

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407809

基于5G与WiFi 6E应用的三频MIMO天线设计*

张范然¹ 杨福慧² 李运胜² 印小忠² 杜成珠¹

(1. 上海电力大学 上海 200082; 2. 中电科微波通信(上海)股份有限公司 上海 201815)

摘要:针对目前多频带多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)天线仍存在的尺寸较大、端口隔离较差、抗干扰能力弱等问题,设计了一款能应用于5G n78/n79、WiFi 6E频段的三频MIMO天线。该天线由挖槽后的菱形贴片及梯形地板组成,且结合了半圆形结构和对称倒L形枝节的创新设计,这种设计不仅实现了所需的三频特性,还有效控制了天线的尺寸,使其适应更为紧凑的应用需求。该天线采用共面波导(coplanar waveguide, CPW)的馈电方式,具有易于与其他微波电路集成的优点。通过将单元天线正交放置,且无需隔离枝节,使得MIMO天线在所需频段内的端口隔离度均大于25 dB。对仿真天线进行加工并测试,实测结果表明,当回波损耗小于-10 dB时,天线的阻抗带宽为3.28~3.67、4.63~5.01及5.67~7.65 GHz,适用于5G n78/n79、WiFi 6E频段。最大实测增益可达到4.7 dB,包络相关系数(envelope correlation coefficient, ECC)小于0.001,同时分集增益(diversity gain, DG)大于9.999 9,分集性能良好。实测结果与仿真结果高度一致,验证了设计的有效性和准确性。综合考虑该天线的尺寸优势、良好的隔离度和出色的分集性能,所提出的三频MIMO天线在5G与WiFi 6E通信系统中展现出极大的应用前景,能够满足未来无线通信日益增长的需求,推动无线技术的发展与创新。

关键词: MIMO天线;共面波导;三频特性;5G频段;小型化

中图分类号: TN828.6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6020

Design of tri-band MIMO antenna based on 5G and WiFi 6E applications

Zhang Fanran¹ Yang Fuhui² Li Yunsheng² Yin Xiaozhong² Du Chengzhu¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China;

2. CETC Shanghai Microwave Communication Co., Ltd., Shanghai 201815, China)

Abstract: Aiming at the problems of large size, poor port isolation and weak anti-interference ability of multi-band multiple-input multiple-output (MIMO) antennas, a tri-band MIMO antenna which can be applied to 5G n78/n79 and WiFi 6E bands is designed. The antenna is composed of a slotted diamond patch and a trapezoidal floor, and combines the innovative design of a semi-circular structure and a symmetrical inverted L-shaped branch. This design not only realizes the required triple-frequency characteristics, but also effectively controls the size of the antenna to adapt to more compact application requirements. The antenna is fed by coplanar waveguide (CPW), which has the advantage of easy integration with other microwave circuits. By placing the unit antenna orthogonally and without isolating branches, the port isolation of the MIMO antenna in the required frequency band is greater than 25 dB. The simulated antenna is processed and tested. The measured results show that when the return loss is less than -10 dB, the impedance bandwidth of the antenna is 3.28~3.67, 4.63~5.01 and 5.67~7.65 GHz, which is suitable for 5G n78/n79, WiFi 6E band. The maximum measured gain can reach 4.7 dB, the envelope correlation coefficient (ECC) is less than 0.001, and the diversity gain (DG) is greater than 9.999 9. The diversity performance is good. The measured results are highly consistent with the simulation results, which verifies the effectiveness and accuracy of the design. Considering the size advantage, good isolation and excellent diversity performance of the antenna, the triple-band MIMO antenna proposed in this paper shows great application prospects in 5G and WiFi 6E communication systems, which can meet the growing demand of future wireless communication and promote the development and innovation of wireless

收稿日期: 2024-09-06 Received Date: 2024-09-06

* 基金项目: 国家自然科学基金(62202286)项目资助

technology.

Keywords: MIMO antenna; coplanar waveguide; tri-band characteristics; 5G band; miniaturization

0 引言

在无线通信和物联网发展迅速的今天,数字媒介的喷涌式发展导致对无线通信系统有着更高的传输速度和质的要求,因此天线研究被广泛关注。而可大幅度提升系统容量及频谱和能量效率的第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)应运而生,并迅速引起了人们的广泛关注。WiFi在6G频段的扩展被称为WiFi 6E(5.925~7.125 GHz),WiFi 6E填补了目前WiFi频段愈发紧张的现状,提升了智能手机、AR/VR等设备和尚未开发的可穿戴设备的体验^[1-2]。

而多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术,也被广泛认可为目前最有研究价值的前沿技术之一。它通过在发射端和接收端使用多个天线,可大幅提升无线通信的频谱效率、数据传输速率和网络容量,同时可以增强信号的可靠性和抗干扰能力。典型应用场景包括5G通信、WiFi路由器、物联网设备和智能交通系统等。将多频技术和MIMO技术相结合的多频MIMO天线具有很多优势,如低损耗、宽带宽、高隔离度和易集成,能够实现高效传输、低干扰和紧凑设计,广泛适用于5G、WiFi及物联网等高速通信场景^[3]。采用共面波导(coplanar waveguide, CPW)馈电方式的多频MIMO天线在天线的发展中占有重要地位,其具有结构紧凑、易于加工集成、天线性能表现较好等优势。然而,由于空间受限,多频MIMO天线单元间距较小,单元间耦合较强,最终影响信号的传播质量。因此,如何降低多频MIMO天线单元之间的耦合、提高隔离度成为现在广泛关注的问题。

