

基于类Minkowski-Like分形结构的5G宽带阵列天线

王泽敏¹, 逯暄^{1*}, 彭甫镛², 张婷¹

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006; 2. 山西大学 大数据科学与产业研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 为满足5G通信需求, 设计了一款基于类Minkowski分形结构的宽带阵列天线。阵列天线采用厚度为1.2 mm、介电常数为4.4的FR4介质基板, 整体尺寸360 mm×158 mm。天线由4个阵元线性排列而成, 阵元的微带贴片上刻蚀了2阶类Minkowski分形结构, 将一分二威尔金森功分器平移复制转换为一分四功分器, 各输出端口分别为1×4排列的各阵元馈电, 接地面采用多个切角的矩形相连。阵列天线工作于1~6 GHz频段, 增益达2~9.18 dB, 满足全向辐射特性。HFSS仿真与实测结果验证了设计的准确性和实用性。这一成果展示了分形阵列天线在多频带操作和宽带应用中的潜力, 为5G及更高频段通信技术的天线设计提供了理论和实践依据。

关键词: 5G通信; 类Minkowski分形结构; 阵列天线; 威尔金森功分器; 宽带天线

中图分类号: TN822+.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025023

引用格式: 王泽敏, 逯暄, 彭甫镛, 等. 基于类Minkowski-Like分形结构的5G宽带阵列天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 247-254.

WANG Zemin, LU Xuan, PENG Furong, et al. A broadband array antenna for 5G based on minkowski-like fractal structure[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 247-254.

A Broadband Array Antenna for 5G Based on Minkowski-Like Fractal Structure

WANG Zemin¹, LU Xuan^{1*}, PENG Furong², ZHANG Ting¹

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

2. Institute of Big Data Science and Industry, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To meet the demands of 5G communications, a broadband array antenna based on a Minkowski-like fractal structure has been designed. A 1.2 mm thick FR4 substrate with a dielectric constant of 4.4 and overall dimensions of 360 mm×158 mm are utilized in the array antenna. Comprising four linearly arranged elements, each microstrip patch element of the array is etched with a 2nd-order Minkowski-like fractal structure. A Wilkinson power divider that splits one input into two outputs is replicated and transformed into a 1-to-4 power divider with each output feeding one of the 1×4 arranged elements. The ground plane is formed by connecting multiple rectangles with cut corners. The array antenna operates within the 1~6 GHz frequency range, achieving gains from 2~9.18 dB and omnidirectional radiation characteristics. HFSS simulations and measurement results verified the accuracy and practicality of the design. This research demonstrates the potential of fractal array antennas in multi-band operation and broadband applications, providing both theoretical and practical foundations for antenna design in 5G and higher frequency communications technologies.

收稿日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(62276162); 山西省基础研究计划资助项目(202203021222016)

作者简介: 王泽敏(1998-), 男, 硕士生, 主要从事5G天线研究。E-mail: 623809628@qq.com。

*通信作者: 逯暄(1987-), 女, 副教授, 博士, 主要从事电子信息工程研究。E-mail: xuanlu@sxu.edu.cn。

Key words: 5G communication; Minkowski-like fractal structure; array antenna; Wilkinson power divider; broadband antenna

0 引言

随着第五代移动通信技术(5G)的快速发展,现代社会对高速、高可靠性通信的需求日益迫切。然而,当前5G频段的应用在某些场景中可能面临一定的局限性,难以充分满足物联网、车辆通信系统、无人机操作及应急通信等领域的多样化需求^[1-2]。因此,设计一种能够支持5G频段并提供宽带覆盖的天线成为满足这些多样化应用需求的关键。

利用分形结构的自相似性和空间填充特性,可以实现天线的多频段操作和宽带特性。简单的迭代过程能够生成复杂的边界,从而在天线上形成多个谐振点,有效延长电流传输路径,增加天线的辐射电阻,最终扩展带宽并提升天线性能。目前,常用的分形天线设计包括Koch分形、Sierpinski分形以及Minkowski分形等^[3-8]。唐蒙等^[3]通过在天线缝隙边缘引入Koch分形结构,增加了天线的边界长度和自相似性,实现了1.4~5.8 GHz的宽带特性。Marzouk等^[4]基于三角形的Sierpinski分形天线,通过多次迭代,在1~6 GHz频段内产生5个工作频段,使天线具有多频特性。Rashid等^[5]采用五边形的Sierpinski分形结构,并对其改进,实现了天线在2.58~4.15 GHz和5.13~7.53 GHz频段内的双频谐振。Wang等^[6]采用指数递增的不规则Minkowski分形天线,在10 GHz以下获得了6个谐振模式,使天线能够在多个频段内工作。Vallappil^[7]采用Minkowski-Sierpinski分形,并配置2×2阵列结构,使其在4.13~4.22 GHz和5.88~6.06 GHz频段内实现双频工作。唐震等^[8]对Minkowski分形几何结构进行改进,并结合共面波导馈电方式,实现在0.93~3.02 GHz的宽带内工作。阵列天线将多个天线单元组成一个整体系统,各单元天线的辐射共同作用,形成更强的信号。这种结构不仅能够提高增益、扩展带宽,还可以通过波束成形技术灵活控制辐射方向,提高系统可靠性并减少干扰。常见的阵列天线包括串联结构和并联结构,将单元天线组成阵列^[9-11],通过每个单元之间的协调工作及电磁耦合,可以相对扩展带宽和提高增益。例如, Mohammadi等^[9]选用具有较高相对介电常数的基板,采用1×4阵列结构,在2.45 GHz频率处获得11 dBi的高增益; Surjati等^[10]采用1×2阵列结构,有效提升了天线的带宽和增益,

