

应用于5G的三频MIMO天线设计

周籽怡¹, 杨志鹏², 杜成珠¹

(1. 上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 200082; 2. 国网上海市电力公司嘉定供电公司, 上海 201800)

摘要:随着5G通信技术的商用和卫星通信的快速发展及技术创新,设计了一种使用“X”型隔离结构的三频二元多输入多输出(MIMO)天线。天线由两个倒置且平行放置的单元辐射贴片组成,并通过在其正面、背面加载隔离枝节来提高天线的隔离度,同时在天线背面采用开槽技术来改善天线的带宽。天线整体尺寸仅有 $37\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$,实测工作频段为 $4.3\sim 5.8\text{ GHz}$ 、 $8.02\sim 9.3\text{ GHz}$ 和 $12.2\sim 14.8\text{ GHz}$,在工作范围内端口隔离度均优于 23 dB ,全频段包络相关系数(ECC) < 0.03 ,分集增益(DG) $> 9.99\text{ dB}$,分集性能良好,满足MIMO天线传输性能的要求。研究表明,该天线适用于5G和卫星通信系统。

关键词:5G; 卫星通信; 多频天线; 多输入多输出(MIMO); 高隔离度; “X”型隔离枝节

中图分类号:TN822 **文献标识码:**A

Design of Tri-Band MIMO Antenna for 5G Applications

ZHOU Ziyi¹, YANG Zhipeng², DU Chengzhu¹

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

2. State Grid Shanghai Electric Power Company Jiading Power Supply Company, Shanghai 201800, China)

Abstract: Within a context of commercialization of 5G communication technology and rapid development of satellite communication and technological innovation, this paper presents a three-band binary MIMO antenna based on an “X”-shaped isolation structure. The antenna consists of two inverted, parallel unit radiating patches, with isolation enhanced by loading isolation branches on both the front and back sides. A slotting technique was applied on the back of the antenna to improve bandwidth. The overall dimensions of the antenna are $37\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$, and its measured operating bands are $4.3\sim 5.8\text{ GHz}$, $8.02\sim 9.3\text{ GHz}$, and $12.2\sim 14.8\text{ GHz}$. The port isolation exceeds 23 dB within the operating range, while the full-band envelope correlation coefficient (ECC) remains below 0.03 , and the diversity gain (DG) exceeds 9.99 dB , indicating excellent diversity performance. These results demonstrate that the antenna meets MIMO-antenna transmission performance requirements and is well-suited for 5G and satellite communication systems.

Key words: 5G; satellite communication; multi-frequency antenna; MIMO; high isolation; “X”-shaped isolation branch

0 引言

目前卫星通信对小型化,低成本,低剖面,高增益,方向性的要求越来越高。天线作为收发信号的器件,在通信系统中有着重要应用^[1]。5G通信的应用现已进入大规模商用进程。相较于4G通信技术,5G移动通信系统在数据传输速率、时延和连接密度等方面具有较大优势,是当前宽带移动通信领域的研究热点^[2]。同时,5G低地轨道卫星通信可提供更强的无线覆盖,超出5G地面网络的覆盖范围,

而作为能同时接收卫星通信与5G信号的多输入多输出(MIMO)天线有着广泛的应用价值。近地轨道卫星通信能实现5G以上地面网之外的无线覆盖,因此要求卫星通信天线具有较高的增益、交叉极化隔离、低副瓣、宽频带、低回波损耗以及收发频段高隔离等^[3-4]特点。多频段天线可将所需的多个频段集合在单个天线上,既能降低互扰效应,又能避免占用其他业务所需的频带。另外,多频MIMO天线采用MIMO技术可提高传输效率和频谱利用率,减

收稿日期:2024-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62202286)

