

面向5G应用的超宽带MIMO天线设计

王致远¹, 杨福慧², 杜成珠¹, 魏书荣¹

(1. 上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 200082; 2. 中电科微波通信(上海)有限公司, 上海 201800)

摘要:针对目前国内5G中频段的宽带覆盖问题以及面向未来6G系统在Sub-7 GHz频段的应用,设计了一款可覆盖5G频段的共面波导(CPW)馈电超宽带高隔离多输入多输出(MIMO)天线。单元天线以单个椭圆贴片为基础,通过添加三叉戟结构和切角操作实现了天线的超宽带特性。天线含有2个单元槽天线,可用于2×2的MIMO天线阵列,天线尺寸为118 mm×66 mm×0.8 mm。两个单元天线采用平行放置模式,且两个单元天线的地板互联,同时采用在天线单元间加载“H”形栅栏结构的方法以提高天线的隔离度。实测结果表明,天线的工作带宽为1.15~7.80 GHz,频段内的隔离度均大于20 dB,天线的包络相关系数小于0.03,分集增益大于9.98 dB。该MIMO天线具有高隔离度和超宽带覆盖的特点,同时天线采用了CPW馈电形式,更易应用于集成电路和各种超宽带系统。该天线在5G及未来6G系统中具有较好的应用前景。

关键词:5G;超宽带;槽天线;多输入多输出(MIMO);高隔离度

中图分类号:TN822 **文献标识码:**A

Design of Ultra-Wideband Multiple-Input Multiple-Output Antenna for 5G Applications

WANG Zhiyuan¹, YANG Fuhui², DU Chengzhu¹, WEI Shurong¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China;

2. CETC Shanghai Microwave Communication Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: To address the broadband coverage challenges in the mid-band of 5G in China and to enable future applications of 6G systems in the sub-7 GHz frequency range, this paper presents the design of a coplanar waveguide (CPW)-fed ultra-wideband, high-isolation multiple-input multiple-output (MIMO) antenna that covers the 5G frequency bands. The antenna element is based on a single elliptical patch, and ultra-wideband performance is achieved by incorporating a trident-shaped structure and cornercutting techniques. The antenna consists of two slot antenna elements, suitable for a 2×2 MIMO antenna array configuration, with overall dimensions of 118×66×0.8 mm. The two antenna elements are arranged in a parallel configuration, with their ground planes interconnected. Additionally, an “H”-shaped fence structure is introduced between the elements to improve isolation. Experimental results showed that the antenna can operate across a bandwidth of 1.15-7.80 GHz, with isolation greater than 20 dB across the operating band. The envelope correlation coefficient (ECC) was below 0.03, and the diversity gain (DG) exceeded 9.98 dB. The designed MIMO antenna features high isolation and ultra-wideband coverage, and the CPW feeding structure facilitates its integration into integrated circuits and various ultra-wideband systems. This antenna showed promising application potential in both current 5G and future 6G systems.

Key words: 5G; ultra-wideband; slot antenna; MIMO; high isolation

0 引言

随着5G移动通信系统的大规模应用,行业内已开始着手探索下一代6G移动通信技术的发展方向^[1]。5G通信系统主要使用2.6 GHz等低频段实

现广泛覆盖。随着移动通信技术的不断升级,低频载波资源逐渐减少,WRC(World Radio Communication Conferences)-23已将6.425~7.125 GHz频段划分给国际移动通信系统^[2]。因此,6G移动通信

收稿日期:2024-10-22

基金项目:教育部海上风电技术工程研究中心基金资助项目(A-2021-24-175)

作者简介:王致远(2000-),男,安徽省淮北市人,硕士生。通信作者:杜成珠(1971-),女,海南省海口市人,副教授。

系统有望将 Sub-7 GHz 频段作为其核心通信频段进行部署。该频段的应用能为现行 5G 和未来 6G 发展提供更大的容量、更快的数据速率以及更好的覆盖范围。工作带宽能同时覆盖当前 5G 通信需求的频段与未来 Sub-7 GHz 频段的超宽带多输入多输出(MIMO)天线成为当下天线设计研究的热点^[3]。