目前,降低MIMO天线单元间耦合的常用方法较多。如去耦网络法^[4-5],文献[6]最终天线在4.75 GHz工作时,其隔离度可达到42.68 dB;而在1.77 GHz时,隔离度为26.52 dB,具有较好的隔离效果。除此,将天线正交放置的分集技术法也可以有效降低耦合^[7-9],文献[10]通过将单元天线相互正交放置,有效减少了天线之间的相互耦合,隔离度均大于17 dB。文献[11]使用简单的导体带作为中和线来增强端口隔离,隔离度可达到25 dB,效果显著。但是中和线法^[12-13]会增加天线结构复杂性及尺寸,可能影响性能和制造成本。文献[14]在天线的接地板上蚀刻半圆形槽,在26 GHz工作频段实现了超过34.2 dB的隔离度。因此缺陷地结构法^[15-16]可以有效提高天线隔离度。此外,还可以采用寄生谐振结构法来降

低耦合^[17-20],文献[21]通过在4个天线的共面接地面之间加载带有两个圆环的交叉分支,最终天线在整个工作频段上的隔离度大于20 dB;文献[22]在两个天线之间增加一个双Y形分支,使得二元天线在频段内隔离度大于21 dB。虽然上述MIMO天线性能良好,但要在实现小型化、无需隔离枝节、满足最新的5G/WiFi 6E通信系统的应用的多频特性的前提下,设计具有高隔离度特性^[23-24]的MIMO天线仍比较困难。

本文设计了一种应用于5G/WiFi 6E通信的小型化三频MIMO天线。天线印刷在厚度为0.8 mm的FR4介质基板上,整体尺寸为53 mm×28 mm。它是CPW馈电,以实现良好的阻抗匹配和更大的工作带宽。天线单元结构简单紧凑,通过在单极子天线内部开槽及加载枝节的方法,使天线具有三频带特性;另外两个单元天线采用正交方式放置,实现了MIMO天线的高隔离度。天线实测结果表明该三频MIMO天线满足5G的n78/n79(3.4~3.6/4.8~5.0 GHz)和WiFi 6E(5.925~7.125 GHz)通信系统的频段要求。

1 天线结构设计

1.1 单元天线

三频单元天线结构演变过程如图1所示,其对应的S参数变化如图2所示。该天线介质基板采用FR4材料,其介电常数为4.4,损耗角正切值为0.02,基板厚度为0.8 mm。所设计的天线采用特征阻抗为50 Ω的共面波导馈电方式。

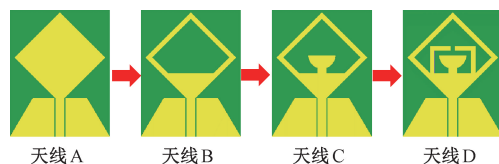


图1 天线结构演变过程

Fig. 1 The evolution process of antenna structure

天线A是一款贴片为菱形的基础单极子天线,馈线两侧共面的地板为梯形,最终使得天线A的工作带宽为3.54~5.57 GHz;然后在单极子天线内开槽得到双频天线B,此时天线的两个频段为3.2~4和6.82~7.77 GHz;再在天线内部添加半圆形结构使频段偏移得到天线C,此时天线的两个频段为3.25~3.93/5.68~7.65 GHz;最后在天线C的基础上添加枝节,对枝节长度进行优化调整,最终得到工作在3.21~3.79、4.71~5.16和5.73~7.59 GHz的三频单元天线D。枝节的初始长度为:

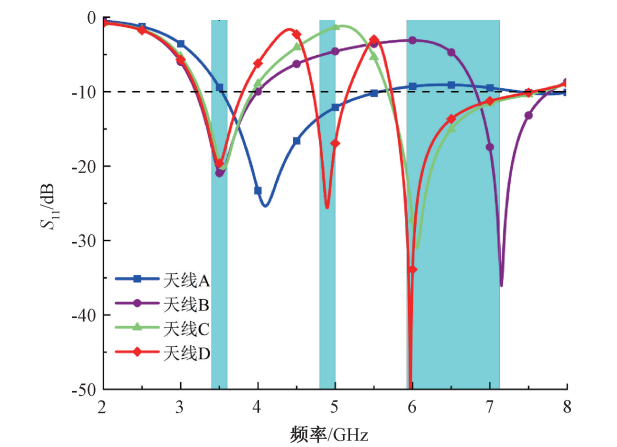


图2 不同设计阶段 S_{11} 对比

Fig. 2 Comparison of S_{11} in different design stages

$$L = \frac{C}{4f_c \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{1}$$

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \tag{2}$$

式中: L 代表枝节长度; f_c 代表谐振频率; C 代表光速; ϵ_{eff} 代表有效介电常数; ϵ_r 为介质基板的相对介电常数。

1.2 二元天线

两个单元天线采用正交摆放的方式,从而得到了具有极化分集特性的二元三频 MIMO 天线,如图 3 所示。通过对天线参数的扫描与优化,天线的最终设计尺寸如表 1 所示。