作者简介:周籽怡(2000-),女,重庆市人,硕士生。通信作者:杜成珠(1971-),女,海南省海口市人,副教授。

少各信道间的相互干扰。通过多工作模式、寄生分支、缝隙加载、多芯片、电抗负载、多贴片叠层、集总元件加载等方式可实现多频段天线^[5]。文献[6-7]通过在天线电路板背面加入寄生分支来增加额外的频段;文献[8]是在天线贴片或者地板上设置分支,从而激励出新的谐振点形成多频;文献[9-10]通过在天线上加载多个缝隙以构成多个谐振点的多频段天线。

MIMO 技术作为第五代移动通信的核心,在无线通信系统中具有重要地位。在不增加频谱资源和天线发射功率的情况下,采用 MIMO 技术可使系统容量翻倍,具有明显的优势^[11]。该技术的重点在于多个天线可实现同时发送和接收信号,但若天线间的隔离度不够高,则会导致天线之间的信号相互干扰,使信号质量降低,造成传送速率下降等问题。因此,为使 MIMO 系统达到最佳性能,MIMO 天线采用解耦技术来降低或消除多个单元天线间的干扰。文献[12]是通过两个单元天线采用正交放置方式来提高隔离度,天线各端口间的隔离度均大于 15 dB;文献[13]通过在两个单极子天线中间加载 T 型隔离结构来提高天线间的隔离度,隔离度均大于 20 dB;文献[14]是在地板上刻蚀 C 型槽以改善天线的隔离性能,实现了工作频段内隔离度均大于 20 dB。

本文设计了一款应用于 5G n79 和卫星通信的具有高隔离度特性的三频双元 MIMO 天线。它由两个倒置且平行的单元天线构成。天线单元的结构是在单极子天线的基础上添加两个枝节,从而实现天线的三频带特性。此外,在天线背面的地板上开槽,进一步优化天线的阻抗匹配,并添加“X”型去耦结构,在不影响工作频段的前提下,使天线获得较高的隔离度。所设计天线的工作带宽为 4.3~5.8 GHz、8.02~9.3 GHz 和 12.2~14.8 GHz,端口隔离度 S_{21} 均大于 23 dB。

1 天线结构设计

本文设计的三频二元 MIMO 天线选用介电常数为 4.4,损耗角正切值为 0.02,厚度为 0.8 mm 的 FR4 介质基板。天线整体尺寸为 37 mm×25 mm,基本设计结构如图 1 所示,其余经过仿真优化后的

尺寸参数如表 1 所示。

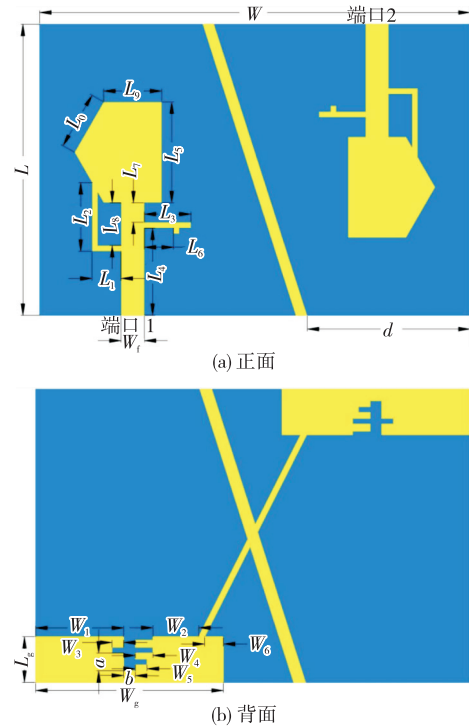
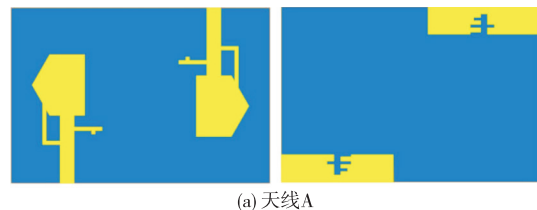


图 1 天线结构示意图

表 1 天线尺寸 mm

L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
25	2.5	6	4	7.5	8.66
L_6	L_7	L_8	a	b	W
2.5	1.67	3.66	1.5	1	37
W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
7.5	3.9	1	1.5	1	1.6
L_g	L_o	W_g	W_f		
3.9	5	16	2		