超宽带(UWB)系统凭借其大带宽、丰富的频谱资源和高速数据传输的特点而备受重视与广泛关注。超宽带天线常见的实现方法包括螺旋天线^[4]、对数周期天线^[5]和 Vivaldi 天线^[6]。受限于功耗和窄带频段干扰等因素影响,UWB 通信主要应用于短距离通信领域。MIMO 天线无需额外增加带宽或复杂的通信控制,就能显著提升频谱效率和系统数据传输速度。将超宽带技术与 MIMO 技术相结合,利用 MIMO 空间多径特性能大幅提升通信系统性能^[7]。但如何提高 MIMO 天线隔离度,降低天线信号间的影响也是天线设计的难点之一。常用的天线解耦方法有缺陷地(DGS)结构设计^[8-10]、中和线加载法^[11-13]、电磁带隙(EBG)加载法^[14-15]及加载隔离枝节法^[16-17]等。文献[10]通过在接地板顶端使用缺陷地结构,刻蚀了两个半圆形槽,有效降低了两天线端口间的耦合,实现了天线高隔离度特性。文献[13]在天线单元间加载中和线,使天线端口间隔离度超过 16 dB。文献[15]设计了一款 EBG 结构用于减小天线单元间的互耦,同时添加接地短截线,有效提升天线隔离度。文献[16]在天线单元之间设置 T 型隔离枝节,天线单元间隔离度获得明显提高。

本文设计了一款共面波导(CPW)馈电的二元超宽带高隔离度 MIMO 天线。天线由两个单元槽天线组成,通过三叉戟和缺陷地结构实现 1.15~7.80 GHz 频段覆盖。天线单元间的接地板采用互联方式,通过加载 H 型栏栅结构使单元天线间的隔离度均大于 20 dB。该天线具有全向辐射性及优异的去耦性能。

1 MIMO 天线结构设计

1.1 单元天线设计

所设计的天线采用介电常数为 4.4 的 FR4 介质基板,基板厚度为 0.8 mm。图 1 为单元天线的结构图。天线尺寸为 54 mm×66 mm×0.8 mm。天线采用 CPW 馈电,以及加载三叉戟和缺陷地结构,最终

实现了超宽带特性。天线具体尺寸如表 1 所示。

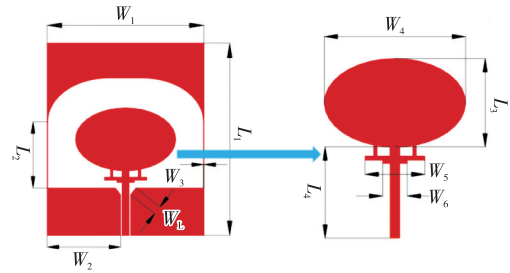


图 1 单元天线结构图

表 1 天线尺寸 mm

W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
54	24.6	0.6	34	14.2	6
L_1	L_2	L_3	L_4		
3.2	66	21.8	20.6	22	

图 2 为天线单元的设计过程。图 2(a)为天线的初始单元,呈简单的椭圆形结构。天线采用共面波导馈电,能有效降低馈电损耗。为了拓展天线频带宽度,对天线的回波损耗进行优化,在馈线上添加三叉戟结构得到天线 II(见图 2(b))。图 2(c)是在三叉戟结构上添加矩形枝节,进一步拓展了天线带宽,得到天线 III。通过对接地板进行切角处理得到了天线 IV(见图 2(d)),进一步优化了天线的阻抗匹配效果,天线的整体性能得到提升。

