

文章编号: 1671-7449(2026)02-0259-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 259-266.

基于缺陷地结构的双频紧凑高隔离5G MIMO天线

张圣^{1,2}, 韩国瑞^{1,2*}

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 无线通信与检测山西省重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 设计了一种可应用于5G无线通信的双频紧凑高隔离度多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)天线。该天线由两个水平紧凑放置的天线单元组成, 天线辐射贴片边与边的间距仅为2 mm ($0.024\lambda_0$, λ_0 为3.55 GHz时自由空间波长)。天线的两个频带是通过在矩形辐射贴片上刻蚀U型缝隙来实现的, 可以同时覆盖中国联通n78(3.50~3.60 GHz)频段和中国移动n79(4.80~4.90 GHz)频段。在接地板上刻蚀弯折缝隙和矩形缝隙来分别降低这两个频段内天线单元间的耦合。仿真和实测结果表明, 所设计天线的工作频段为3.49~3.60 GHz和4.78~4.91 GHz, 隔离度分别高于20 dB和25 dB, 包络相关系数低于0.001, 具有良好的辐射性能。

关键词: 缺陷地结构; 多输入多输出; 隔离度; 紧凑双频

中图分类号: TN828.4

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026015

引用格式: 张圣, 韩国瑞. 基于缺陷地结构的双频紧凑高隔离5G MIMO天线[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 259-266.

ZHANG Sheng, HAN Guorui. A dual-frequency compact and highly isolated MIMO antenna based on DGS for 5G communication[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 259-266.

A Dual-Frequency Compact and Highly Isolated MIMO Antenna Based on DGS for 5G Communication

ZHANG Sheng^{1,2}, HAN Guorui^{1,2*}

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

2. Shanxi Key Laboratory of Wireless Communication and Detection, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A dual-band compact high-isolation multiple-input multiple-output (MIMO) antenna for 5G wireless communications is designed. The antenna consists of two horizontally compact antenna elements with an edge-to-edge spacing of 2 mm ($0.024\lambda_0$, where λ_0 represents the free-space wavelength at 3.55 GHz). The two frequency bands of the antenna are realized by etching a U-shaped slot on the rectangular radiating patches, achieving simultaneous coverage of China Unicom's n78 band (3.50~3.60 GHz) and China Mobile's n79 band (4.80~4.90 GHz). Bending gaps and rectangular gaps are etched on the ground plane to reduce the coupling between the antenna units in the two frequency ranges respectively. Both simulation and measurement demonstrate that the antenna operates in the frequency ranges of 3.49~3.60 GHz and 4.78~4.91 GHz, with

【收稿日期】2025-04-11

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62071282, 61771295); 山西省自然科学基金资助项目(201901D111027, 202203021211295, 202303021221072); 山西省归国留学人员科研资助项目(2021-006)

【作者简介】张圣(1998—), 男, 硕士生, 主要从事微带天线和MIMO天线设计等研究。E-mail: zhangsheng7792@163.com。

*【通信作者】韩国瑞(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事微带天线以及射频通信研究。E-mail: han_gr@sxu.edu.cn。

isolation levels exceeding 20 dB and 25 dB respectively. The envelope correlation coefficient (ECC) remains below 0.001, indicating excellent radiation performance.

Key words: defected ground structure; multiple-input multiple-output (MIMO); isolation; compact dual-frequency

0 引言

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)无线通信系统通过在发射端和接收端部署两个或两个以上天线,借助空间复用和分集增益机制来改善通信性能,提高信道容量和数据传输速率,在5G通信领域得以广泛应用^[1]。然而,天线数量的增加以及当前设备小型化的趋势,使得在天线设计中要重点考虑如何降低天线间的耦合。