图 2 为天线的设计过程。由图可见,天线 A 由两个倒置且平行的单元天线构成,两单元天线地板的横向间距为 5 mm;为了提高天线的隔离度,在天线 B 的背面添加一个隔离枝节;天线 C 是在天线 B 的基础上,在其正面相对应的位置引入一个隔离枝节;天线 D 则是通过在天线 C 的背面再增加一个枝节,该枝节与两单元天线的地板连接,使两个单元天线的地相通,形成“X”型隔离结构。



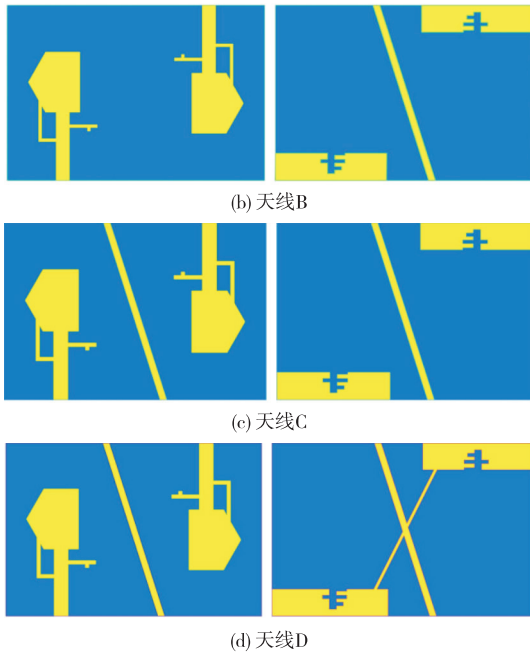


图2 天线设计递进过程

图3为设计过程中S参数对比图。

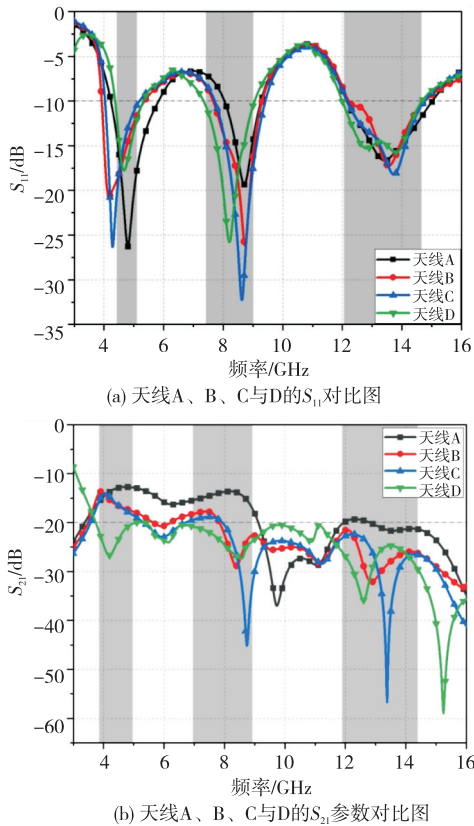


图3 天线A、B、C、D的S参数对比图

由图3可知,在天线隔离枝节的设计过程中,天线的回波损耗并未发生太大变化,有、无隔离枝节主要影响天线的隔离度;在背面地板未连接的情况下,正、反面隔离枝节的加载使天线在中高频的隔离度有