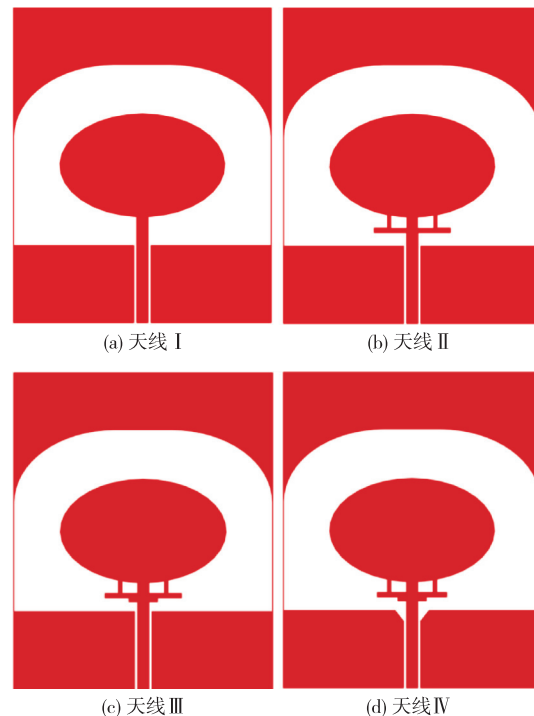


图 2 单元天线演进过程

图 3 为单元天线的 S_{11} 参数优化过程。由图可见,天线 I 的阻抗带宽($S_{11} < -10$ dB)为 1.39~1.94 GHz;天线 II 的带宽有所增加,但 4 GHz 中频段的阻抗匹配较差;在三叉戟结构中继续添加矩形枝节后,天线 III 高频段带宽增加。通过对天线阻抗匹配的进一步优化,得到天线 IV,其阻抗带宽为 1.41~7.66 GHz。

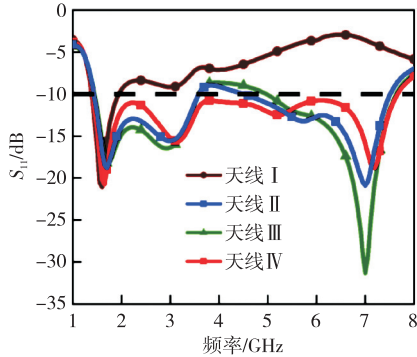


图 3 单元天线 S_{11} 演进图

1.2 二元天线设计

图 4 为该二元天线的结构和实物图。天线的尺寸参数经过仿真优化后,两天线单元间距离 $W_G = 10$ mm, $L_5 = 30$ mm, $L_6 = 45$ mm。

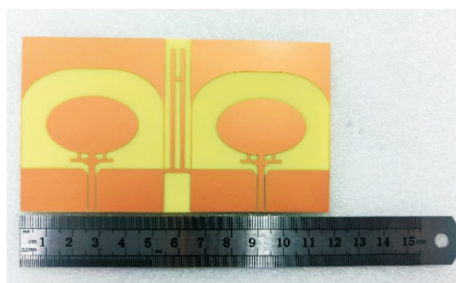
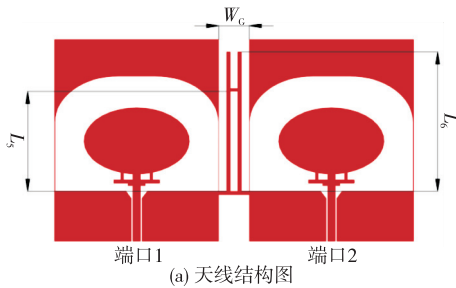
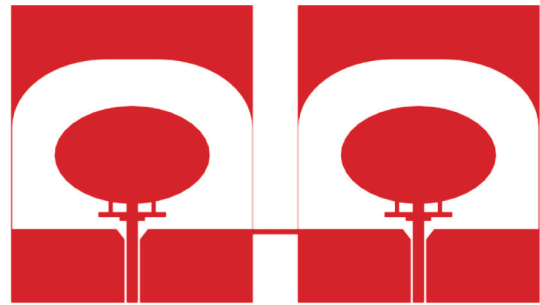
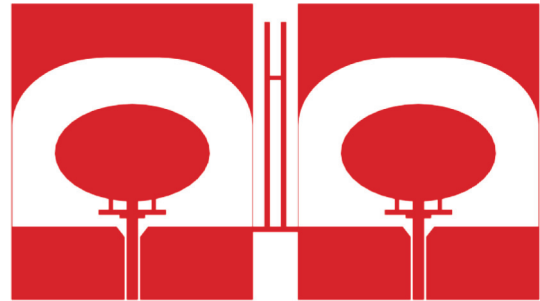


图 4 天线结构和实物图

图 5 为天线隔离结构的具体设计过程。由图可见,天线 A 的结构为两个单元天线平行放置,且两个天线单元通过接地方式相连。在此基础上增加“H”形隔离栏栅结构可得到天线 B,对两端端口间的隔离度进行优化,其结果如图 6 所示。

