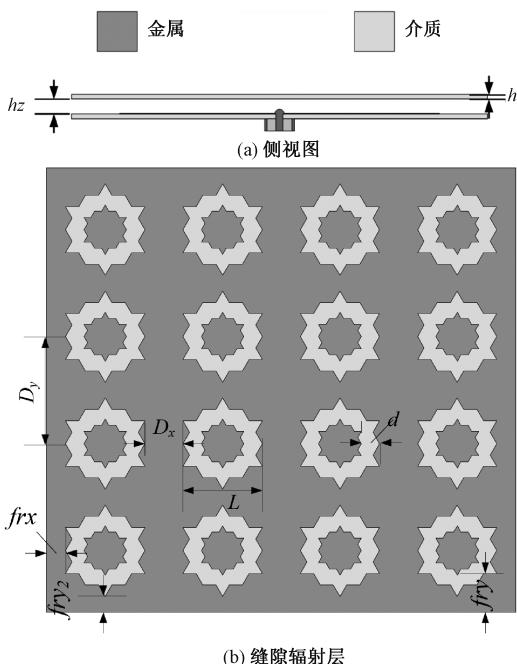


图 2 缝隙演变示意图

1.2 天线设计和工作原理

基于 Koch 分形缝隙单元设计了 4×4 平面微带阵列天线,如图 3 所示。

天线为双层平面结构,均印制于厚度 $h=2$ mm 介质基板上。基板材料选择聚四氟乙烯,介电常数 $\epsilon_r=2.65$ 。上层为缝隙辐射层,辐射单元为分形缝隙环,缝隙宽度为 d 。缝隙单元按等间距周期排列构成 4×4 阵列,单元水平方向间距为 D_x ,垂直方向间距为 D_y 。下层为并行馈电层。为了使天线获得良好的高增益辐射特性,需要对缝隙单元进行合理馈电。本文选取并行馈电网络,保证所有辐射单元能够被等幅同相激励。通过 T 型功分器结合阻抗变换枝节将端口电磁能量均匀分配到每个缝隙单元。为进一步拓展天线带宽,在双层结构中间构造厚度为 h_z 的空气层。



(b) 缝隙辐射层

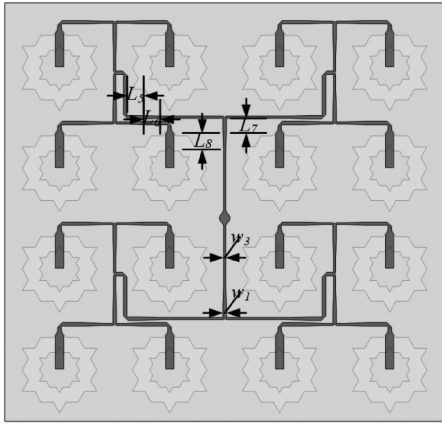


图 3 4×4 平面阵列天线结构示意图

2 参数分析

为进一步提升天线辐射性能,对所天线阵列的部分关键参数进行分析,选取最优值。

1) 单元间距 D_x 对天线性能的影响

以 0.2 mm 为步长进行参数扫描,得到阵列 $|S_{11}|$ 和增益曲线分别如图 4(a)和(b)所示。随着 D_x 减小,峰值增益向高频移动, $|S_{11}| < -10$ dB 阻抗带宽范围增大。在谐振点 5.8 GHz 处, $|S_{11}|$ 为 -40 dB, $|S_{11}| < -10$ dB 阻抗带宽为 10.75% (5.41~6.04 GHz)。为保证天线的最佳增益效果及工作频带增益的平稳度,最终取 $D_x = 17.01$ mm。

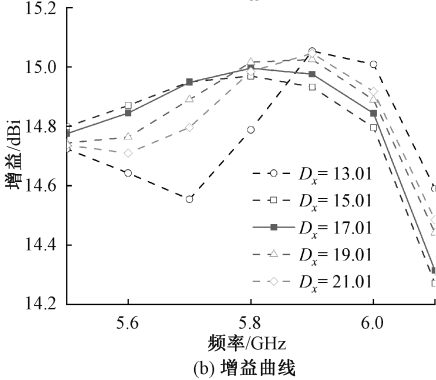
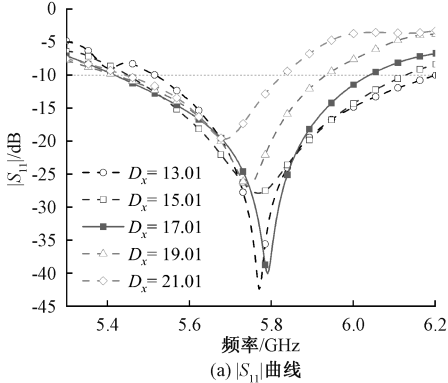