了较大提高,而将天线地面连接后则能有效地改善低频的隔离,使工作频段内隔离度 >20 dB。

根据上述的天线进程并通过模拟仿真得到最佳参数,最终加工出的天线实物如图4所示。

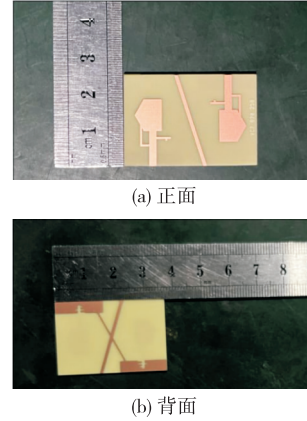


图4 天线实物图

2 天线仿真分析与实测实验结果

本文运用三维电磁仿真软件 ANSYS HFSS 对天线进行设计及仿真优化,并依据模拟和测试结果分析了天线的各类参数。

2.1 天线结构对S参数的影响分析

图5为天线右侧枝节下方,小枝节距离馈线的位置 L_6 对天线S参数的影响变化图。

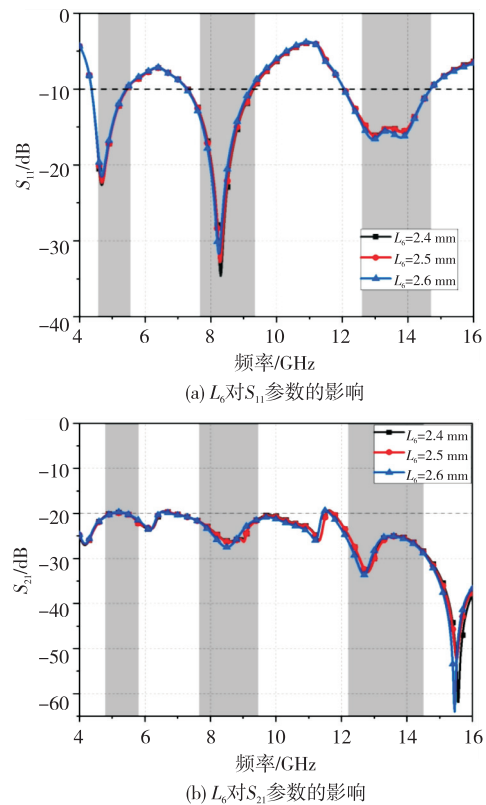
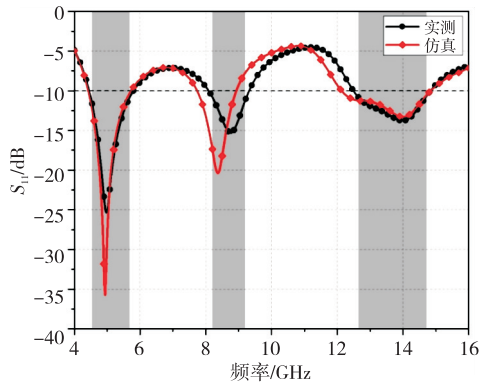


图5 L_6 参数对S参数影响的仿真分析图

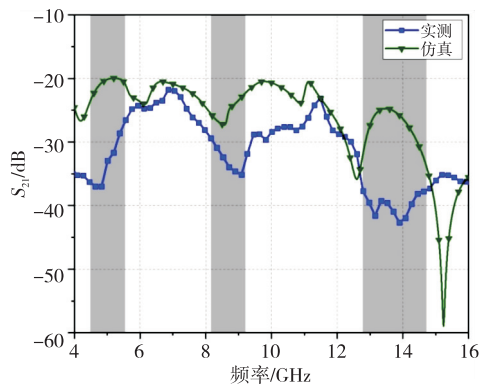
由图 5 可见,当 L_6 逐渐增大时, S_{11} 变化较小, 天线中频带的频段会整体向低频偏移, 同时带宽会逐渐减小, 但高频段和低频段的频带无明显变化。当 L_6 增大时, S_{21} 变化较小, 说明 L_6 参数对天线隔离度的影响非常小。其中, 通过调整 L_6 参数可得到约 9 GHz 的中频带。