在10.85 GHz频率处的增益达到8.12 dBi,带宽扩展至1.703 GHz,满足了高带宽通信的需求; Singh等^[11]使用高性能罗杰斯材料,并通过1×4阵列结构设计,在5G高频段获得了10.83 dBi的高增益,确保了在高速率通信中的优异表现。这些技术使天线在5G和其他无线通信系统中具有卓越的应用潜力,能够支持高数据传输速率和多种通信标准。

综合考虑,本文设计了一种基于类Minkowski分形结构的5G宽带阵列天线,采用分形和阵列技术实现了对天线带宽的扩展。

1 天线结构设计

本文设计的阵列天线如图1所示。采用厚度1.2 mm、介电常数4.4的FR4作为介质基板,整体尺寸为360 mm×158 mm,具体尺寸见表1。

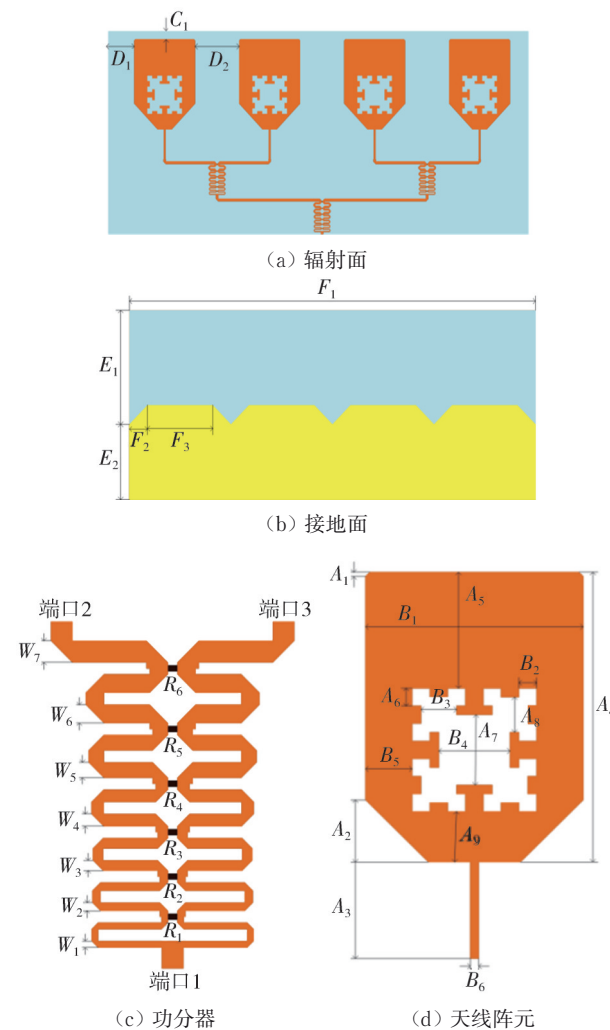


图1 阵列天线结构

Fig. 1 Design of the antenna arrays

表 1 天线阵列的各部分尺寸

Tab. 1 Dimensions of the antenna array

参数	值/mm	参数	值/mm
C_1	6.5	E_2	63
D_1	19	F_1	360
D_2	38	F_2	16
E_1	95	F_3	58

天线工作于 1~6 GHz, 实现了全向辐射特性。将一分二威尔金森功分器平移复制转换为一分四功分器, 各输出端口分别连接到线性排列的 4 个天线阵元完成馈电; 天线阵元的微带贴片上刻蚀了 2 阶类 Minkowski 分形结构, 并通过并联布局提升天线辐射性能; 接地面采用多个矩形切角相连, 使电流在接地面上的分布更加均匀, 改善天线在带宽、阻抗匹配和辐射效率等方面的特性。

