

# 基于类科赫分形方法的多频段天线设计研究

刘宁川<sup>1</sup>, 纪晓辉<sup>2</sup>, 刘宏杰<sup>1</sup>, 彭宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中原电子集团有限公司研发三所, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中国电子产业工程有限公司, 北京

收稿日期: 2022年6月6日; 录用日期: 2022年7月8日; 发布日期: 2022年7月15日

## 摘要

本文对多频天线展开了研究,采用微带线馈电的方式,通过在矩形环形天线的内部加载类科赫分形结构,设计了一款微带线馈电的三频段微带天线。天线在2.232~2.624 GHz处的相对带宽为16.3%,在4.38~4.98 GHz和5.17~6.89 GHz处的相对带宽分别为12.25%, 28.64%,天线的在低频段的最大增益为2 dB,中高频段的最大增益为4 dB左右。该设计方法具有多频段,小型化,加工简单,成本低等优势;并进行了实物加工和测试,测试数据与理论数据一致。

## 关键词

多频段类科赫分形结构, 小型化

# Research on Multi-Band Antenna Design Based on Koch-Like Fractal Method

Ningchuan Liu<sup>1</sup>, Xiaohui Ji<sup>2</sup>, Hongjie Liu<sup>1</sup>, Yu Peng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Third Research, Zhongyuan Electronics Group, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>China Electronics Industry Engineering Company, Beijing

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 15<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In this paper, the multi-frequency antenna is studied. A three-band microstrip antenna fed by a

microstrip line is designed by loading a Koch-like fractal structure inside the rectangular ring antenna. The relative bandwidth of the antenna is 16.3% at 2.232~2.624 GHz, 12.25% at 4.38~4.98 GHz and 28.64% at 5.17~6.89 GHz respectively. The maximum gain of the antenna in the low-frequency band is 2 dB and that in the medium and high-frequency band is about 4 dB. The design method has the advantages of multi-frequency band, miniaturization, simple processing and low cost; the physical processing and testing are carried out, and the test data are consistent with the theoretical data.

## Keywords

Multiband Koch-Like Fractal Structure, Miniaturization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

伴随着无线通信系统不断的完善与发展, 天线的用途越来越广, 大家开始围绕着低成本, 易加工, 小尺寸等特性展开研究。如今, 大家越来越喜欢将多个无线通信服务的功能全部集中在一个设备上[1] [2], 这就需要天线能够工作在多个频段, 并且天线的尺寸需要足够小, 这样能够更好的将设备体积做小。为了满足更稳定的传输信息的要求, 大多数设备一般采用多频带天线, 而微带贴片天线尺寸小和方便共形的优点在多频带天线中表现十分出色, 因此被大量的研究应用, 国内外学者关于小型化多频段技术做了大量研究, 并应用在了微带贴片天线上[3] [4] [5] [6] [7]。本文在传统的环形贴片天线上放置两块加载分形的 H 形贴片的结构, 设计一款三频段微带天线, 应用于移动通信中。

## 2. 矩形环形天线的设计

### 2.1. 天线的结构设计

首先设计一款基础的矩形环形微带天线。由于天线的工作频率与天线所采用的介质基板的参数有关, 因此选取合适的介质基板非常重要, 考虑到成本问题, 最终选取 FR4 的介质基板, 相对介电常数为 4.4, 损耗正切  $\tan\delta = 0.02$ , 介质基板的厚度为 1.6 mm。在设计矩形环形天线时, 考虑到加工制作的方便性, 因此采取微带线馈电的方式, 馈电与贴片共面。

### 2.2. 天线的分析

将介质板的相关参数带入到公式中便得到了矩形贴片的尺寸, 由于矩形环是通过在矩形贴片上挖去一块矩形贴片得到的, 被挖去的矩形的尺寸的大小同样也会对天线的谐振频率产生影响。利用 TXLINE 软件计算出微带馈电的尺寸, 使用标准的 50 欧姆 SMA 接头连接馈线进行馈电。根据仿真的结果查看天线匹配的情况, 并适当调整馈线的尺寸来达到良好的匹配效果, 最终馈电线的宽  $W1 = 3.2$  mm, 长  $L1 = 16$  mm。通过在尺寸为  $25 \times 18$  mm<sup>2</sup> 的矩形贴片上挖一个矩形的孔, 通过改变被挖矩形的尺寸仿真观察其与谐振频率的关系。如图 1 和图 2 所示通过 CST 电磁软件仿真后, 可以看出, 随着被挖矩形的尺寸不断减小, 也就是矩形环的宽度  $D1$  不断增加, 天线的谐振点不断向右偏移。最终确定了矩形环的宽度  $D1 = 2$  mm。