图 4 不同 D_x 对天线性能的影响

2) 单元缝隙间距 d 对天线性能的影响

以 0.2 mm 为步长进行参数扫描,得到阵列的 $|S_{11}|$ 和增益曲线分别如图 5(a)和(b)所示。随着间距 d 增大,谐振频率与增益曲线峰值向高频偏移。 $d = 4.22$ mm 时,谐振点为 5.8 GHz,且此时天线的增益也达到峰值,天线的增益也比较平稳,最终取 $d = 4.22$ mm。

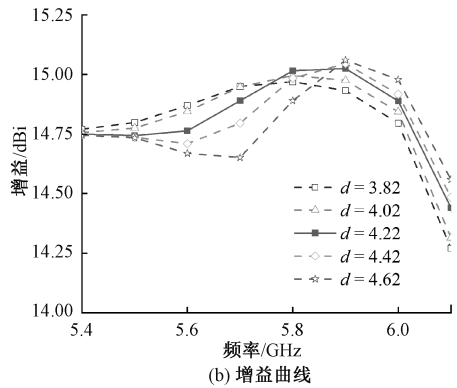
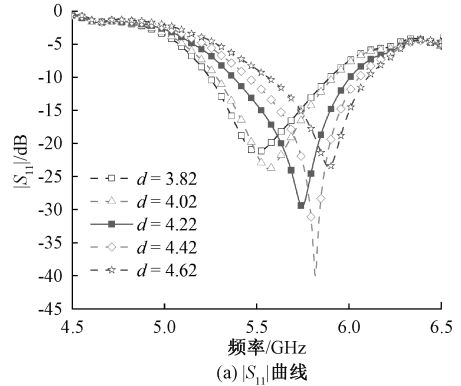
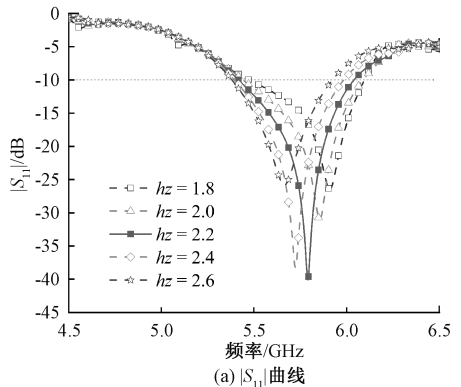


图 5 单元缝隙间距 d 对天线性能的影响

3) 基板空气层厚度 h_z 对天线性能的影响

以 0.2 mm 为步长进行参数扫描,得到阵列 $|S_{11}|$ 和增益曲线分别如图 6(a)和(b)所示。随着 h_z 的增大,谐振频点向低频偏移, h_z 取 2.2 mm 时,谐振点位于 5.8 GHz, $|S_{11}|$ 在 -40 dB 以下,增益曲线相对平稳,最终选取 $h_z = 2.2$ mm。根据参数扫描的结果及理论分析,综合考虑下,取天线最优参数如表 1 所示。



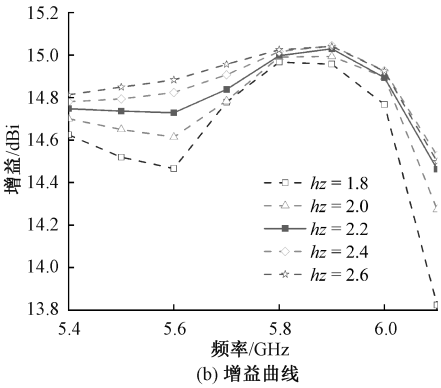


图 6 基板厚度对天线性能的影响

表 1 天线参数表

L	dl	frx	fr_y	fr_{y_1}	fr_{y_2}	D_x
29.0	6.7	6.9	12.6	5.6	3.3	13.9
D_y	W_1	W_2	W_3	L_1	L_2	L_3
39.2	2.3	1.4	0.8	11.8	1.6	2.2
hz	h	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
3.0	2.0	8.7	7.5	9.2	4.9	13.6