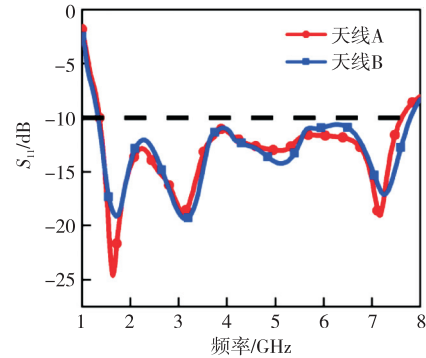


(a) 天线 A

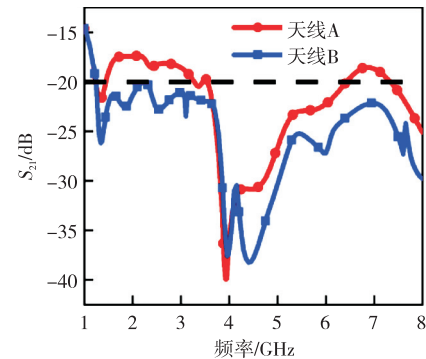


(b) 天线 B

图 5 天线隔离结构的设计过程



(a) S_{11} 的变化过程



(b) S_{21} 的变化过程

图 6 天线 A 到 B 的 S 参数变化

由图 6(a) 所示,在添加隔离结构后,天线的 S_{11} 在低频段无明显变化,而在高频段得到拓展。由图 6(b) 可见,天线 A 的 S_{21} 在 1.8~3.3 GHz 及 6.5~7.5 GHz 均大于 -20 dB。天线 B 中加载有“H”形隔离栏栅结构,耦合电流被集中在隔离结构

上,有效增加了天线的解耦能力。加入隔离结构后的天线,其隔离度均大于 20 dB,互耦情况得到有效改善。

图 7 为天线加载隔离枝节前后的电流图。由图 7(a)可见,未加载隔离结构的天线 A 中大量电流从激发端口 1 流向端口 2。由图 7(b)可得,耦合电流在加载隔离枝节后显著降低,表明该隔离结构隔离效果优异。

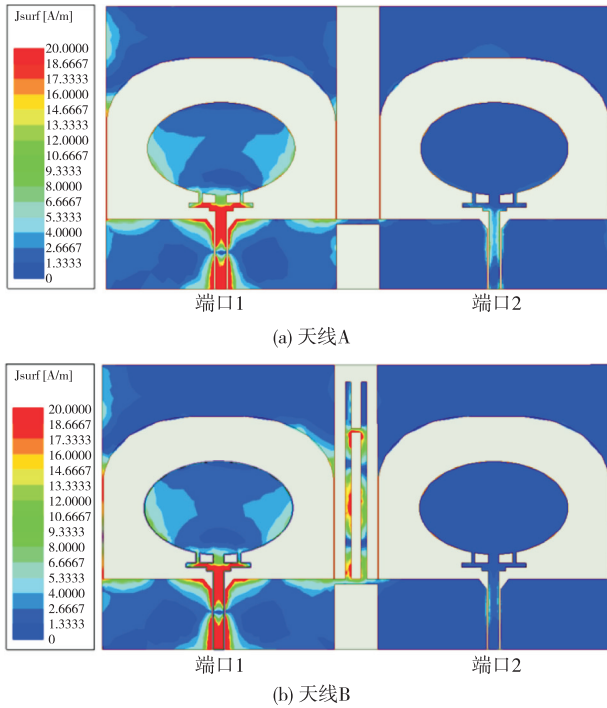


图 7 天线 A 和天线 B 的电流分布图

2 天线仿真与实测分析

采用商用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 19 进行天线的仿真设计和参数优化分析,再依据模拟和测试结果分析天线的各类参数。

2.1 天线隔离结构分析

解耦结构中 H 型栏栅的长度会影响天线单元间隔高度,故 L_6 是该结构的重要参数。图 8 为 L_6 对 S 参数影响的仿真分析图。由图 8(a)可见,当 L_6 逐渐增大时, S_{11} 变化较小,说明调节 L_6 对天线的 S_{11} 参数基本不会产生影响。由图 8(b)可见,当 $L_6=44.0$ mm 时,天线在 2.3 GHz 和 3.8 GHz 附近的隔离度小于 20 dB;当 $L_6=45.0$ mm 时,天线的隔离度均大于 20 dB;当 $L_6=46.0$ mm 时,天线在 3.8 GHz 左右不满足 20 dB 的隔离度要求。综上可知, L_6 会对 S_{21} 参数产生影响,当 $L_6=45.0$ mm 时,天线具有最佳的隔离效果。