1.1 威尔金森功分器

馈电系统采用一分二威尔金森功分网络, 主要作用包括: 1) 提供高效的功率分配和均匀的信号传输; 2) 提高天线阵元之间的隔离度; 3) 保证天线阵元的输入阻抗匹配; 4) 扩展天线带宽, 适应多种不同的通信标准和频率要求^[12-15]; 5) 简化阵列的设计和优化过程。

本文设计的威尔金森功分器如图 1(c) 所示, 整体尺寸为 20.6 mm×29 mm。每一级阻抗转换采用 TxLine 工具转换为微带线的长度和宽度; 两个端口之间配置 6 个隔离电阻, 优化功率分配的性能, 提高端口之间的隔离度。最后, 利用 HFSS 软件对功分器进行仿真和优化, 微调微带线长和线宽, 使得各个端口的信号等幅且同相。功分器的具体参数见表 2 和表 3。

表 2 功分器的各部分尺寸

Tab. 2 Dimensions of the power divider

参数	值/mm	参数	值/mm
W_1	0.54	W_5	1.29
W_2	0.68	W_6	1.54
W_3	0.86	W_7	1.81
W_4	1.03		

表 3 功分器的电阻值

Tab. 3 Resistance value of the power divider

参数	值/ Ω	参数	值/ Ω
R_1	100	R_4	330
R_2	130	R_5	430
R_3	240	R_6	715

1.2 类 Minkowski 分形天线阵元

本文设计的扩展型类 Minkowski 分形天线的分形变化如图 2 所示。在图 2(a) 所示的原始矩形基础上, 用尺寸缩小一半的矩形替换原始矩形的四个角, 形成如图 2(b) 所示的 1 阶分形结构; 然后, 对这 4 个新增的矩形做相同的处理, 生成 2 阶类 Minkowski 分形结构, 如图 2(c) 所示。

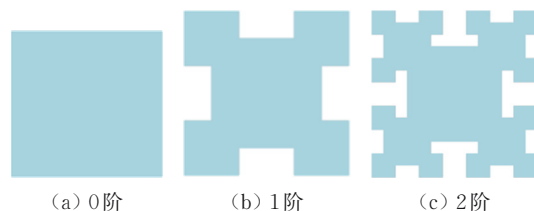


图 2 类 Minkowski 分形结构

Fig. 2 Minkowski-like fractal structure transformation

在分形结构向外迭代的过程中, 将会产生多个尺寸的边缘。这些尺寸的差异将延长电流的传输路径, 增加天线的辐射电阻, 并在天线上产生多个谐振点, 增强天线的宽带特性。

本文设计的类 Minkowski 分形天线阵元整体尺寸为 52 mm×93.5 mm。如图 1(d) 所示, 天线阵元由一条矩形馈线和一个经过切角处理的矩形金属贴片构成。在金属贴片中心刻蚀了 2 阶类 Minkowski 分形结构, 通过改变表面电流路径优化天线的阻抗匹配, 使天线具有多频工作的特性。

首先根据微带线理论计算出天线的初步尺寸^[6]。辐射贴片的宽度 w 计算为

$$w = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (1)$$

辐射贴片长度 l 为

$$l = \frac{\lambda_c}{2} \quad (2)$$

式中: λ_c 为介质中导波的波长,

$$\lambda_c = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_c}} \quad (3)$$

ϵ_c 为有效介电常数

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

式中: c 为光在真空中的传播速度, 3×10^8 m/s; f 为工作频率; ϵ_r 为相对介电常数; h 为介质基板厚度。然后在 HFSS 中进行仿真, 优化出最终的尺寸, 如表 4 所示。

表4 天线阵元的各部分尺寸

Tab. 4 Dimensions of each part of the antenna unit

参数	值/mm	参数	值/mm
A_1	1.00	A_9	12.02
A_2	20.00	B_1	52.00
A_3	23.50	B_2	4.25
A_4	70.00	B_3	8.50
A_5	28.24	B_4	17.00
A_6	4.25	B_5	11.13
A_7	17.00	B_6	1.20
A_8	8.50		

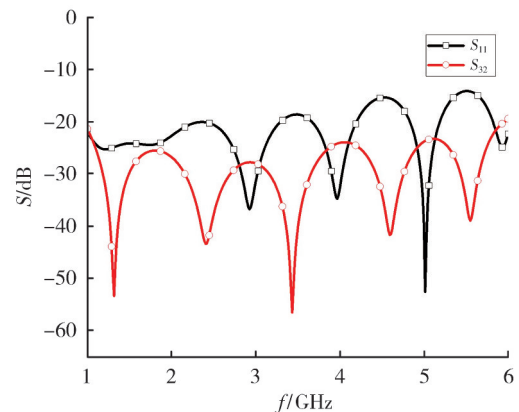
1.3 天线阵列设计

阵列的阵元数量及排列方式是影响天线性能的重要因素。在典型直线阵列天线中,阵元通常具有相同的形状和大小,通过串联布局,每个单元的辐射相互叠加,可以提升天线的辐射性能。根据阵列天线的功率计算关系可知,天线阵元数量每增加一倍,理论上天线增益可提升3 dB^[16]。鉴于设计目标是实现5 dB左右的增益,再考虑阵元间的互耦效应、加工损耗等实际因素,确定阵元数量为4,呈等间距排列。较小间距可能导致阵元间的干扰加剧,而较大间距则可能引起副瓣的增多,通常阵元间距选取半个波长到一个波长之间。结合理论分析与HFSS仿真,本设计的阵元间距为38 mm,以优化天线性能。