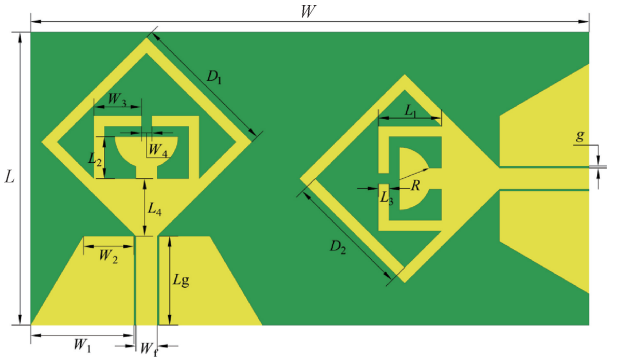


图3 天线结构

Fig. 3 Diagram of antenna structure

表 1 天线结构尺寸

Table 1 The size table of antenna structure (mm)

L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_g	D_1	D_2
28	6	4	1	5.5	8.5	14.14	12.02
W	W_1	W_2	W_3	W_4	W_f	R	g
53	9.8	4.8	4.5	1	2	3	0.2

最后,基于表 1 优化后的天线尺寸参数以及上述的

设计理念,加工制作了天线实物,如图 4 所示。

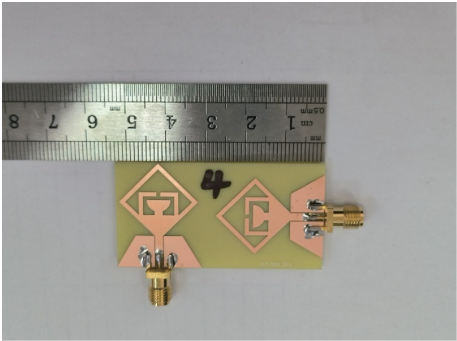


图4 天线实物

Fig. 4 Physical image of the antenna

2 仿真及实测结果

2.1 S 参数

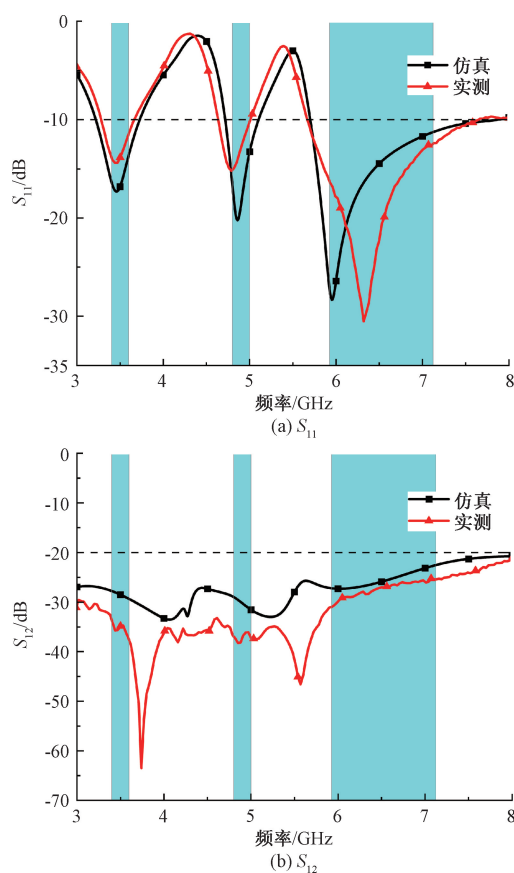
将天线的 S 参数仿真与实测结果进行比较,结果如图 5 所示。其中图 5(a) 是天线 S_{11} 曲线对比,由图 5 可知仿真天线在 3.22~3.73、4.72~5.1 和 5.7~7.88 GHz 这 3 个频段范围内 $S_{11} < -10$ dB。从实测结果可以看出,仿真和测试的回波损耗起伏趋势基本一致, $S_{11} < -10$ dB 时,天线 3 个频段的阻抗带宽分别为 390 MHz (3.28~3.67 GHz)、380 MHz (4.63~5.01 GHz) 和 1 980 MHz (5.67~7.65 GHz),可以覆盖 5G n78/n79 (3.4~3.6/4.8~5.0 GHz) 和 WiFi 6E (5.925~7.125 GHz) 的工作频段。图 5(b) 是天线 S_{12} 曲线对比,可以看出, S_{12} 的实测与仿真结果较为一致,仿真天线隔离度均小于 -20 dB,而实测隔离度均在 -25 dB 以下,且所需频段内能大部分达到 -35 dB,说明天线在工作频段内具有良好的端口隔离度。

经过上述分析,可以明显看出,该天线虽然实测和仿真 S_{11} 值有一些差别,但实测结果仍符合要求,且隔离效果更好。而影响天线性能的主要原因是天线加工精度及 SMA 头的焊接效果。最终结果表明该天线在 S_{11} 与隔离度这两个方面的仿真与实测结果,均满足实际工程所需要求,有着良好的性能。