目前,国内外研究人员针对MIMO天线的去耦提出了很多方法,包括加载电磁带隙结构去耦^[2-3]、添加中和线去耦^[4-5]、极化正交去耦^[6-7]、加载超表面去耦^[8]、解耦网络去耦^[9-10]、自去耦^[11-12]、缺陷地去耦^[13-15]等。其中,Tan等^[3]通过在两个双频弯折线天线单元间布置一种新型分裂电磁带隙结构,在两个工作频段分别获得了26 dB和44 dB的隔离度。严冬等^[4]通过在双频天线之间添加一条U型中和线,将两个频段的隔离度均提高到20 dB。林倍进等^[7]通过将两个天线单元正交放置实现极化分集,同时在接地板上刻蚀矩形缝隙进一步提高隔离度,将双频段的隔离度都提高到23.2 dB以上。Liu等^[8]采用一种基于超表面的去耦方法,通过在双频贴片天线上方放置超表面覆盖层,在两个工作频段内均获得了超过25 dB的隔离度。但由于覆盖层的存在,使得天线的剖面高度达到了11 mm。Li等^[10]基于优化算法设计了解耦网络,将两个频段的隔离度均提高到20 dB以上。Yang等^[11]提出了一种实现宽带自解耦的模式转换方法,通过该方法隔离度提高到25 dB以上,去耦带宽达到18.9%。Deng等^[13]通过在双频倒F天线之间的接地板上刻蚀T型槽缺陷地结构(Defected Ground Structure, DGS),提高了天线在较低频段的隔离度。在T型槽中插入弯曲谐振分支提高了较高频段隔离度,使得两个频段的隔离度均高于15 dB。王新延等^[14]在单频微带天线之间的接地板上刻蚀锯齿状DSG,将隔离度提高了28.8 dB。段铸等^[15]采用DSG和寄生枝节相结合的去耦方法,在接地板上引入T型去耦枝节并刻蚀矩形槽结构,将两个频段的隔离度分别提升至23 dB和29 dB。在以上解耦方

法中,DGS有着结构简单、设计灵活和成本低廉的优势,可以有效提高多天线系统的隔离度。然而,DGS通常布置在天线单元间,导致其更多地应用在天线单元间距较大的MIMO天线中^[13-15]。

为了提高紧凑排列的双频天线之间的隔离度,本文设计了一种基于缺陷地结构解耦,能够同时覆盖中国联通n78(3.50~3.60 GHz)频段和中国移动n79(4.80~4.90 GHz)频段的双频紧凑高隔离度5G MIMO天线。该天线由两个水平紧凑放置的天线单元组成,通过刻蚀U型缝隙实现双频。为了提高单元间的隔离度,在天线单元两侧的接地板上刻蚀矩形缝隙和弯折缝隙分别对两个频段去耦。仿真和实测结果表明,两个工作频段内的隔离度分别大于20 dB和25 dB。

1 MIMO 天线结构设计

本文设计的双频MIMO天线几何结构如图1所示。

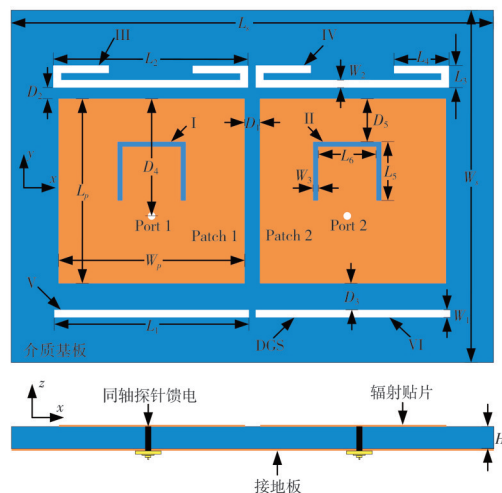


图1 MIMO天线的几何结构

Fig. 1 Geometry of MIMO antenna

该天线印刷在厚度 H 为2.4 mm的FR4介质基板上(相对介电常数为4.3,损耗角正切为0.02)。介质基板顶层并列刻蚀两个辐射贴片,边与边的间距 D_1 为2 mm($0.024 \lambda_0$, λ_0 为3.55 GHz时自由空间波长)。其上分别刻蚀了U型缝隙I和II来实现双频谐振。介质基板底层印刷有长度和宽度与介质基