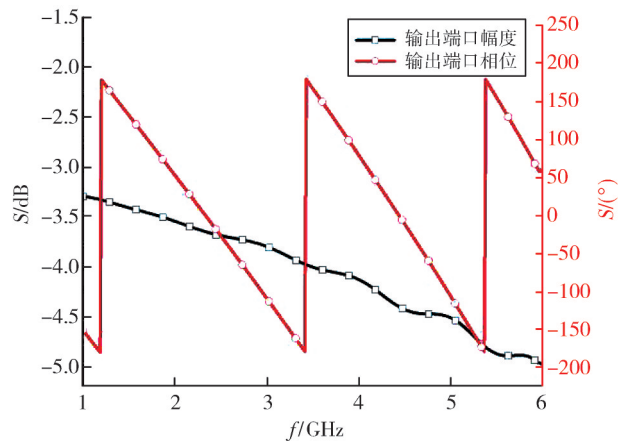
2 天线的性能分析

2.1 馈电网络

由于本文的威尔金森一分四功分器是由一分二功分器复制而来,本节仅对一分二功分器进行仿真,结果如图3所示。其中,图3(a)为输入端口1的回波损耗及输出端口2与端口3的隔离度,由图可知,在1~6 GHz频段内,反射损耗 S_{11} 均小于-10 dB,输出端口2与端口3之间的隔离度 S_{32} 均小于-20 dB,表明输入端口阻抗匹配良好,输出端口耦合度较低。图3(b)为端口2和端口3的幅度及相位,由于该功分器完全对称,端口2和端口3的输出幅度与相位都基本重合,表明功率分配等幅同相,并且经过功分器后也未发生相位扭曲。仿真结果表明,本文设计的威尔金森功分器保持了天线的辐射模式,有助于改善信号的质量和可靠性;并且在天线系统的设计和调试中,减少了对相位的调整和控制需求,简化了设计流程。



(a) 输入端口1的回波损耗与输出端口2、3间的隔离度



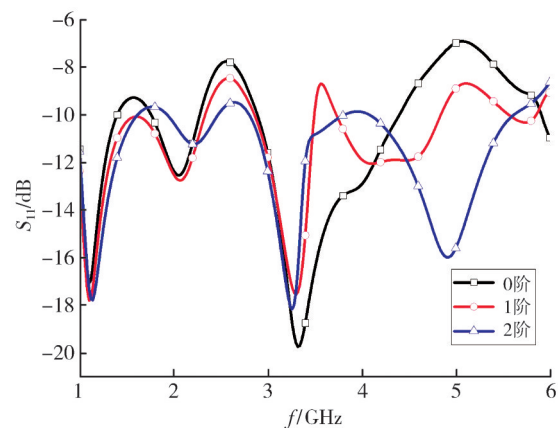
(b) 输出端口的幅度与相位

图3 功分器的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the power divider

2.2 天线阵元

图4为分形天线0阶、1阶、2阶的 S_{11} 参数仿真图。

图4 分形天线的 S_{11} 参数Fig. 4 S_{11} parameter of the fractal antenna

由图4可知,随着分形阶数的增加,天线带宽也得到一定的扩展,2阶分形的带宽最宽,天线在1~1.61 GHz、1.94~2.47 GHz、2.81~3.79 GHz以及4.11~5.61 GHz 4个频段中的反射系数 S_{11} 均低于

-10 dB, 表明天线阵元在这些频段具有良好的阻抗匹配和较低的反射率; 分形结构使天线在多个频率点产生谐振, 支持多频段操作。考虑到设计与制作过程的复杂程度, 最终选用 2 阶分形作为天线单元。

2.3 天线阵列

图 5 展示了天线阵列关键参数 A_2 、 A_9 和 F_2 在不同值下的仿真结果。 A_2 为天线单元下边缘的切角尺寸, A_9 为分形槽与贴片边缘的距离, F_2 为接地板的切角尺寸。