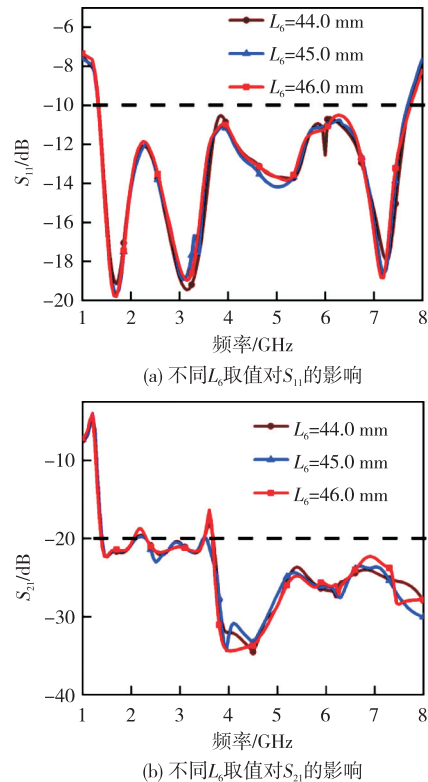


图 8 L_6 对 S 参数影响的仿真分析图

2.2 天线 S 参数

图 9 为天线实测与仿真 S 参数的对比图。

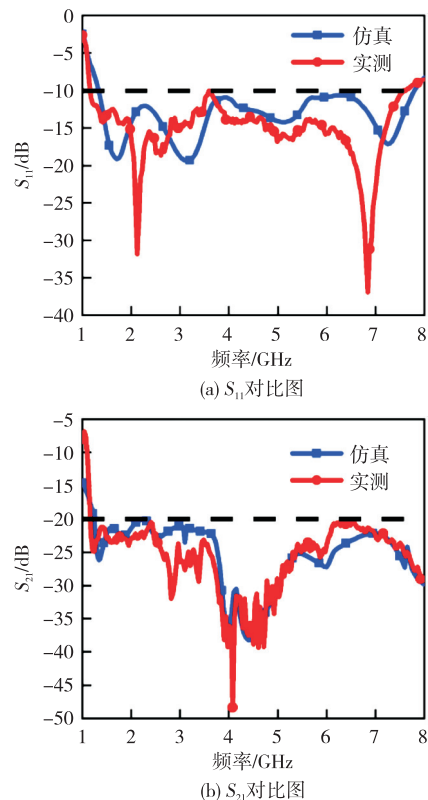


图 9 天线 S 参数仿真与实测对比图

由图 9 可知,天线实测带宽范围为 1.15 ~ 7.80 GHz,两单元天线间的隔离度均大于 20 dB。由于实测环境和焊接等因素的影响,实际的测试结果与仿真结果存在些许差别。

2.3 辐射方向图

图 10 为天线的实测与仿真远场辐射方向图。

由图可见,在 2 GHz、4 GHz 和 6 GHz 频点上,H 平面上的辐射方向图都近似于圆形,说明该天线能够实现全方位的接收;在 E 平面上,各方向图都近似于“8”字型,表明该天线具有良好的双向辐射特性。