板相同的接地板。天线在两个工作频段的耦合则分别由接地板上刻蚀的弯折缝隙Ⅲ、Ⅳ和矩形缝隙Ⅴ、Ⅵ来减小。天线采用同轴探针馈电。本文使用电磁仿真软件 CST 对天线的参数进行优化,天线的最终设计尺寸如表 1 所示。

表 1 天线的设计参数

Tab. 1 Design parameters of antenna

参数	数值/mm	参数	数值/mm	参数	数值/mm
H	2.40	L_3	3.00	D_1	2.00
L_s	60.00	L_4	5.20	D_2	1.30
W_s	50.00	L_5	6.90	D_3	3.30
L_p	18.50	L_6	6.00	D_4	11.15
W_p	17.50	W_1	1.00	D_5	3.25
L_1	19.00	W_2	1.00		
L_2	19.00	W_3	0.50		

在矩形辐射贴片上刻蚀 U 型缝隙,改变其表面电流分布,电流沿着 U 型缝隙流动,从而产生新谐振,实现天线的双频特性。图 2(a) 和图 2(b) 分别为 U 型缝隙的长度 L_5 和 L_6 变化时对天线单元的输入反射系数 S_{11} 的影响。

可以看出,随着 L_5 和 L_6 的增加,两个频段的谐振频率都有所降低。较高频段的谐振频率降低更显著,说明参数 L_5 和 L_6 主要影响较高频段的谐振频率。

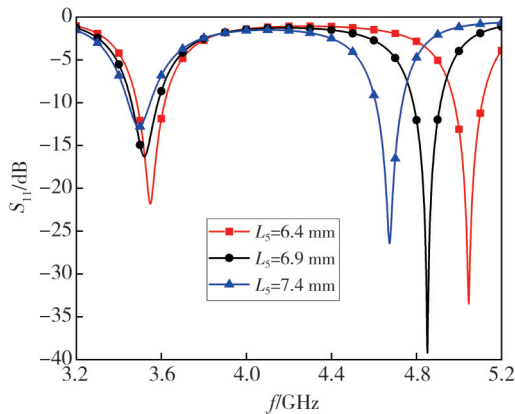
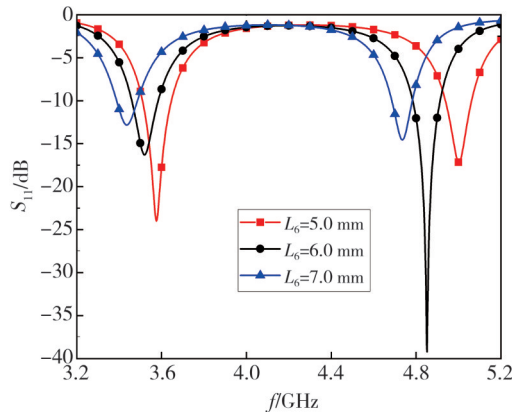
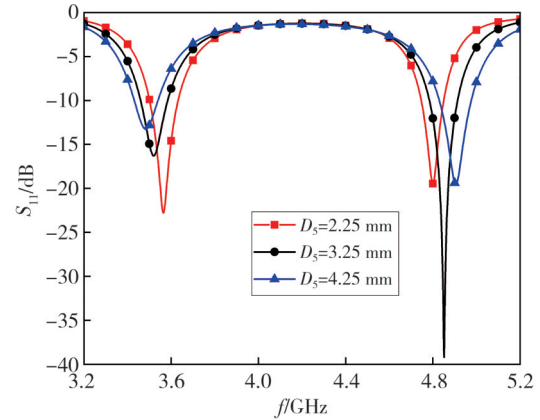
(a) L_5 对 S_{11} 的影响(b) L_6 对 S_{11} 的影响(c) D_5 对 S_{11} 的影响图 2 U 型缝隙对 S_{11} 的影响Fig. 2 Impact of U-shaped slot on S_{11}