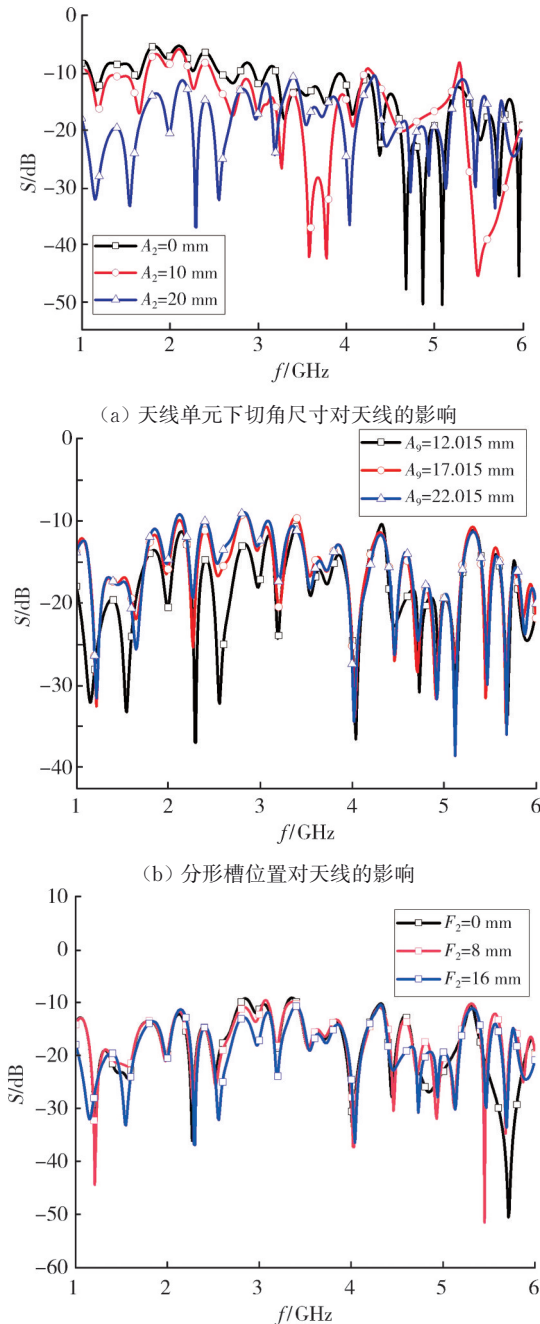


图 5 天线阵列的关键参数分析
Fig. 5 Analysis of the key parameters of antenna arrays

如图 5(a) 所示, 随着 A_2 值的增大, 在 1~4.5 GHz 频段内的反射系数明显降低; 图 5(b) 表明, 随着 A_9 值的减小, 1~4 GHz 频段的反射系数显著下降; 图 5(c) 显示, 随着 F_2 尺寸的增大, 2.5~3.5 GHz 频段的反射系数有所降低。最终选取 $A_2=20$ mm、 $A_9=12.015$ mm 和 $F_2=16$ mm, 天线在 1~6 GHz 频段内的 S_{11} 值整体低于 -10 dB, 显著扩大了带宽范围。

图 6 给出了分形天线阵元与阵列的 S_{11} 参数仿真结果。可以看出, 将分形天线阵元按 1×4 排列为线性阵列并由功分器馈电, 可维持 1~6 GHz 通带内的 S_{11} 低于 -10 dB, 其优良的阻抗匹配与宽带特性适用于 5G 通信系统。