2.2 天线尺寸参数分析

根据天线设计原理,修改天线结构的形状和尺寸将对天线工作的带宽和中心频率产生影响。因此选择对半圆形结构的半径 R ,以及内部枝节的长度 W_3 进行参数分析,分析结果如图 6 和 7 所示。

首先分析了半径 R 对天线回波损耗的影响,如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出,随着半圆形结构的半径 R 值的逐渐增加,工作在 6.5 GHz 的高频频带向低频方向移动,带宽从 1.75 GHz 增加至 2.07 GHz,中频带宽相对减

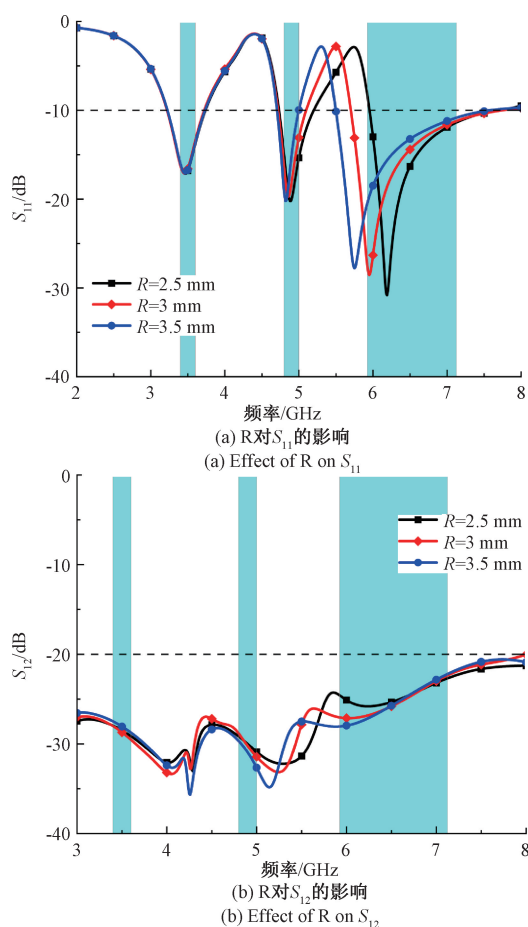
图5 S 参数仿真与实测对比Fig. 5 Simulation and measured comparison diagram of the S parameter

小,由此可知 R 对天线的高频部分有很大影响,其对低频段的带宽基本没有影响。由图 6(b)可以看出,随着 R 的变化, S_{12} 在中低频的变化幅度很小,在 5.5~6 GHz 时,随着 R 的增大, S_{12} 从 -25 dB 逐渐减小至 -28 dB,由此可知 R 对天线的高频部分的 S_{12} 有较大的影响。根据以上分析,最后 R 的尺寸为 3 mm。

再分析长度 W_3 对 S_{11} 的影响,由图 7(a)可知,当 W_3 逐渐增大时,天线的 S_{11} 在低频带基本没有变化,而 4.9 GHz 处的中频频带向低频移动,由此可知 W_3 对天线的中频带有较大的影响;当 W_3 增大到 4.5 mm 时,此时刚好满足 5G n78、n79(3.4~3.6/4.8~5.0 GHz)和 WiFi 6E(5.925~7.125 GHz)的要求。由图 7(b)可以看出随着 W_3 的逐渐增大, S_{12} 从 -26.8 dB 减小至 -30 dB,变化幅度较小,由此可知 W_3 对天线 S_{12} 参数影响很小。通过对比分析,最终确定 $W_3=4.5$ mm。综合以上可发现,改变 R 和 W_3 对于 S_{11} 参数影响较大,对于 S_{12} 参数影响较小。

2.3 电流分布图

图 8 所示为天线在 3.5、4.9 和 6.5 GHz 频率下表面的模拟电流分布。

图6 R 对 S 参数的影响Fig. 6 The effect of R on S parameter

端口 1 接入激励信号,端口 2 接入 50 Ω 的匹配负载。从图 8(a)可以看出在 3.5 GHz 时,电流主要集中在天线馈线处;由图 8(b)可以观察到在 4.9 GHz 时,电流主要分布在天线中间部分以及对称倒 L 形枝节上,这表明枝节的长度直接影响天线的谐振频率。由图 8(c)可以看出在 6.5 GHz 时,电流主要分布在天线内部的半圆形结构上。可以观察到 3 种频率下的右侧天线表面的电流较少,这表明采用垂直放置的结构可以显著降低天线单元之间的耦合。

2.4 辐射方向图

图 9 所示为 MIMO 天线仿真与实测的归一化辐射方向图。分别为 3.6、4.8 和 6.4 GHz 3 个频点的 E 、 H 面归一化方向图,而仿真值与实测值趋势大致相同。可以看出天线的 E 平面呈“8”字形,具有较好的双向辐射模式; H 平面基本满足全向辐射特性,能够收发各个方向的信号。整体来看,天线辐射性能良好。