图 2(c) 为 U 型缝隙的位置 D_5 变化时对天线单元的 S_{11} 的影响。可以看出,随着 D_5 的增加,较高频处的 S_{11} 曲线的深度变化明显,说明 D_5 主要影响较高频段的阻抗匹配。为了实现最佳的双频谐振,优化后的参数为 $L_5=6.9$ mm, $L_6=6$ mm, $D_5=3.25$ mm。

2 天线去耦及参数分析

MIMO 天线的设计过程如图 3 所示。

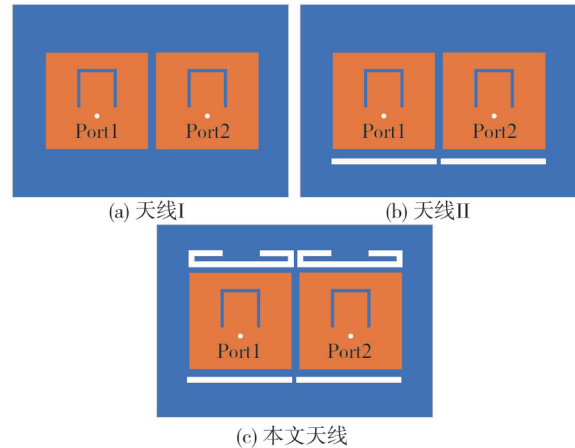


图 3 MIMO 天线设计过程

Fig. 3 Design process of MIMO antenna

将两个双频天线单元并排紧凑放置得到天线 I,其辐射贴片间距仅为 2 mm ($0.024 \lambda_0$, λ_0 为 3.55 GHz 时自由空间波长)。在天线 I 的辐射贴片下侧对应的接地板上刻蚀矩形缝隙后得到天线 II。矩形缝隙的边长约为 4.85 GHz 对应的介质波长的 1/2。为了不增加天线的整体宽度,在天线 II 的辐射贴片上侧对应的接地板上刻蚀弯折缝隙后得到了本文天线。弯折缝隙的边长约为 3.55 GHz 对应的介质波长的 1/2。

天线设计过程的 S 参数如图4所示。从图4(a)可以看到,天线I的阻抗带宽为3.46~3.67 GHz和4.78~4.91 GHz,两个频段的隔离度分别为6 dB和18.4 dB,此时隔离度较低。从图4(b)可以看到,刻蚀矩形缝隙后较高频段的隔离度提高到25 dB以上。从图4(c)可以看到,刻蚀弯折缝隙后较低频段的隔离度提高到20 dB以上。