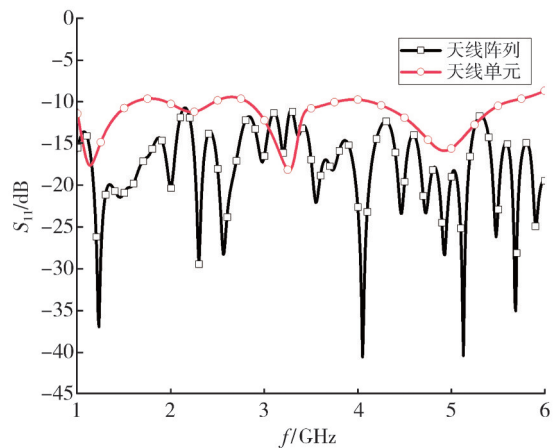


图 6 天线单元与阵列的 S_{11} 参数
Fig. 6 S_{11} parameter of the antenna element and array

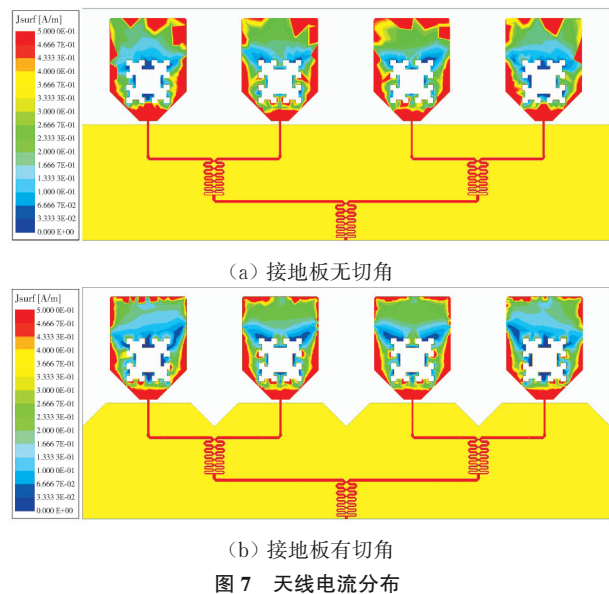


图 7 天线电流分布
Fig. 7 Current distribution of the antenna

图 7 为接地板切角前后天线电流分布图的仿真结果, 可以看出电流密度较高的区域主要集中在

在天线单元的边缘;电流密度较低的区域均匀地分布在天线单元内分形挖槽的位置,电流从馈电点向外均匀过渡。在有切角的接地板设计下,电流分布表现出更加均匀的特征。如图7中所示,电流在天线中部和边缘区域之间的分布较为平滑,没有出现急剧的电流密度变化,且电流密度没有明显地集中在某一特定区域,电流从馈电点向外过渡平滑,各天线单元内部的电流密度变化较为一致。这种均匀的电流分布有助于提高天线的辐射性能,减少边缘效应并提升天线的全向辐射特性。

3 天线的实测结果

根据设计制作的天线实物如图8所示,在1~6 GHz对天线实物进行测量,实测的 $|S_{11}|$ 、增益、方向图与仿真对比如图9和图10所示。由图可知:

1) 实测 S_{11} 在1~6 GHz基本小于-10 dB,表明天线与其馈线系统之间的阻抗匹配良好,符合宽带天线的设计要求。

2) 在1、3与5 GHz的测量频点处,天线的实测方向图与仿真结果基本一致。E面方向图呈“8”字形,H面则近乎圆形,表明该天线具有全向的辐射性能。

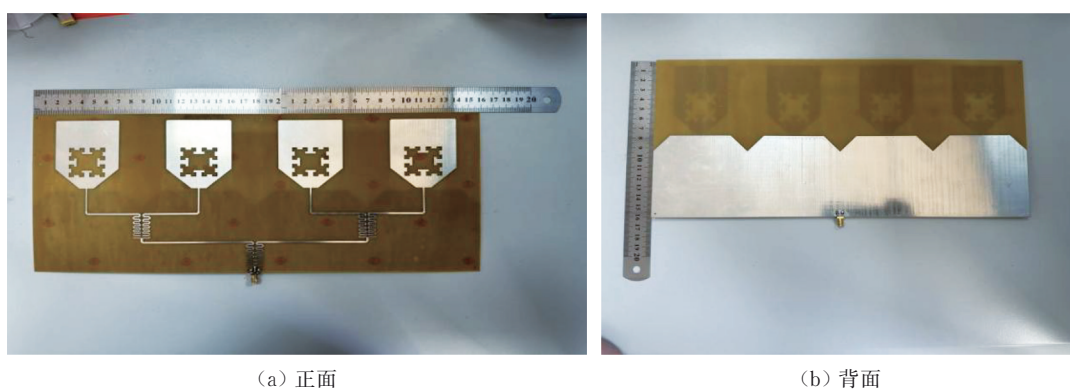


图8 天线实物图

Fig. 8 Photograph of the antenna

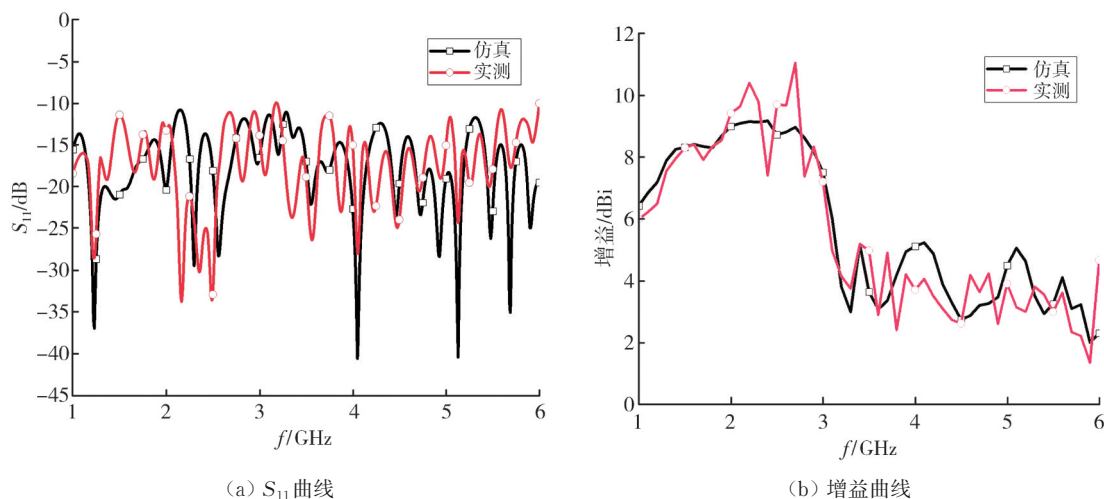


图9 天线的仿真与实测性能对比

Fig. 9 Comparison of simulated and measured antenna performance

3) 实测增益与仿真结果基本吻合。由于介质基板为FR4,天线损耗在3 GHz以上的频段明显升高。

4) 由于加工、测量等误差以及天线接头产生的损耗,导致实测相对于仿真略有偏移,但不影响正常使用。

表5对比了本文天线与参考文献同类型天线

的性能,可以看出本文天线具有更宽的工作频带以及更高的增益。

综上所述,本文设计的基于类Minkowski分形结构的阵列天线在1~6 GHz的宽带范围内阻抗匹配良好,具有全向的辐射性能,满足5G通信的使用需求。

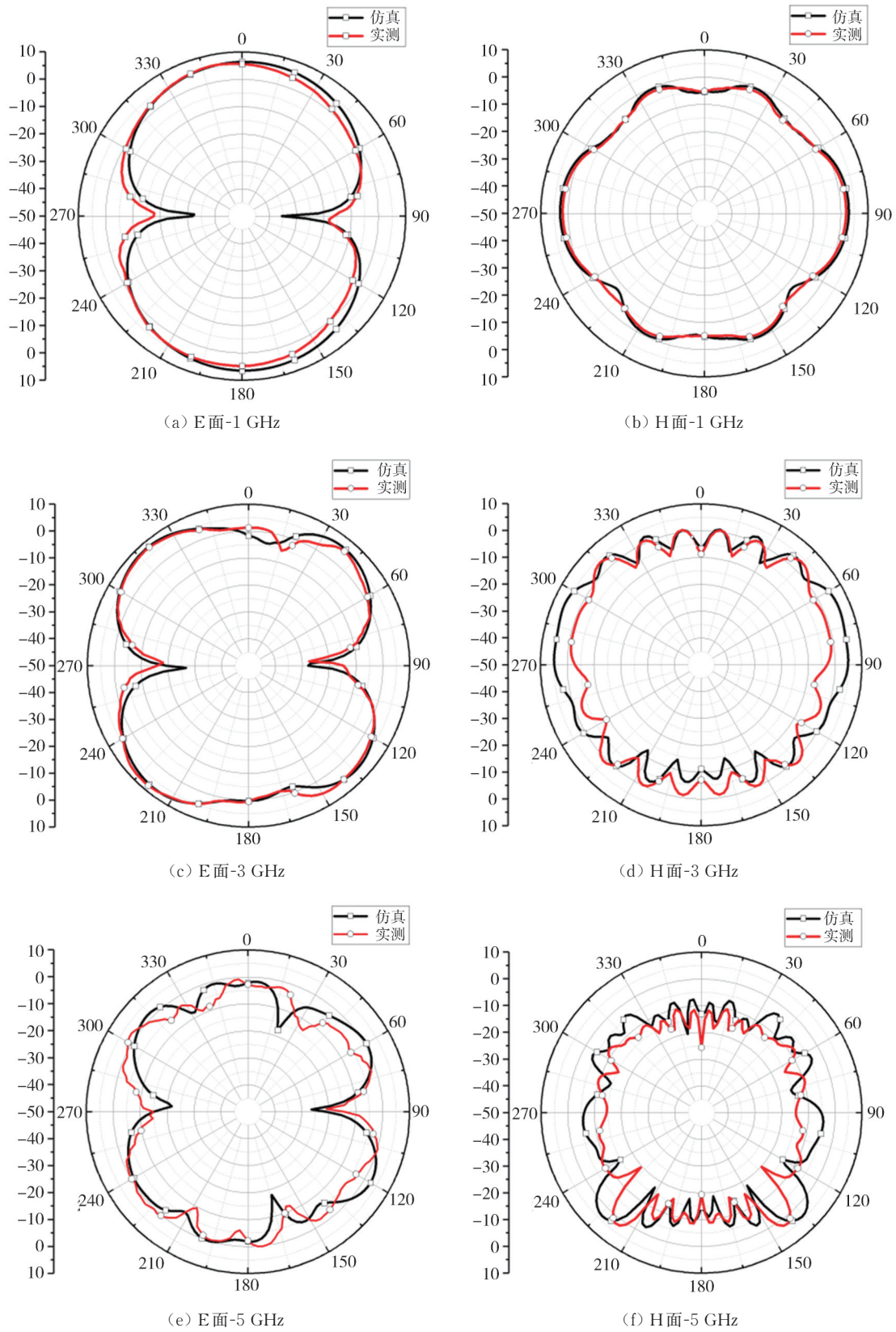


图 10 天线的仿真与实测方向图对比

Fig. 10 Comparison of simulated and measured radiation patterns of the antenna

表5 与其他天线的性能比较

Tab. 5 Performance comparison of other antennas

来源	相对带宽/%	最大增益/dBi	尺寸/mm
文献[2]	8.06、11.11、13.33	7.2	25×25×1
文献[3]	122.22	5.05	90×90×1.6
文献[4]	2.19、2.15、2.72、 4.61、4.26	6.01	75×75×1.5
文献[5]	46.67、37.91	4.86	35×35×1.6
文献[6]	24.14、25.14、8.49、 10.06、5.72、8.15	4.1	37.8×23.8×1
本文	157.81	9.18	360×158×1.2

4 结论

本文设计了一款基于类Minkowski分形结构的5G宽带阵列天线。使用威尔金森功分器为各个阵元提供均匀的功率分配和相位一致性,同时保证了端口间的良好隔离和幅度平衡。类Minkowski分形结构产生的多尺寸边缘使天线产生了多个谐振点,增强了天线的宽带特性,实现了1~6 GHz的全向辐射性能,最高增益达9.2 dB。仿真与实测结果验证了本文天线符合设计预期,显示出其在5G通信技术中的实用性和有效性。

参考文献:

- [1] RANI T, DAS S C, HOSSEN M S, et al. Development of a broadband antenna for 5G sub-6 GHz cellular and IIoT smart automation applications [C]//2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2022: 465-468.
- [2] AMSAVENI A, BHARATHI M. Multiband fractal antenna for 5G and IoT applications [C]//2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA), 2023: 1-5.
- [3] 唐蒙, 辛泽辉, 任青颖, 等. 一种5G频段高性能宽频带缝隙天线的设计[J]. 微电子学, 2022, 52(3): 367-371. TANG Meng, XIN Zehui, REN Qingying, et al. Design of a 5G high performance wide band slot antenna[J]. Microelectronics, 2022, 52(3): 367-371. (in Chinese)
- [4] MARZOUK M, NEJDI I H, RHAZI Y, et al. A new multi-band fractal antenna using a triangular measured on the 1 GHz to 6 GHz band [C]//2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), 2022: 1-5.