2.2 S 参数及电流分布图

图 6 为天线 S 参数对比图。



(a) 天线 S_{11} 仿真和实测结果对比图



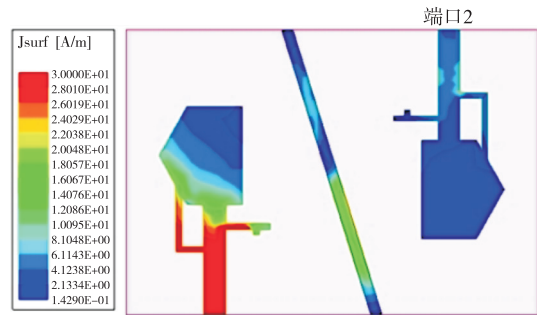
(b) 天线 S_{21} 仿真和实测结果对比图

图 6 天线仿真和实测 S 参数对比图

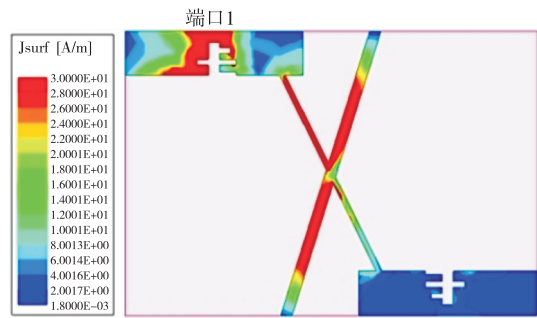
由图 6(a) 可见, 当天线实测的回波损耗曲线小于 -10 dB 时, 其工作频段带宽为 4.3~5.8 GHz、8.02~9.3 GHz、12.2~14.8 GHz。仿真与实测的 S_{11} 差别不大, 频带偏移主要出现在中频段部分, 而

导致模拟值与测试值之间存在差异的原因, 是天线受到加工公差、SMA 头焊接、测试电缆等因素影响。由图 6(b) 可见, 实测与仿真数据的隔离度均大于 20 dB, 且实测数据略优于仿真, 达到 23 dB。

图 7 为天线在 5 GHz 时正、反表面电流分布图。由图可见, 在增加了隔离结构后, 正面和背面的隔离枝节都会产生较大的耦合电流, 表明该天线使用的隔离结构能有效改善两单元天线间的隔离度。



(a) 5 GHz 天线正面电流分布

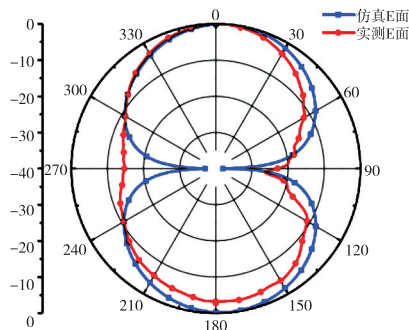


(b) 5 GHz 天线反面电流分布

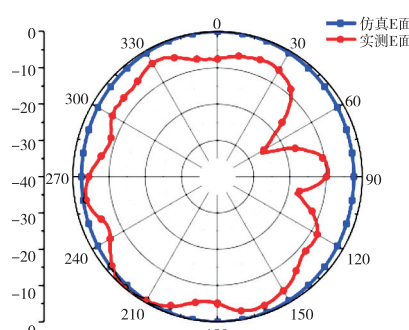
图 7 天线表面电流分布图

2.3 辐射方向图

图 8 为该天线分别在 5 GHz、9 GHz 和 14 GHz 下远场辐射方向图的实测与仿真结果比较。在这 3 个频点处, H 平面上的辐射方向图近似于圆形, 说明该天线能实现全方位的接收; 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。