2.5 增益

评估天线在特定方向的辐射能力时,天线增益是一个重要指标。图 10 所示为天线增益的实测与仿真对比,

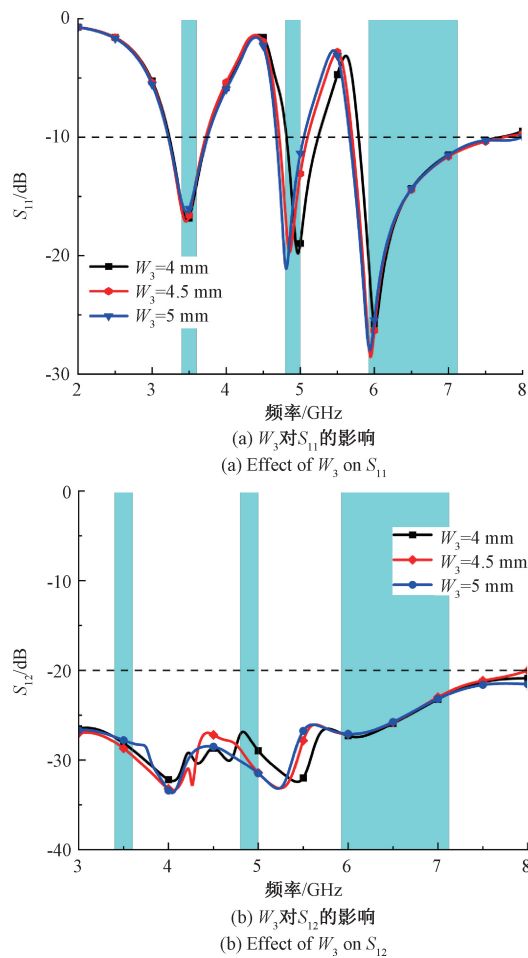


图 7 W_3 对 S 参数的影响
Fig. 7 The effect of W_3 on S parameter

MIMO 天线增益的实测值与仿真曲线变化趋势基本一致,而最大实测增益可达到 4.7 dB 左右。

2.6 包络相关系数(ECC)和分集增益(DG)

为了可以更加直观地讨论天线的相关性,在工程上一般使用 ECC 和 DG 来衡量 MIMO 天线间相关程度。天线的 ECC 和 DG 的仿真实测对比如图 11 所示,由图 11 可知,天线实测曲线较仿真虽略有波动,但在所需工作频段内均能满足 $ECC<0.001$, $DG>9.999\ 9$,符合 MIMO 天线设计对 ECC 和 DG 的要求,说明天线单元收发信号的能力强,MIMO 天线的信道独立程度较高。

3 天线性能比较

天线性能比较如表 2 所示,将设计的天线与近年来已有研究中的多频 MIMO 天线的性能进行了比较,对天线尺寸、基板材质、馈电形式、工作频段等参数进行对比。与其他天线相比,本文所设计的天线采用 CPW 馈电方式,且隔离度较高,ECC 与 DG 也都优于对比天线,效

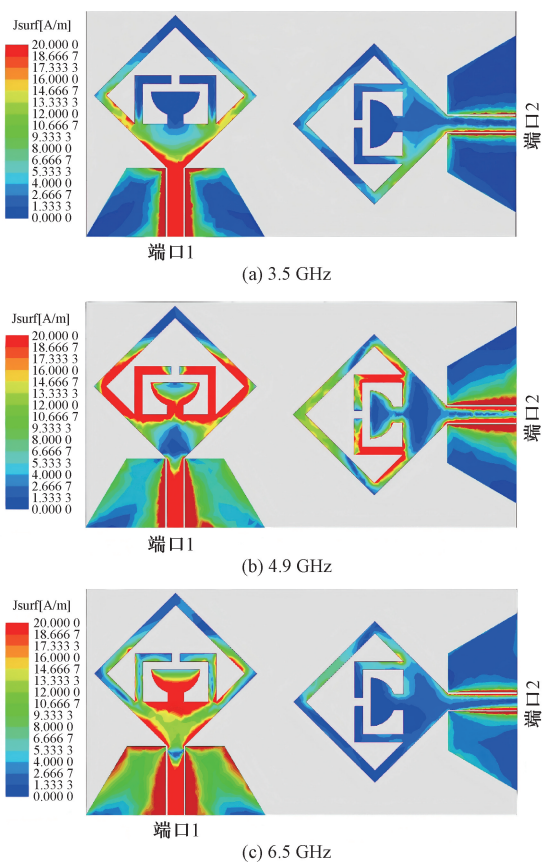


图 8 天线电流分布

Fig. 8 Antenna current distribution diagram

果良好。

表 2 天线性能参数对比

Table 2 Comparison of antenna performance parameters								
天线	尺寸	基板材质	馈电方式	工作频段/GHz	隔离度/dB	ECC	DG	峰值增益/dBi
文献[7]	50×50	FR4	ACS	2.25~2.42 3.36~3.72 5.0~6.5	>17	<0.001	>9.95	4
文献[10]	34×38	Rogers R04350B	侧馈	0.95~1.5 3.35~3.67 5.01~5.42	>20	<0.02	>9.88	4
文献[11]	49×48	FR4	侧馈	2.24~2.45 3.3~4 5.6~5.75	>15	<0.02	>9.9	-
文献[20]	56×56	LCP	CPW	2.54~3.56 4.28~4.97 5.37~8.85	>20	<0.13	>9.95	3.2
文献[21]	50×50	FR4	侧馈	1.85~2.7 3.24~3.99 4.65~5.8	>20	<0.2	-	3.04
文献[22]	46×32	LCP	CPW	2.263~2.925 3.063~4.5 4.588~7.25	>21	<0.01	>9.99	-
本文	53×28	FR4	CPW	3.28~3.67 4.63~5.01 5.67~7.65	>25	<0.001	>9.999 9	4.7