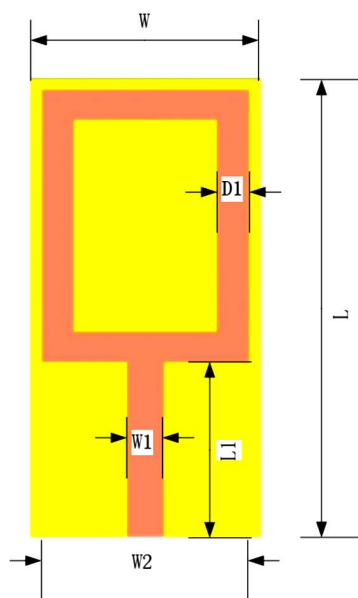


Figure 1. Rectangular ring antenna

图 1. 矩形环天线图

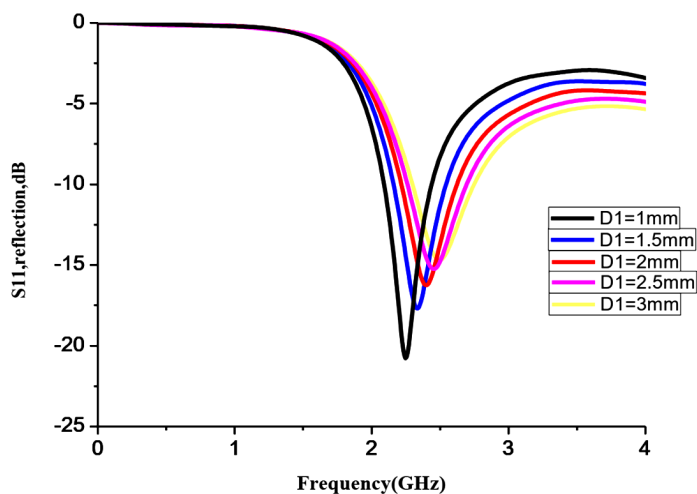


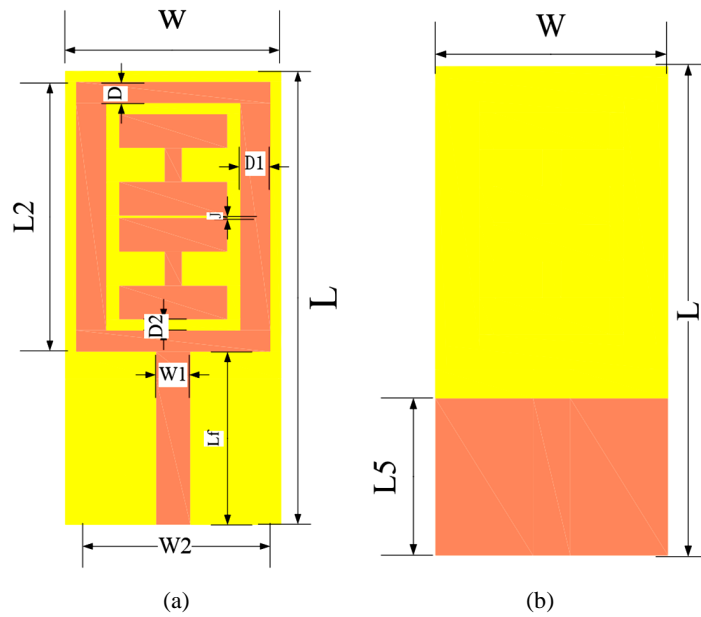
Figure 2. S11 diagram of rectangular ring

图 2. 矩形环的 S11 图

### 3. 加载 H 形贴片的矩形环三频带天线设计

#### 3.1. 天线结构设计

通过对矩形环的仿真可以看出, 天线的谐振频率会受到矩形孔的尺寸的影响, 之前用公式计算出的初始参数值只能作为参考。为了在矩形环天线的基础上增加更多的频段, 因此选择在矩形环的内部加载上下两块对称的矩形贴片, 考虑到天线的尺寸的原因, 为了让天线的表面电流的路径延长, 采取类似分形的方式, 在上下对称的两块的矩形贴片的左右两边分别挖去一个小矩形, 从而改变了电流的路径, 在保持贴片整体尺寸部改变的情况下, 增加天线的电长度。如图 3 所示, 其中黄色部分为 FR4 介质基板, 粉色部分为覆铜贴片。