图 8 测试环境

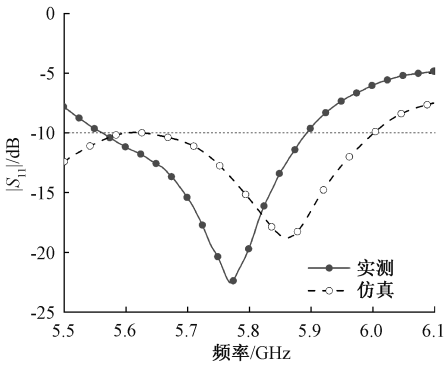


图 9 实测 S 参数与仿真结果对比

3 结果与分析

按照扫参分析得到的最优结构参数加工制作了天线样品,如图 7 所示。左侧部分是天线的辐射缝隙层,右侧部分是并行馈电网络层,两层介质板通过尼龙螺钉组装在一起。天线口径面积为 $174.7\text{ mm}\times165.9\text{ mm}(3.38\lambda_0\times3.21\lambda_0)$ 。

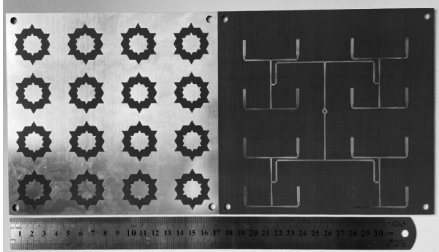
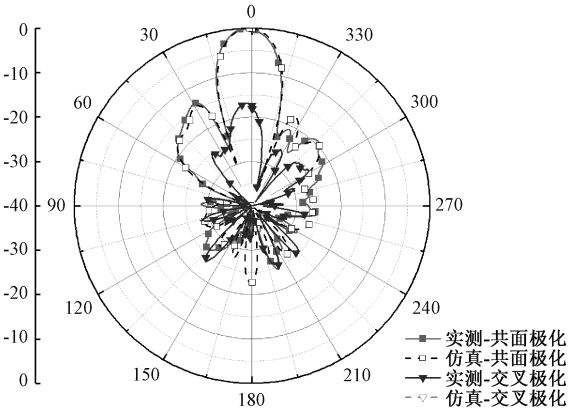


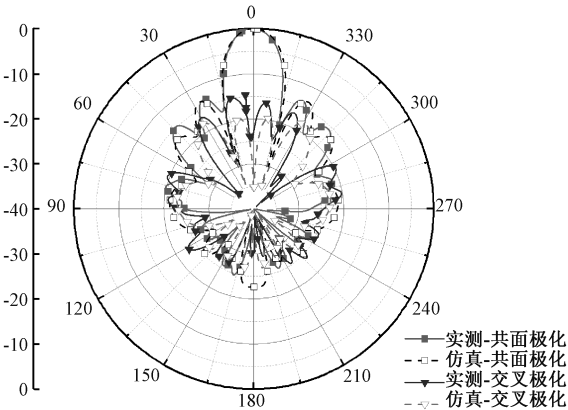
图 7 天线实物

将天线置于微波暗室中进行测试,测试环境如图 8 所示。采用 AGLIENT E8326B 矢量网络分析仪测量天线的反射系数,将实测与仿真测得的 S 参数对比,如图 9 所示。天线实测 $|S_{11}|<-10\text{ dB}$ 的阻抗带宽为 5.7% ($5.56\sim5.89\text{ GHz}$)。相比较仿真结果,天线实测谐振频率向低频偏移 100 MHz 左右,主要误差原因是由于天线加工误差和以及介质基板介电常数误差所导致的。

测试 5.8 GHz 时天线在 E 面和 H 面的归一化辐射方向图,测试结果分别如图 10(a)和(b)所示,天线的增益达到 19.85 dBi ,副瓣电平均低于 -13.91 dB ,交叉极化低于 -17.31 dB 。实测与仿真结果吻合较好,天线具有良好的高增益定向性能。



(a) E面



(b) H面

图 10 5.8 GHz 处天线仿真与测试方向图

实测与仿真增益曲线对比如图 11 所示,实测增益比仿真结果降低 0.2~1.1 dB,主要是由于馈电网络和辐射缝隙层的欧姆损耗以及介质基板的介质损耗所导致。在 5.8 GHz 处,天线的增益达到 19.85 dBi,副瓣-13.91 dBi,结果表示天线可以满足应用需求。

本文所设计的天线与已有部分天线主要性能对比如表 2(表中 λ_0 为各个天线中心频率处的自由空间波长)所示。工作频段位于 5.8 GHz 附近的高增益天线带宽一般在 1%~6%左右。相比文献[4],本文所设计的天线增益较高,且旁瓣小,在天线尺寸上也有一定缩减。与文献[6]相比,在保持高增益的同时,带宽提升了 1.7%。与文献[7]相比,带宽提升了 3.5%。可以看出,本文所提出的天线在保持高增益的同时,有效拓宽了天线带宽。这突出