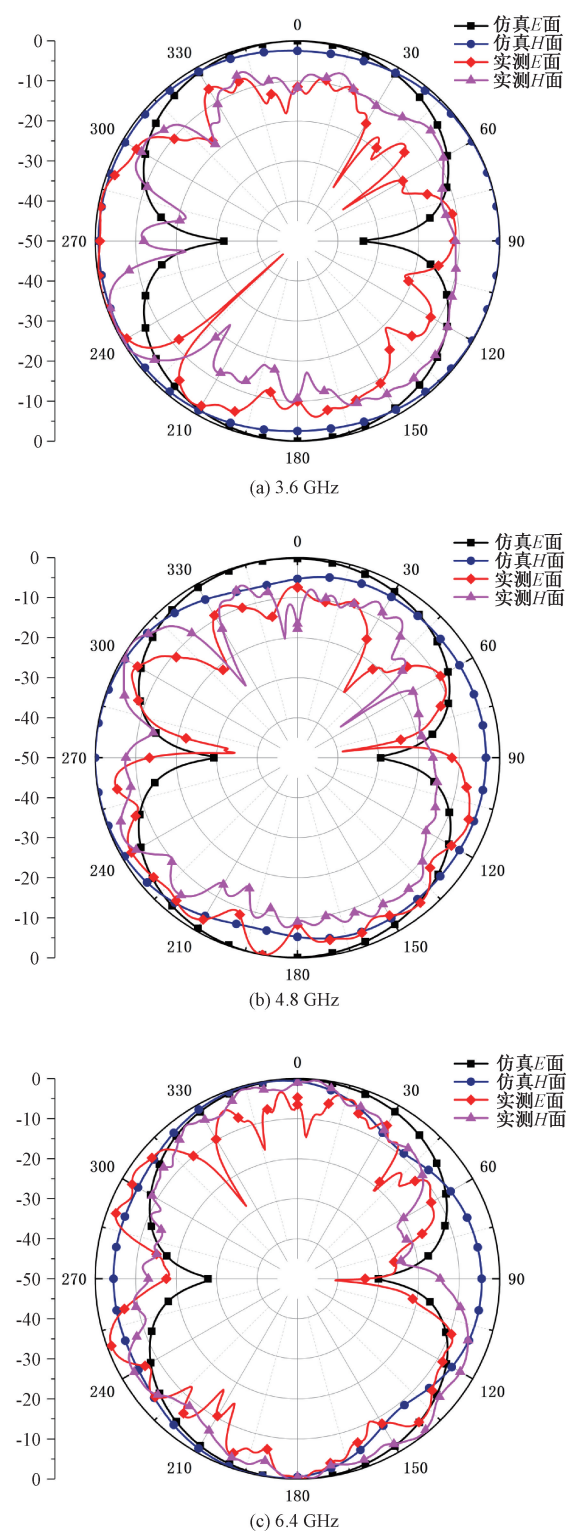


图9 天线辐射方向
Fig. 9 Antenna radiation patterns

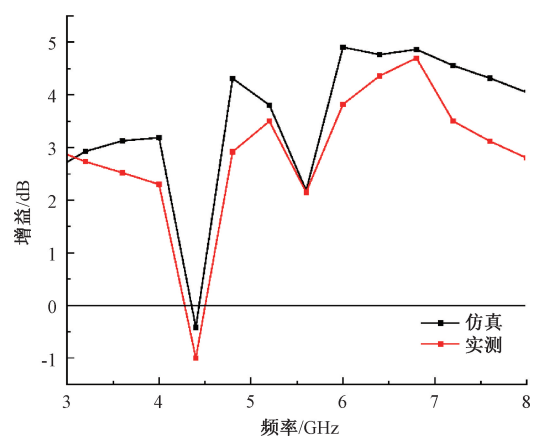


图10 天线峰值增益
Fig. 10 Antenna peak gain

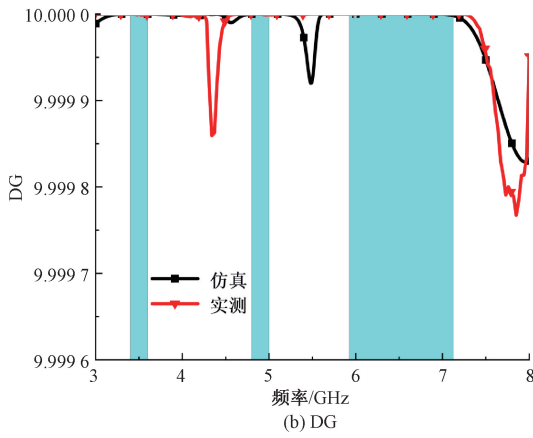
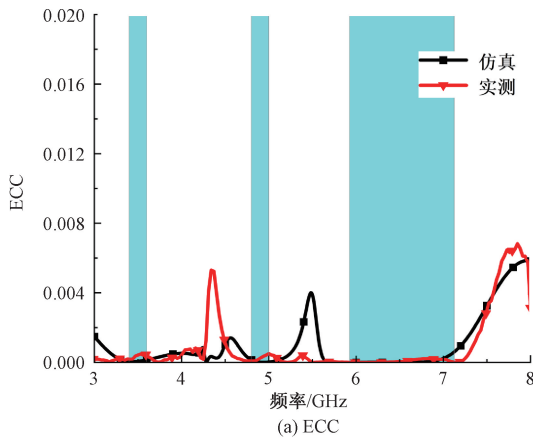


图11 ECC和DG

Fig. 11 ECC and DG

4 结论

针对现代无线通信系统对高性能、低成本和小型化

的迫切需求,本研究的核心思路是设计一种紧凑型多频天线,以满足5G n78/n79和WiFi 6E频段的通信需求,因此提出了一种新颖的CPW馈电三频天线。通过创新的结构设计,该天线在保持紧凑尺寸的同时,实现了多频特性与良好的辐射特性。本研究采用的核心技术包括半圆形结构和对称倒L形枝节的引入。这些设计元素不仅

提高了天线的频率响应,还有效地延伸了工作频段,成功实现了 3.28~3.67、4.63~5.01 及 5.67~7.65 GHz 的三频特性,涵盖了 5G n78/n79 和 WiFi 6E 的频段要求。此外,CPW 馈电结构的应用使得天线在整体设计上更加简化,减少了对复杂馈电网络的依赖,增强了天线的集成度。在技术难点方面,本研究克服了多频天线设计中的相互耦合和隔离度问题。通过优化天线的几何形状,以及合理调节各个辐射单元之间的距离,确保了在所需频段内的高隔离度,实测结果显示频段内隔离度均在 -25 dB 以下,性能良好。综上所述,本文设计的紧凑型 CPW 馈电三频天线,不仅在技术上取得了显著进展,满足了现代无线通信的多重需求,同时也为未来无线通信设备的集成化和小型化提供了有力支持。其优越的分集性能和辐射特性,标志着在小型化、多功能化的通信设备领域中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 周云艳,赵年顺. 面向 Sub 6G 终端设备的三频天线设计[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(2): 199-204.
ZHOU Y Y, ZHAO N SH. A tri-band antenna for Sub 6G terminal equipment application [J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(2): 199-204.
- [2] NOOR S K, JUSOH M, SABAPATHY T, et al. A patch antenna with enhanced gain and bandwidth for Sub-6 GHz and Sub-7 GHz 5G wireless applications[J]. Electronics, 2023, 12(12): 2555.
- [3] LODHI D, SINGHAL S. CPW fed shovel shaped super wideband MIMO antenna for 5G applications[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2023, 168: 154700.
- [4] LI M, ZHANG Y, WU D, et al. Decoupling and matching network for dual-band MIMO antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(3): 1764-1775.
- [5] KORMILAINEN R, LUOMANIEMI R, LEHTOVUORI A, et al. A lumped-element decoupling and matching network for a four-element mobile handset MIMO antenna [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019, DOI:10.1155/2019/1934726.
- [6] ISLAM H, DAS S, ALI T, et al. A frequency reconfigurable MIMO antenna with bandstop filter decoupling network for cognitive communication [J]. Sensors, 2022, 22(18): 6937.
- [7] NAIDU P V, MAHESH BABU D, SAI HARANADH A, et al. Design and performance analysis of 4-port trophy shaped MIMO antenna for tri-band applications [J]. Microsystem Technologies, 2022, 28(4): 1037-1046.