(a) 5 GHz 天线 E 面图



(b) 5 GHz 天线 H 面图

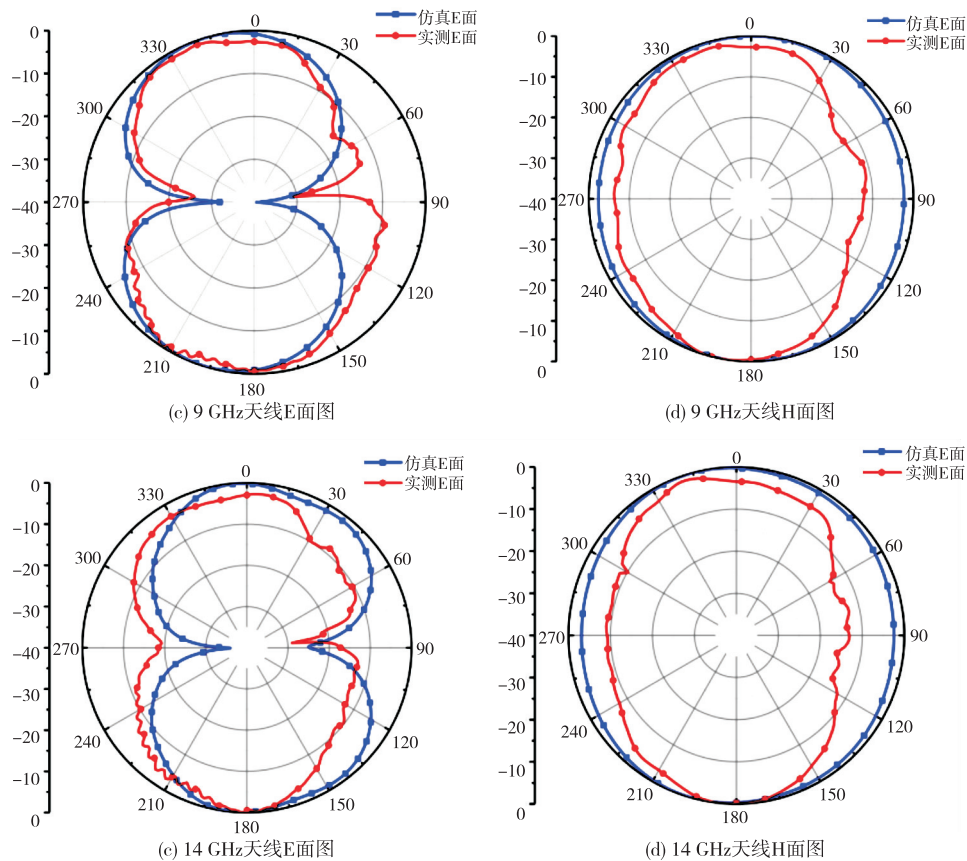


图8 仿真与实测方向图的比较结果

2.4 增益

图9为天线增益图。由图可知,该天线在5 GHz频段的增益为1.9 dB,9 GHz频段为4.9 dB,14 GHz频段为7.3 dB,说明天线具备优良的增益特性。在某些特定的频率,天线的实测增益比仿真的略低,这主要是受到测量环境的影响以及SMA接头的损耗所致。

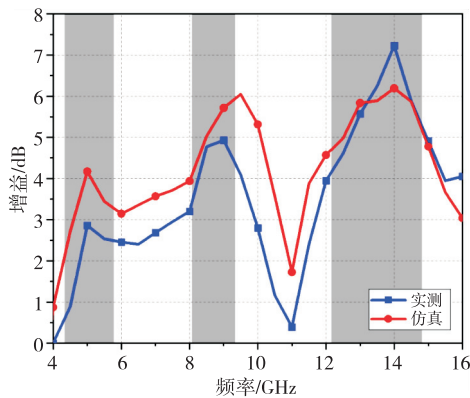


图9 天线增益仿真与实测对比图

2.5 包络相关系数

天线分集技术是保证多输入多输出通信系统

中信道非相干性的重要手段。它可用于衡量各天线间的辐射模式和偏振特性,并通过包络相关系数(ECC)进行表征。通常情况下 $ECC < 0.5$,说明多输入多输出天线具有较好的独立性。该相关系数可通过S参数进行计算,其计算方式^[15]为

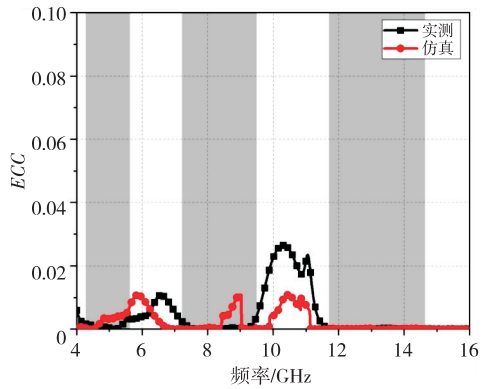
$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{|(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \cdot (1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)|} \quad (1)$$