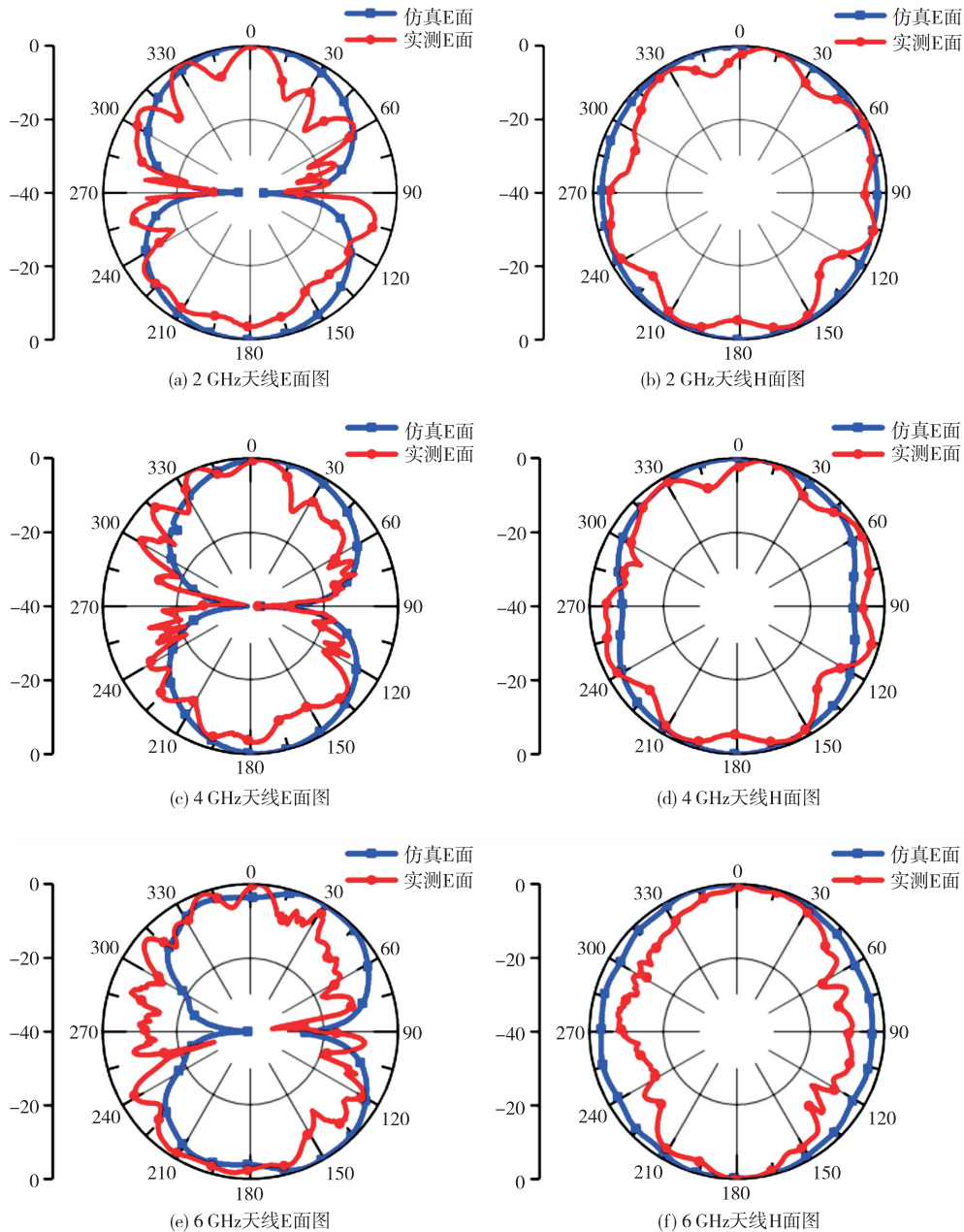


图 10 仿真与实测方向图的比较结果

2.4 天线增益

图 11 为天线增益图。由图可见,该天线在

2 GHz、4 GHz 和 6 GHz 时增益分别为 3.4 dB、5 dB 和 6.5 dB,表明天线具有优良的增益特性。但在某

些特定的频率,天线的实测增益略低于仿真值,这主要是由测量环境及 SMA 接头的损耗所致。

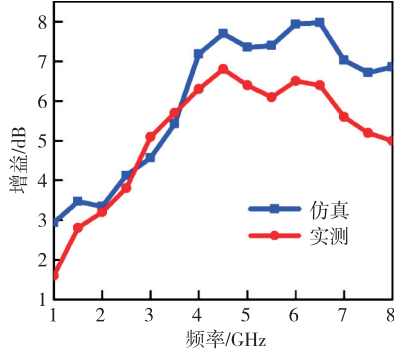


图 11 天线增益仿真与实测对比图

2.5 天线分集性能

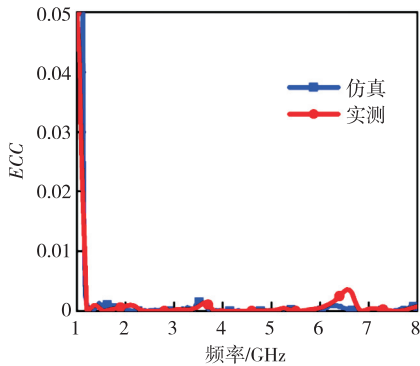
包络相关系数(ECC)是描述 MIMO 天线分集性能的关键指标。ECC 描述了天线元件被放置在有限区域时的相关程度,ECC 值越小,各信道间相关性越低,MIMO 天线分集性能越好。一般情况下,当 $ECC < 0.5$ 时,说明 MIMO 天线具有较好的独立性^[18],有:

$$\rho_e(i, j, N) = \left| \frac{\sum_{n=1}^N S_{i,n}^* S_{n,j}}{\prod_{k=i,j} (1 - \sum_{n=1}^N S_{k,n}^* S_{n,k})} \right|^{1/2} \quad (1)$$

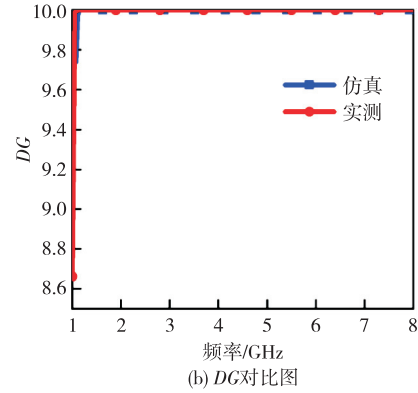
分集增益(DG)作为衡量 MIMO 天线性能的重要指标之一,通常在 $DG > 9.5$ dB 时才能体现出良好的分集特性,有:

$$DG = 10 \sqrt{1 - (ECC)^2} \quad (2)$$

图 12 为 ECC 与 DG 的仿真与实测结果对比图。由图可知,在工作频带内,MIMO 天线的实测 ECC 值均小于 0.03,而 DG 值均高于 9.98 dB,说明该 MIMO 天线元件间的相关性很小,且具有很好的分集性能。