- [8] NAIDU P V, MAHESH BABU D, AKKAPANTHULA S H, et al. A tri-band triangular lamp post shaped quad port MIMO antenna [J]. International Journal of Communication Systems, 2022, 35(9): e5131.
- [9] SHARMA U, SRIVASTAVA G, KHANDELWAL M K, et al. Shorting pins-based triple band circularly polarized modified monopole compact dual-port MIMO antenna for sub-6 GHz wireless applications[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2024, 176: 155162.
- [10] RAMASAMY S, MADHU A. A compact tri-band MIMO antenna for WLAN and 5G applications [J]. Applied Physics A, 2024, 130(2): 113.
- [11] PRADEEP P, JAYA SANKAR K, CHANDRA SEKHAR P. A compact semi-circular Slot MIMO antenna with enhanced isolation for Sub-6 GHz 5G WLAN applications [J]. Wireless Personal Communications, 2022, 125 (4): 3683-3698.
- [12] LIU R, AN X, ZHENG H, et al. Neutralization line decoupling tri-band multiple-input multiple-output antenna design[J]. IEEE Access, 2020, 8: 27018-27026.
- [13] BABU K V, DAS S, ALI S S, et al. Broadband sub-6 GHz flower-shaped MIMO antenna with high isolation using theory of characteristic mode analysis (TCMA) for 5G NR bands and WLAN applications[J]. International Journal of Communication Systems, 2023, 36(6): e5442.
- [14] GÜLER C, BAYER KESKIN S E. A novel high isolation 4-Port compact MIMO antenna with DGS for 5G applications [J]. Micromachines, 2023, DOI: 10.20944/preprints202305.1709.v1.
- [15] 王鹏,程号迪,韩国瑞. 应用于 5G 的高隔离双频 MIMO 天线设计[J]. 测试技术学报, 2023, 37(2): 165-169, 184.
WANG P, CHENG H D, HAN G R. Design of high isolation dual-band MIMO antenna for 5G[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(2): 165-169, 184.
- [16] GHOSH S, BAGHEL G S, SWATI M V. Design of a highly-isolated, high-gain, compact 4-port MIMO antenna loaded with CSRR and DGS for millimeter wave 5G communications[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2023, 169: 154721.
- [17] WU Y, WANG W, WANG W, et al. Design of a tri-band multiple input multiple output antenna with high isolation for 5G applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(6): e23153.