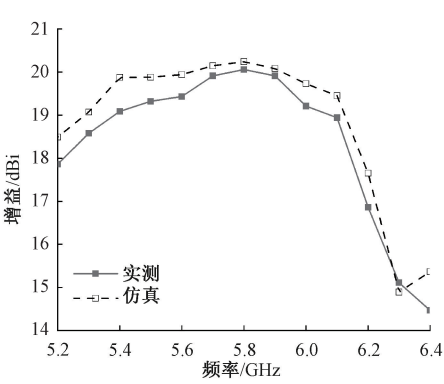


图 11 天线仿真与实测增益曲线

了本文所设计的 Koch 分型结构天线的创新点与优势。

表 2 本文设计天线和已有部分天线主要性能对比

对比天线	工作频段/ GHz	阻抗带宽/ %	峰值增益/ dBi	天线尺寸/mm ²	旁瓣大小/ dBi
文献[4]	25.1~31.3	22	14.6	35×80(3.31 λ_0 ×7.52 λ_0)	-10.7
文献[5]	3.41~4.51	27.5	13.0	110×180(1.47 λ_0 ×2.40 λ_0)	-18.5
文献[6]	5.69~5.92	4.0	23.7	250×250(4.84 λ_0 ×4.84 λ_0)	-12.5
文献[7]	5.74~5.86	2.2	20.4	165×179(3.18 λ_0 ×3.46 λ_0)	
本文	5.56~5.89	5.7	19.85	175×166(3.38 λ_0 ×3.21 λ_0)	-13.9

4 结 论

本文最终设计了一个谐振频率位于 5.8 GHz 处的 4×4 Koch 六边分形环缝隙阵列天线,将仿真结果和实测结果对比,可体现出二者具有良好的吻合性,满足了实际应用中所需的宽带、高增益的需求,最终天线的增益可达 19.85 dBi,天线的 3-dB 增益带宽达到 18.40%(5.13~6.20 GHz), $|S_{11}|<-10$ dB 阻抗带宽达到 5.7%(5.56~5.89 GHz)。未来,无线通信、雷达探测和航空航天、医学等领域的不断发展,对天线的要求也随之提高,本设计天线结构简单、体积小、定向性好,在兼顾带宽的同时尽可能提高了天线的增益,可应用到对天线有高增益、宽带等高性能要求的卫星通信中。

参考文献

[1] NISHAT Y K, AFZAL M U, ESSELLE K P. Increasing the gain of beam-tilted circularly polarized radial line slot array antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70 (6): 4392-4403.

[2] WANG B N, ZHAO Z Q, SUN K. Wideband series-fed microstrip patch antenna array with flat gain based

on magnetic current feeding technology [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(4): 834-838.

[3] YAN N N, JI C S, LUO Y. Wideband and miniaturized phase-corrected empty substrate-integrated h-plane horn antenna for 5G millimeter waves [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(9): 7638-7643.

[4] MA W Y, CAO W Q, HONG R T, et al. Planar broadband higher-order mode millimeter-wave microstrip patch antenna array with low sidelobe level[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(12): 2225-2229.

[5] 朱熙铨, 陶正壮, 肖凌峰. 一种宽带圆极化环形天线[J]. 电子元件与材料, 2022, 41(11): 1215-1221.

[6] 夏金萍, 陈星. 一种轻薄圆极化阵列天线设计[J]. 信息技术与信息化, 2023(4): 176-179.

[7] 蔡青, 陈星. 一种轻薄微带定向天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(3):418-421.

[8] CHEN C L. A compact wideband endfire filtering

- antenna inspired by a uniplanar microstrip antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(4): 853-857.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] 卢勇杰, 单志勇, 王亚飞. 小型宽频圆极化天线的设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(24):23-26.
- [13] 李振亚, 竺小松, 张建华. 一种新颖的宽带圆极化单极天线[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2705-2711.
- [14] 王志强, 段玥晨, 周鹏. 基于倒 S 形枝节的宽带圆极化天线设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(21):37-42.
- [15] KOCH H. Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction geometrique elementaire[J]. Arkiv for Matematik, 1904, 1: 681-704.
- [16] 张广海. 基于分形结构的多频与宽带天线技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2021.

作者简介

李昱邈, 本科, 主要研究方向为微带阵列天线设计。

E-mail:18536203377@163.com

王慧珍, 本科, 主要研究方向为微带阵列天线设计。

E-mail:16634268538@163.com

薛嘉璐, 本科, 主要研究方向为微带阵列天线设计。

E-mail:19935104309@163.com

邢韶华, 硕士研究生, 主要研究方向为微带天线设计。

E-mail:rhyme.xing@gmail.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