(a) ECC对比图



(b) DG对比图

图 12 ECC 和 DG 仿真实测对比图

3 天线性能对比

表 2 是所设计天线与近年相关天线的某些性能的对比总结。由表可知,所设计的超宽带 MIMO 天线具有较宽的相对带宽和较高的隔离度特性,能实现 5G 中频段通信覆盖和未来 6G 中 Sub-7 GHz 频段要求,在 5G 及未来 6G 技术的发展上具有广泛的应用前景。

表 2 天线与其他设计性能对比

文献	馈电方式	频段/GHz	相对带宽	隔离度/dB
[9]	侧馈	4.5~16.4	113%	<-20
[10]	侧馈	2.75~10.64	118%	<-22
[12]	CPW	2.88~11.18	118%	<-20
[14]	侧馈	2.53~7.30	72%	<-16
[16]	CPW	2.5~10.8	125%	<-17
[17]	侧馈	2.57~12.2	131%	<-15
本文	CPW	1.15~7.80	149%	<-20

4 结束语

本文提出了一种面向 5G 应用的超宽带 MIMO 天线,该天线具有宽频带和高隔离度的特性。天线由两个平行槽单元天线构成。通过加载“H”形栅栏结构,可提高天线的隔离度。天线实测工作频段为 1.15~7.80 GHz,能够覆盖 5G 中频段及 Sub-7 GHz 频段。实测结果表明,天线在工作频带内隔离度均大于 20 dB,ECC 值均低于 0.03,而 DG 值高于 9.98 dB,完全满足 MIMO 天线的传输性能需求。

参考文献:

- [1] YEH C, JO G D, KO Y J, et al. Perspectives on 6G wireless communications[J]. ICT Express, 2023, 9(1): 82-91.
- [2] WONG K L, HSU Y H, LEE Chengyu, et al. Wideband 4-port patch antenna module based compact 8-