- [18] BAYARZAYA B, HUSSAIN N, AWAN W A, et al. A compact MIMO antenna with improved isolation for ISM, Sub-6 GHz, and WLAN application[J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1355.
- [19] TIWARI R N, SINGH P, PANDEY S, et al. Swastika shaped slot embedded two port dual frequency band MIMO antenna for wireless applications [J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2021, 109(1): 103-113.
- [20] XU Y, DONG P, WANG A. Design of a high isolation tri-band MIMO antenna for coal mine applications [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2023, 37(13): 1106-1121.
- [21] PENG X, DU C. A flexible CPW-fed tri-band four-port MIMO antenna for 5G/WIFI 6E wearable applications[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2024, 174: 155036.
- [22] DU C, LIU H, WANG X, et al. Compact CPW-fed triple-band MIMO antenna for wireless body area network based on flexible liquid crystal polymer [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2022, 36(10): 1-15.
- [23] 南敬昌, 苏东蕊, 高明明, 等. 应用SRR/CSRR去耦的毫米波MIMO天线[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(9): 195-202.
- NAN J CH, SU D R, GAO M M, et al. Millimeter-wave MIMO antenna applying SRR/CSRR decoupling [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(9): 195-202.
- [24] 李碧珂, 杜成珠, 杨福慧, 等. CPW馈电的高隔离度一阻带UWB-MIMO天线设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(12): 193-199.
- LI B K, DU CH ZH, YANG F H, et al. Design of high isolation single band-notch UWB-MIMO antenna with coplanar waveguide feed [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(12): 193-199.

作者简介



张范然, 2021年于安徽工业大学获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为多频段MIMO天线。
E-mail: 1574750416@qq.com

Zhang Fanran received his B. Sc. degree from Anhui University of Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Electric Power. His main research interest includes Multiband

MIMO antenna.



杨福慧, 1995年于西安电子科技大学获得学士学位, 2002年于南京邮电大学获得硕士学位, 现为中电科微波通信(上海)股份有限公司高级工程师, 主要研究方向包括宽带天线、阵列天线技术及无线通信技术。

E-mail: yangfuhui@waveguide.com.cn

Yang Fuhui received the B. Sc. degree from the Xidian University and M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications, in 1995 and 2002. Now he is a senior engineer of CETC Shanghai Microwave Communication Co. LTD. His main research interests include wideband antenna, array antenna and wireless communication.



李运胜, 于2000年获得上海理工大学学士学位, 现为中电科微波通信(上海)股份有限公司总经理, 主要研究方向包括机械结构设计及工艺技术。

E-mail: liyunsheng@waveguide.com.cn

Li Yunsheng received the B. Sc. degree from the University of Shanghai for Science and Technology in 2000. Now he is the general manager of CETC Shanghai Microwave Communication Co. LTD. His main research interests include mechanical structure design and technological design.



印小忠, 于2004年毕业于上海电力大学, 现为中电科微波通信(上海)股份有限公司副总经理, 主要研究方向包括天线结构设计及工艺技术。

E-mail: yinxiaozhong@waveguide.com.cn

Yin Xiaozhong graduated from Shanghai University of Electric Power in 2004. Now he is the vice general manager of CETC Shanghai Microwave Communication Co. LTD. His main research interests include antenna structure design and antenna technological design.



杜成珠(通信作者), 1995年于西安电子科技大学获得学士学位, 2003年于南京邮电大学获得硕士学位, 2012年于上海电力大学获得博士学位, 现为上海电力大学副教授, 主要研究方向包括柔性天线和纺织天线、多频和宽带天线以及MIMO技术。

E-mail: duchengzhu@163.com

Du Chengzhu (Corresponding author) received the B. Sc. degree from the Xidian University in 1995, M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2003, and Ph. D. degree from Shanghai University in 2012. Now she is an associate professor of Shanghai University of Electric Power. Her main research interests include flexible antenna and textile antenna, multiband and wideband antennas and MIMO technologies.