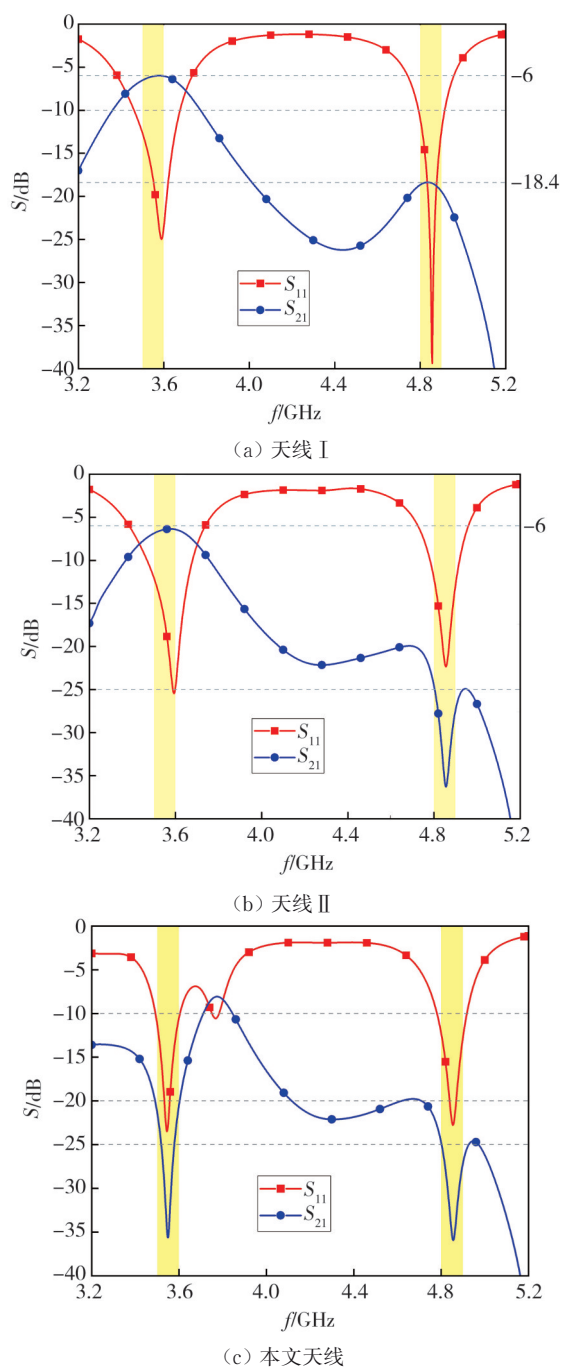


图4 不同天线结构的 S 参数

Fig. 4 S -parameter of different antenna structures

为了更好地理解缺陷地结构的去耦原理^[16],图5给出了刻蚀缝隙前后天线I和本文天线在接

地板上的表面电流分布图。其中端口1被激励,端口2接50 Ω 匹配负载。

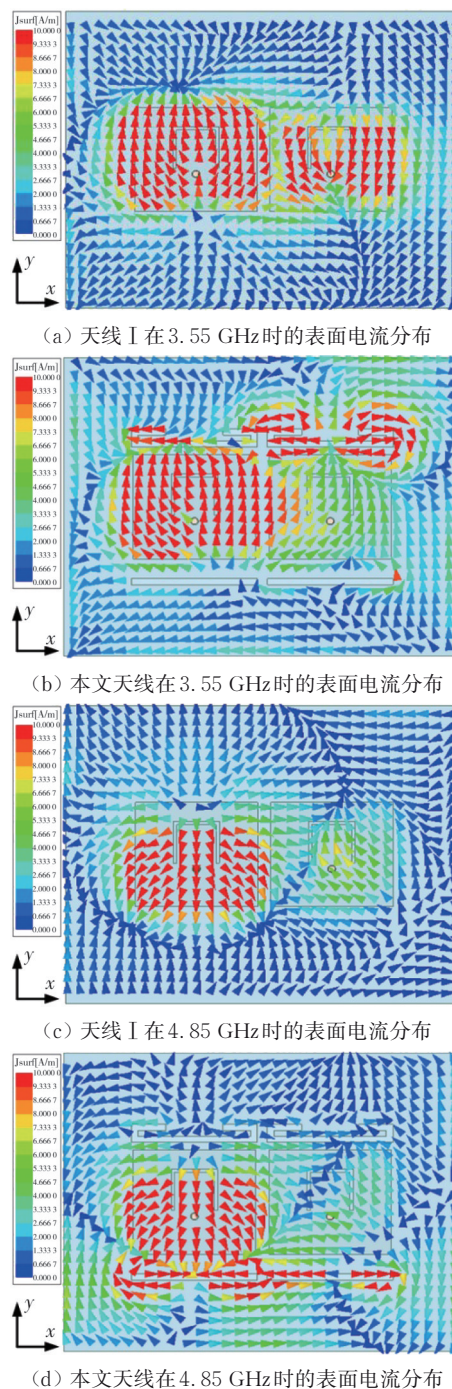


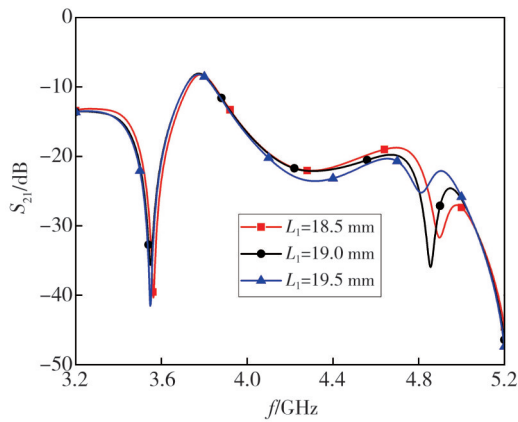
图5 接地板的表面电流分布

Fig. 5 Surface current distribution of ground plane

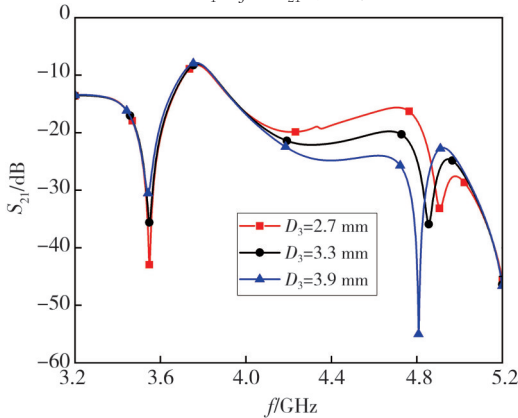
从图5(a)和图5(c)可以看到,去耦前的天线I接地板上的电流流向基本上沿 y 轴方向流动,端口2附近存在大量电流。从图5(b)可以看到,3.55 GHz时耦合电流主要集中在上侧弯折缝隙处,端口2附近的电流降低,说明弯折缝隙起到带阻的作用,抑制了3.55 GHz的电流。从图5(d)可