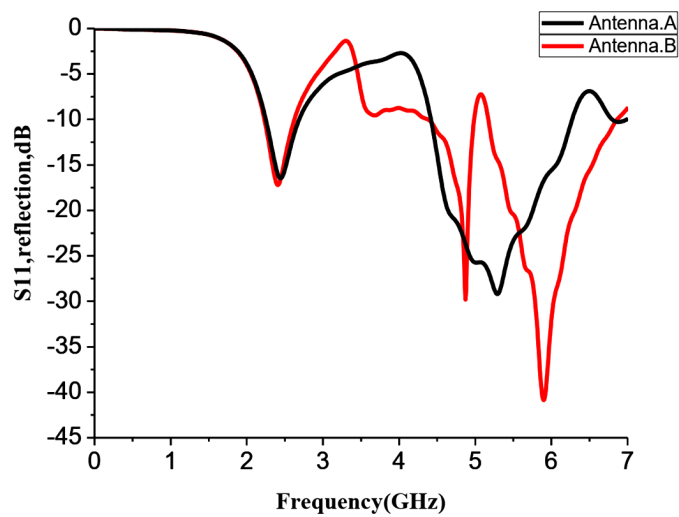
**Figure 3.** Structural plan of antenna. (a) Antenna radiation surface (b) Antenna ground

**图 3.** 天线的结构平面图。(a) 天线辐射面 (b) 天线接地面

经过仿真优化后，最终天线的参数如表 1 所示：

**Table 1.** Basic parameters of antenna  
**表 1.** 天线的基本参数

L	W	W1	L1	H	L2
42 mm	20 mm	3.2 mm	16 mm	1.4 mm	25 mm
D1	D2	D3	J	D	W2
2.8 mm	1 mm	1.2 mm	0.2 mm	2 mm	18 mm



**Figure 4.** S11 diagram of antenna

**图 4.** 天线的 S11 图

从图 4 中可以看出, 在矩形环内部加载两块矩形贴片后, 由于两块矩形贴片之间的缝隙很小, 会产生耦合作用, 可以将其看作一块矩形贴片, 在 5.2 GHz 处产生谐振。当在两块矩形贴片上刻蚀类分形单元后, 由于电流路径的改变, 天线的谐振点向右移动, 在 4.86 GHz 处产生谐振, 天线获得三个频段。天线在 2.232 GHz~2.624 GHz 处的相对带宽为 16.3%, 在 4.38~4.98 GHz 和 5.17~6.89 GHz 处的相对带宽分别为 12.25%, 28.64%。

### 3.2. 仿真参数的分析

通过对 CST 电磁仿真软件对所设计的天线的参数进行分析。由于天线的参数较多, 因此在这里选取了主要影响此款天线的参数  $D$ ,  $D_3$  进行分析, 并选取  $D$ ,  $D_3$  的数据进行优化, 分析这些参数对  $S_{11}$  参数的影响。

➤ 参数  $D$  对  $S_{11}$  的影响如图 5 所示:

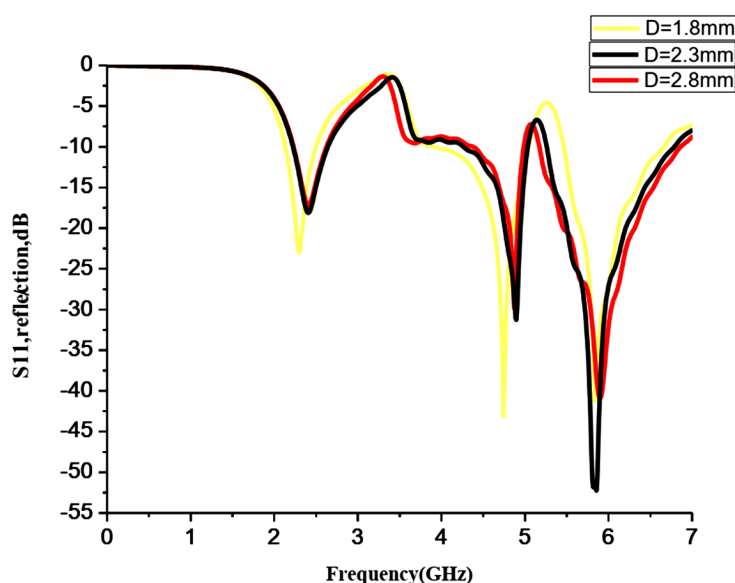


Figure 5. Effect of parameter  $D$  on antenna  $S_{11}$

图 5. 参数  $D$  对天线  $S_{11}$  的影响图

从图 5 可以看出, 保持其它的参数不变, 对矩形环的上下宽度进行探讨, 令参数  $D$  分别为 1.8 mm, 2.3 mm, 2.8 mm。分别对这三组数据使用 CST 软件对其仿真发现, 矩形环上下的宽度  $D$  对于天线在高频处的影响比较大, 随着  $D$  的增大, 高频部分会略微的向左移动。主要是由于当矩形环的宽度增加时, 使得与环内的靠下 H 形贴片的距离减小, 而矩形环上不仅分布着高频谐振时的电流, 也有低频谐振时的电流, 当电流的路径逐渐增大时, 使得高频处的谐振频率随着减小, 因此可以得出矩形环的上下宽度  $D$  主要对高频处的频率影响比较大。

➤ 参数  $D_3$  对  $S_{11}$  的影响如图 6 所示:

从图 6 可以看出, 在其它的参数保持不变的情况下, 对矩形环与内部的 H 形贴片的距离参数  $D_3$  进行探讨。可以看出随着  $D_3$  的变化, 天线在高频处受到的影响非常大。令参数  $D_3$  分别为 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm, 1.2 mm, 分别对这四组数据进行仿真分析发现, 随着  $D_3$  的不断增大, 天线在高频处的谐振频率不断右移, 并且当  $D_3$  在 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm 处时, 天线在高频处的回波损耗变差, 主要是由于  $D_3$  的不断减小, 导致 H 形贴片与矩形环的间距越来越小, 与矩形环之间也会产生耦合, 使得高频处的电流