式中 S_{11}^* 、 S_{21}^* 分别为 S_{11} 、 S_{21} 参数经共轭变换所得。

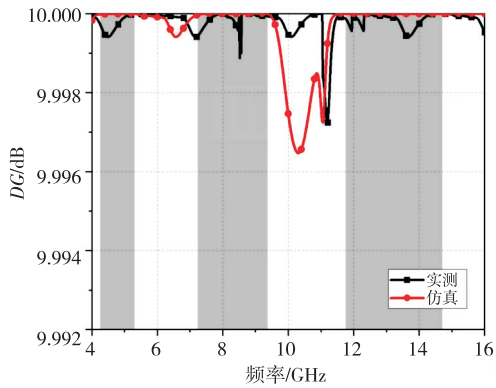
分集增益(DG)作为衡量MIMO天线性能的一个重要指标,通常当 $DG > 9.5$ dB时才能体现出良好的分集特性,有:

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

图10为ECC与DG的仿真与实测值对比图。由图可见,在整个工作频带内MIMO天线的实测ECC值均小于0.03,而DG值则高于9.99 dB,这说明该MIMO天线元件间的相关性很小,且有很好的分集性能。



(a) 天线ECC仿真与实测对比图



(b) 天线DG仿真与实测对比图

图 10 天线的 ECC 和 DG 对比图

3 天线性能比较

表 2 为所设计天线与其他天线的性能对比。由表可见,所设计的三频 MIMO 天线具有较高的隔离度,且可实现 5G 和卫星通信的频段要求,在 5G 技术与卫星通信相结合的物联网通信领域具有广阔的应用前景。

表 2 天线的性能对比

文献	馈电方式	频段/GHz	隔离度/dB	ECC	是否接地
[13]	侧馈	1.9~2.8 4.7~6.2	-20	—	是
[14]	侧馈	2.55~2.75 3.28~3.85	<-20	—	是
[16]	侧馈	2.34~2.71 3.72~5.1	<-18	<0.005	是
[17]	CPW	2.29~2.47 3.34~3.73 4.57~6.75	<-20	<0.003	是
[18]	CPW	1.98~2.03 3.55~3.7 4.8~6.4	<-25	<0.003	否

续表

文献	馈电方式	频段/GHz	隔离度/dB	ECC	是否接地
[19]	侧馈	2.38~2.74 3.35~4.02 5.18~6.51	<-20	<0.0015	否
本文	侧馈	4.3~5.8 8.02~9.3 12.2~14.8	<-23	<0.03	是

4 结束语

本文提出了一种基于“X”型隔离结构的高隔离度三频带 MIMO 天线。该天线使用 FR4 作为介质基板,并由两个倒置且平行的单元天线构成。通过加载天线正面单元天线间的隔离枝节和背面的“X”型隔离结构,提高了天线的隔离度。天线的实测工作频段为 4.3~5.8 GHz、8.02~9.3 GHz 和 12.2~14.8 GHz,其满足 5G n79、X/Ku 波段卫星通信要求。实测结果表明,天线在工作频带上的隔离度均大于 23 dB、全频段 ECC 值均低于 0.03, DG 值则高于 9.99 dB,符合 MIMO 天线的传输性能需求。

参考文献:

- [1] RUPAL I, SAHUS K, PALAI G. A microstrip patch antenna using sir technique designed for C-band satellites application [C] // Phagwara, India: International Conference on Small Satellites (ICSS), 2023.
- [2] LIU Shuzhi, WEI Yiqiao, HWANG S H. Guard band protection for coexistence of 5G base stations and satellite earth stations [J]. ICT Express, 2023, 9 (6): 1103-1109.
- [3] TAYYAB U, KUMAR A, PETRY H P, et al. Dual-band nested circularly polarized antenna array for 5G automotive satellite communications [J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(21): 11915.
- [4] CLENCY L Y, PHILIP V, SUDHAKAR R. High performance antenna feed systems for satellite communications [C] // Ahmedabad, India: 2023 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 2023.
- [5] 李商洋. 小型宽带多频天线的研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
LI Shangyang. Research and design of small broadband multi-band antenna [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [6] 周云艳, 赵年顺. 一种四单元三频 MIMO 天线设计