- port two-module antenna for 6G upper mid-band 8×4 device MIMO with enhanced spectral efficiency[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 88976-88991.
- [3] 索士强, 谌丽, 宋磊, 等. 面向 Sub-7 GHz 频段分布式超大规模 MIMO 技术[J]. *移动通信*, 2024, 48(6): 20-26.
- SUO Shiqiang, CHEN Li, SONG Lei, et al. Distributed extremely large-scale MIMO technology for sub-7 GHz frequency band [J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(6): 20-26.
- [4] 黄隆鑫, 袁家德. 卫星导航终端小型化开口缝隙螺旋天线[J]. *微波学报*, 2024, 40(1): 23-27.
- HUANG Longxin, YUAN Jiade. Miniaturized open slot helix antenna for satellite navigation terminal[J]. *Journal of Microwaves*, 2024, 40(1): 23-27.
- [5] 丁小锐, 姜兴, 孙逢圆, 等. 小型化超宽带蝶形印刷对数周期天线[J]. *微波学报*, 2024, 40(3): 17-21.
- DING Xiaorui, JIANG Xing, SUN Fengyuan, et al. Miniaturized ultra-wideband butterfly printed log-periodic antenna[J]. *Journal of Microwave*, 2024, 40(3): 17-21.
- [6] RAI Y, GOTRA S, KUMAR B, et al. A compact ultrawideband antipodal vivaldi antenna and its efficacy in through-wall imaging [J]. *Sensing and Imaging*, 2024, 25(1): 12.
- [7] SRINUBABU M, RAJASEKHAR N V. A compact and efficiently designed two-port MIMO antenna for N78/48 5G applications [J]. *Heliyon*, 2024, 10(7): e28981.
- [8] PRASAD K V, MAKKAPATI V S P. Investigation of slotted ground and M-shaped DGS in enhancing MIMO antenna isolation[J]. *Wireless Personal Communications*, 2024, 136(4): 2027-2045.
- [9] PRAVEEN K, SAMEENA P, SHWETA V, et al. A compact quad-port UWB MIMO antenna with improved isolation using a novel mesh-like decoupling structure and unique DGS[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(3): 949-953.
- [10] 南敬昌, 韩欣欣, 高明明, 等. 基于 DGS 的小型化 UWB-MIMO 天线的设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(5): 89-95.
- NAN Jingchang, HAN Xinxin, GAO Mingming, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antenna based on DGS[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(5): 89-95.
- [11] AMIT B, SANJEEV S, KUMAR K B, et al. MIMO/diversity antenna with neutralization line for WLAN applications[J]. *MAPAN*, 2021, 36(4): 763-772.
- [12] 越志华, 杜成珠, 杨福慧. CPW 馈电的高隔离度超宽带 MIMO 槽天线设计 [J]. *压电与声光*, 2023, 45(6): 903-909.
- YUE Zhihua, DU Chengzhu, YANG Fuhui. Design of high isolation ultra-wideband MIMO slot antenna fed by CPW[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2023, 45(6): 903-909.
- [13] DU Chengzhu, ZHAO Zhuolin, WANG Xun, et al. A compact CPW-fed triple-band MIMO antenna with neutralization line decoupling for WLAN/WIMAX/5G applications[J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2021, 103: 129-140.
- [14] PRAVEEN K, RASHMI S, ARVIND C, et al. A novel metamaterial electromagnetic band gap (MM-EBG) isolator to reduce mutual coupling in low-profile MIMO antenna[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(2): 626-634.
- [15] AWAIS K, SHAHID B, SALMAN G, et al. Mutual coupling reduction using ground stub and EBG in a compact wideband MIMO-antenna[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 40972-40979.
- [16] 荀一峰, 韩丽萍. 小型化超宽带多输入多输出天线的设计[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(3): 658-663.
- XUN Yifeng, HAN Liping. Design of miniaturized UWB multi-input and multi-output antenna[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2023, 46(3): 658-663.
- [17] TANG Xiaocong, YAO Zhao, LI Yang, et al. A high performance UWB MIMO antenna with defected ground structure and U-shape branches[J]. *International Journal of RF & Microwave Computer-Aided Engineering*, 2021, 31(2): 1-14.
- [18] MUHAMMAD I, NGHIA N T, ABBOSH A. Realization of a tapered slot array as both decoupling and radiating structure for 4G/5G wireless devices [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 159112-159118.