受到影响。由此可以看出天线虽然工作在三个不同的频段，但是产生谐振的位置相互之间也会产生影响，矩形环与环内上下对称的两个 H 形贴片并不是相互独立的工作。

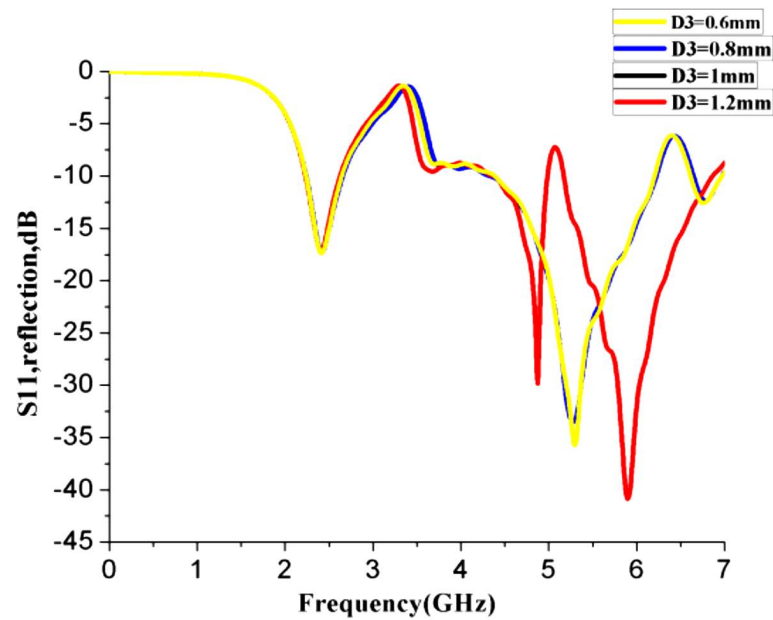


Figure 6. Effect of parameter D3 on antenna S11

图 6. 参数 D3 对天线 S11 的影响图

### 3.3. 天线的性能分析

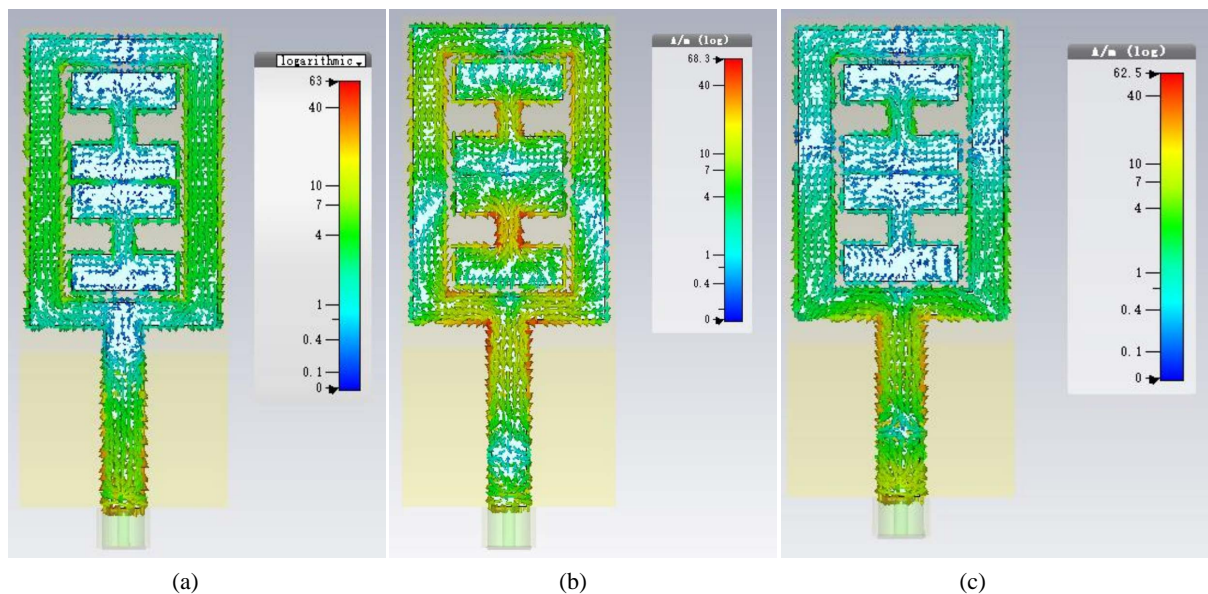


Figure 7. Surface current distribution of antenna. (a) 2.4 GHz current distribution diagram (b) 4.86 GHz current distribution diagram (c) 5.89 GHz current distribution diagram

图 7. 天线的表面电流分布图。(a) 2.4 GHz 电流分布图 (b) 4.86 GHz 电流分布图 (c) 5.89 GHz 电流分布图

根据图 7 可以非常直观的看出各个谐振点工作时的电流分布情况。(a) 当谐振频率在 2.4 GHz 时，电

流主要分布在矩形环上,由此可以看出,矩形环可以产生 2.4 GHz 的谐振频率。(b) 当谐振频率在 4.86 GHz 时,电流主要分布在矩形环内的靠下的 H 形贴片上并且电流较强,主要是 H 形贴片使得天线的电长度增加,改变了电流的路径,由此可以看出靠下的 H 形贴片可以产生 4.86 GHz 的谐振频率。(c) 当谐振频率在 5.89 GHz 时,电流主要分布在靠上的 H 形贴片上,由此可以看出靠上的 H 形贴片可以产生 5.89 GHz 的谐振频率。天线通过在不同的谐振模式下进行工作,从而可以获得三个工作频段,并且通过改变它们的尺寸可以来调节天线的谐振频率。

天线的辐射方向图如图 8~10 所示,分别为天线工作于 2.4 GHz, 4.86 GHz, 5.89 GHz 时的 E 面和 H 面的方向图。在低频段时, E 面基本上呈一个 8 字形, H 面方向图接近一个圆,天线的方向性良好。在中高频段时天线的方向图会发生一定的畸变,可能主要是由于在中高频段时,电流分布的情况较为复杂,矩形环也会和内部的上下两个 H 形贴片产生耦合作用,多个辐射单元之间相互影响,从而使天线的方向图发生了一定的畸变,天线的 H 面方向图近似等幅全向且具有对称性。