- [J]. 新乡学院学报, 2021, 38(6): 12-15.
- ZHOU Yunyan, ZHAO Nianshun. A four-cell tri-band MIMO antenna design[J]. Journal of Xinxiang College, 2021, 38(6): 12-15.
- [7] TANAKA S, NOGUCHI K. A dual-band j-type meander antenna for 5G applications[C]//[S. l.]: 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2021.
- [8] SUMAN M, DEEPIKA S, JAGADESWARI S P S, et al. Design of dual band antenna with asymmetric microstrip-fed dual u-shaped for wireless applications[C]//Coimbatore, India; 2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC), 2021.
- [9] DAHIYA A, ANAND R, SINDHWANI N, et al. A novel multi-band high-gain slotted fractal antenna using various substrates for X-band and Ku-band applications[J]. MAPAN, 2022, 37(1): 175-183.
- [10] VIJAYA L A, KALPANA M, RAMANA R R, et al. A slotted octagonal patch antenna for multi-band and high gain applications[C]//Ahmedabad, India; 2023 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 2023.
- [11] 曹霞. 小型化多频段 MIMO 天线的设计与去耦方法研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- CAO Xia. Research on the design and decoupling method of miniaturized multi-band MIMO antenna[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2022.
- [12] KUMAR M R, KUMAR M S, KUMAR S A, et al. Quad element mimo antenna for C, X, Ku, and Ka-Band applications[J]. Sensors, 2023, 23(20): 8563.
- [13] 张梦怡, 王田. 可用于物联网的高隔离度双频 MIMO 天线[J]. 电讯技术, 2018, 58(2): 210-213.
- ZHANG Mengyi, WANG Tian. High isolation dual-band MIMO antenna that can be used for IoT[J]. Telecommunication Technology, 2018, 58(2): 210-213.
- [14] 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.
- WANG Peng, CHENG Huodi, KOREA Rui. Highly isolated dual-band MIMO antenna design for 5G applications[J]. Journal of Test Technology, 2023, 37(2): 165-169.
- [15] IKRAM M, NGUYEN-TRONG N, ABBOSH A M. Realization of a tapered slot array as both decoupling and radiating structure for 4G/5G wireless devices[J]. IEEE Access, 2019, 7: 159112-159118.
- [16] XI Shuqi, CAI Jing, SHEN Lingrong, et al. Dual-band MIMO antenna with enhanced isolation for 5GNR application[J]. Micromachines, 2022, 14(1): 95.
- [17] 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.
- [18] RAMASAMY S, MADHU A. A compact tri-band MIMO antenna for WLAN and 5G applications[J]. Applied Physics A, 2024, 130(2): 1-9.
- [19] GANGWAR A K, ALAM M S. A compact size tri-band MIMO antenna with reduced mutual coupling for WLAN and WiMAX applications[C]//Aligarh, India; Proceedings of the 2017 International Conference on Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies, 2017: 257-261.

(上接第 31 页)

- [9] MERTIN S, NYFFELER C, MAKKONEN T, et al. Non-destructive piezoelectric characterisation of Sc doped aluminium nitride thin films at wafer level[C]//Glasgow, United Kingdom: 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), 2019: 2592-2595.
- [10] UMEDA K, KAWAI H, HONDA A, et al. Piezoelectric properties of ScAlN thin films for piezo-MEMS devices[C]//Taipei, China; 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS), 2013: 733-736.
- [11] TSENG S H, LO S C, CHEN Yuchen, et al. Implementation of piezoelectric MEMS microphone for sensitivity and sensing range enhancement[C]//Vancouver, BC, Canada; 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS), 2020: 845-848.