- [5] AB RASHID A H, HASSAN N, AHMAD B H, et al. Dual band CPW pentagonal island with modified Sierpinski gasket structure at 3.5 GHz and 5.8 GHz [C]//2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2023: 1-2.
- [6] WANG C, CAO X, LI W, et al. A novel exponentially increased irregular minkowski fractal antenna [C]//2022 IEEE USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), 2022: 21-22.
- [7] VALLAPPIL A K, KHAWAJA B A, RAHIM M K, et al. Minkowski-sierpinski fractal structure-inspired 2 × 2 antenna array for use in next-generation wireless systems [J]. Fractal and Fractional, 2023, 7(2): 158.
- [8] 唐震, 汪立新, 汤天宇. 类Minkowski分形天线的分析与设计[J]. 电子技术应用, 2019, 45(7): 77-80. TANG Zhen, WANG Lixin, TANG Tianyu, et al. Analysis and design of minkowski-like fractal antennas [J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(7): 77-80. (in Chinese)
- [9] MOHAMMADI SHIRKOLAEI M, DALILI OSKOEI H R, ABBASI M. Design of 1*4 microstrip antenna array on the human thigh with gain enhancement [J]. IETE Journal of Research, 2023, 69(9): 5944-5950.
- [10] SURJATI I, ALAM S, SARI L, et al. Circular polarization microstrip antenna array 1 × 2 for microwave radio communication [C]//2019 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), 2019: 18-23.
- [11] SINGH M, TIWARI G. A millimeter-wave microstrip patch antenna and 1×4 array for 5G communication [C]//2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT), 2021: 584-586.
- [12] PANG B, YIN Y Z. Development of Wilkinson power divider for UWB application [C]//2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2018: 1-3.
- [13] 李进, 杨维明, 揭智航. 一种简易的Wilkinson宽带等功率分配器设计[J]. 长江信息通信, 2022, 35(9): 115-117. LI Jin, YANG Weiming, JIE Zhihang. A simple design of wilkinson broadband equivalent power divider [J]. Changjiang Information and Communications, 2022, 35(9): 115-117. (in Chinese)
- [14] YANG J, SHEN X, LUO H, et al. Design of an ultra-wideband power divider [C]//2021 2nd China International SAR Symposium (CISS), 2021: 1-3.
- [15] SHARMA V, SINGH S. Design of wideband Wilkinson power divider for sub-6 GHz applications [C]//2023 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing (AIC), 2023: 456-459.
- [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.