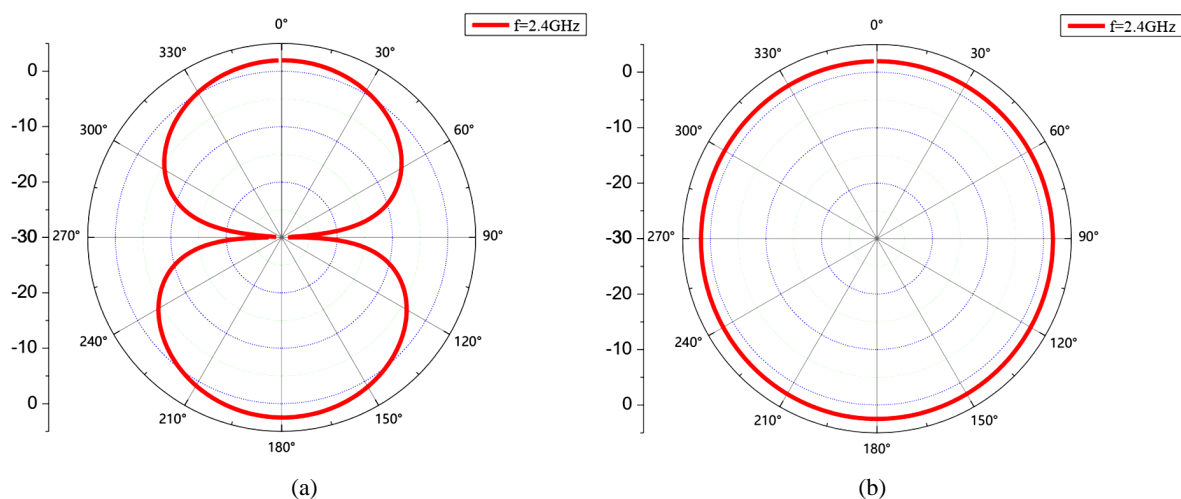


Figure 8. E-plane and H-plane direction diagram of 2.4 GHz antenna. (a) E-plane pattern (b) H-plane pattern  
图 8. 2.4 GHz 天线 E 面 H 面方向图。(a) E 面方向图 (b) H 面方向图

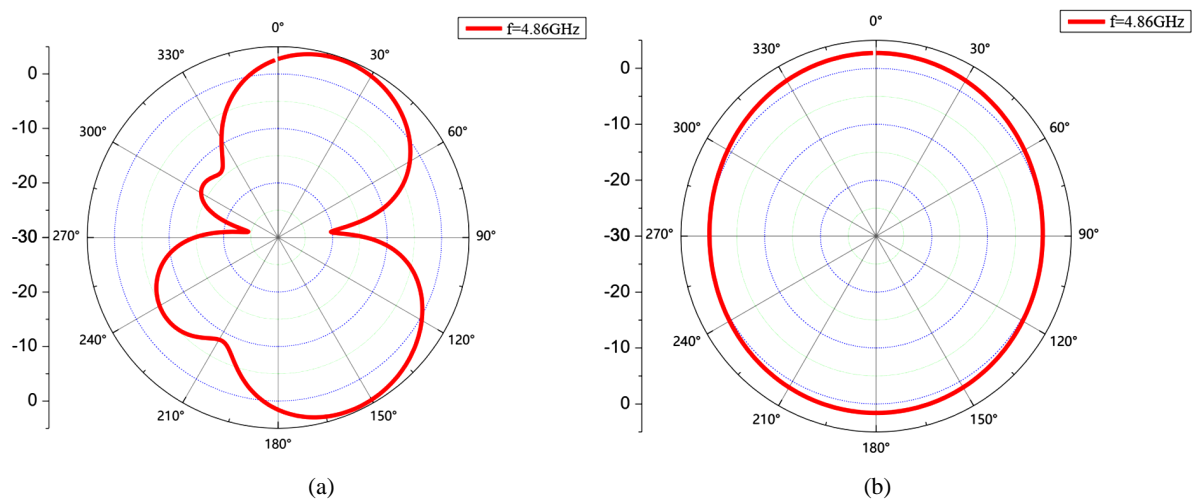
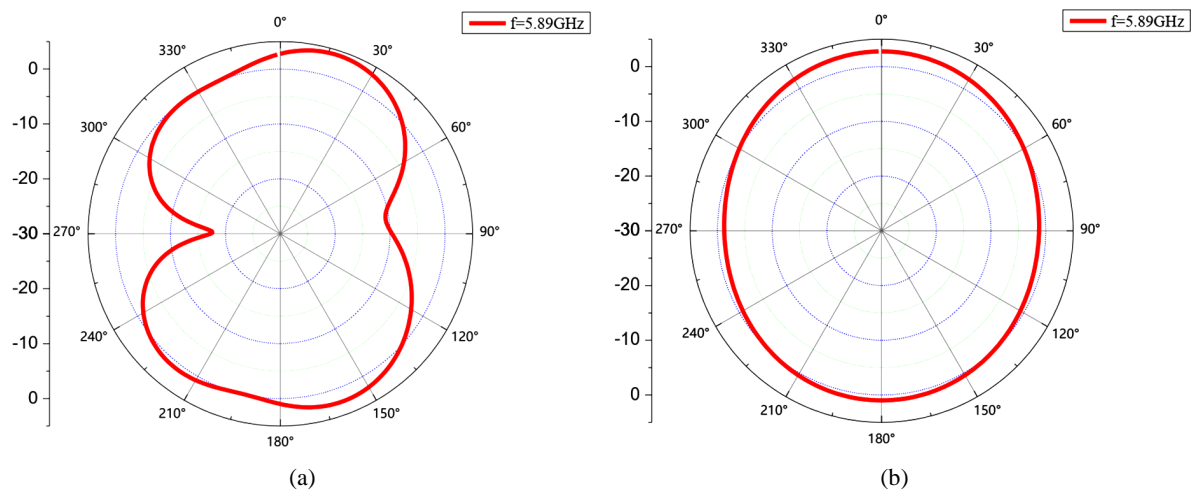
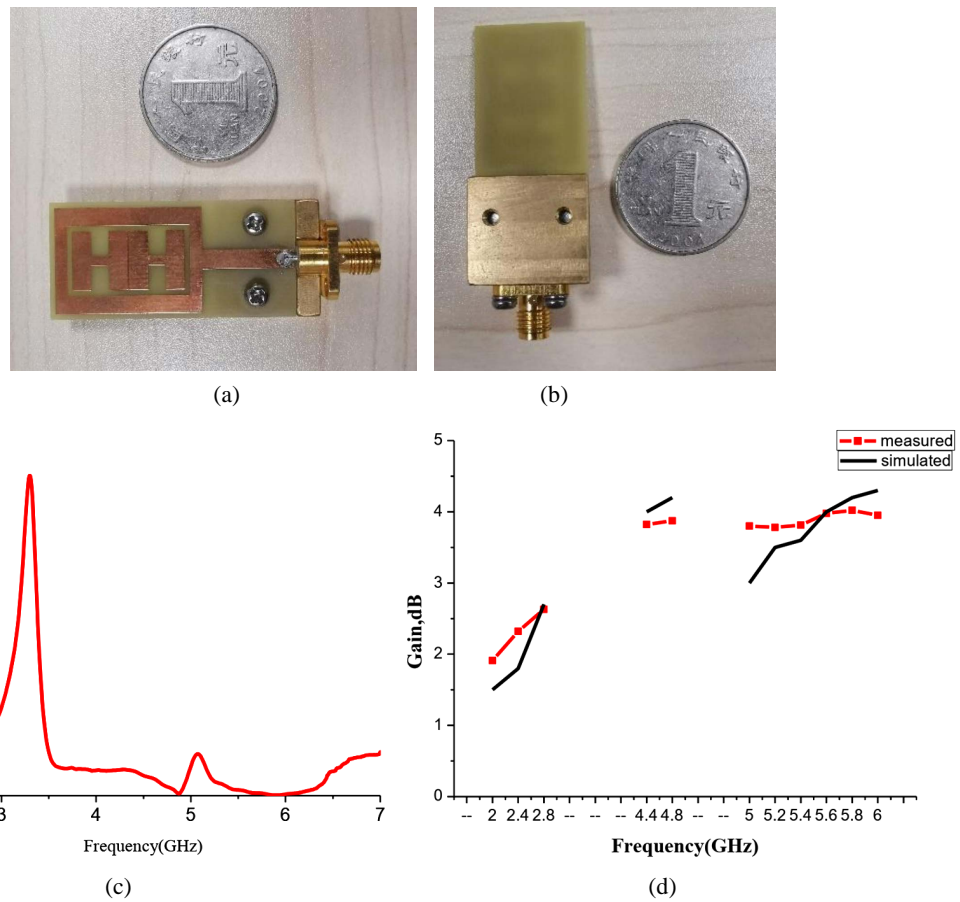


Figure 9. E-plane and H-plane direction diagram of 4.86 GHz antenna. (a) E-plane pattern (b) H-plane pattern  
图 9. 4.86 GHz 天线 E 面 H 面方向图。(a) E 面方向图 (b) H 面方向图



**Figure 10.** E-plane and H-plane direction diagram of 5.89 GHz antenna. (a) E-plane pattern (b) H-plane pattern  
**图 10.** 5.89 GHz 天线 E 面 H 面方向图。(a) E 面方向图 (b) H 面方向图

#### 4. 加工与测试



**Figure 11.** Physical object and test results. (a) Front view of antenna (b) Reverse view of antenna (c) Standing wave ratio test result diagram (d) Comparison diagram of gain simulation test results

**图 11.** 实物及测试结果图。(a) 天线的实物正面图 (b) 天线的实物反面图 (c) 驻波比测试结果图 (d) 增益仿真测试结果对比图



天线的加工实物以及天线的驻波比如图 11(c)所示,可以看出天线的频率在中高频段上发生了一定的偏移,与仿真结果相比较存在一定的偏差,产生误差的主要原因可能是由于加工时的精度有限、焊接式 SMA 接头等原因引起,因此没有达到仿真软件中的理想条件。但是从实验测试结果来看,能够验证设计的可行性。图 11(d)为天线的仿真与实际增益对比图,从仿真与实际的测试结果可以看出,最终天线的测试与仿真结果存在一定的偏差,属于可以接受的范围内。天线在低频段的辐射性能较弱,增益较低,而随着天线的工作频率不断增加,天线的辐射性能逐渐变强,增益也逐渐增加并趋于稳定。与文献[5]中的天线相比,在尺寸更小的条件下,本文中的天线的带宽更宽。从整体来看,天线的增益基本上趋于稳定,增益值也能够满足移动通信的要求。

## 5. 结论

本文对多频天线展开研究,采用微带线馈电的方式,通过在矩形环形天线的内部加载类科赫分形结构,并运用 CST 仿真软件对类科赫分形结构进行仿真和结构尺寸分析,发现其结构是可以实现多频段天线的设计且尺寸较小,通过仿真优化的数据设计了一款微带线馈电的三频段微带天线并进行了实物加工和测试,测试数据与理论数据一致。天线在 2.232~2.624 GHz 处的相对带宽为 16.3%,在 4.38~4.98 GHz 和 5.17~6.89 GHz 处的相对带宽分别为 12.25%, 28.64%,天线的在低频段的最大增益为 2 dB,中高频段的最大增益为 4 dB 左右。本章设计的天线与其它参考文献中的天线进行对比,具有多频段,小型化,加工简单,成本低等优势。

## 参考文献

- [1] Chakraborty, U., Kundu, A., Chowdhury, S.K., *et al.* (2014) Compact Dual-Band Microstrip Antenna for IEEE802.11a WLAN Application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 407-410. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2307005>
- [2] SalarRahimi, M., Rashed-Mohassel, J. and Edalatipour, M. (2012) Radiation Properties Enhancement of aGSM/WLAN Microstrip Antenna Using a Dual Band Circularly Symmetric EBG Substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 5491-5494. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2208442>
- [3] Dang, L., Lei, Z.Y., Xie, Y.J., *et al.* (2010) A Compact Microstrip Slot Triple-Band Antenna for WLAN/WiMAX Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **9**, 1178-1181. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2098433>
- [4] Peng, L., Ruan, C. and Wu, X. (2010) Design and Operation of Dual/Triple-Band Asymmetric M-Shaped Microstrip Patch Antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **9**, 1069-1072. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2091671>
- [5] 缪洁, 徐文龙, 徐冰俏. 一种月牙形缝隙多频微带天线分析与设计[J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(11): 73-77.
- [6] Chen, Z.N., See, T.S.P. and Qing, X. (2007) Small Printed Ultrawideband Antenna With Reduced Ground Plane Effect. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **55**, 383-388. <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.889823>
- [7] Puri, S.C., Das, S. and Tiary, M.G. (2018) A CPW Fed Trapezoidal Fractal Patch Antenna for UWB Applications. 2018 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Boston, MA, 8-13 July 2018, 749-750. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609082>