以看到, 4.85 GHz 时耦合电流主要集中在下侧矩形缝隙处, 端口 2 附近的电流降低, 说明矩形缝隙起到带阻的作用, 抑制了 4.85 GHz 的电流。

图 6 和图 7 分别给出缝隙尺寸对 MIMO 天线性能的影响。图 6 为矩形缝隙的边长 L_1 和位置 D_3 对正向传输系数 S_{21} 的影响。由图 6(a) 可以看到, 随着 L_1 增长, 较高频段的谐振频率逐渐降低, 说明可以通过调整边长 L_1 来控制较高频段的去耦频率。由图 6(b) 可以看到, 随着 D_3 增长, 较高频段 S_{21} 曲线的去耦深度增加, 且谐振频率逐渐降低, 说明可以通过调整 D_3 来使隔离度最优。综合考虑工作频率和隔离度等因素, 最终选取参数 $L_1=19$ mm, $D_3=3.3$ mm。



(a) L_1 和 f 对 S_{21} 的影响

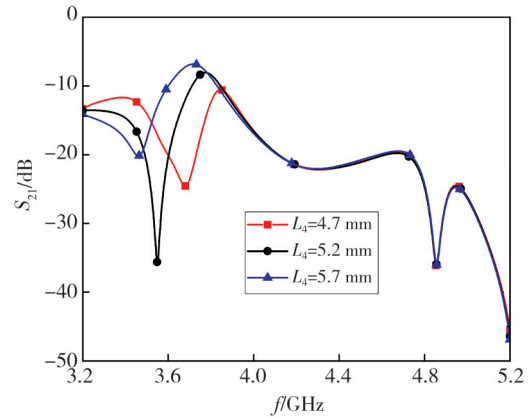


(b) D_3 和 f 对 S_{21} 的影响

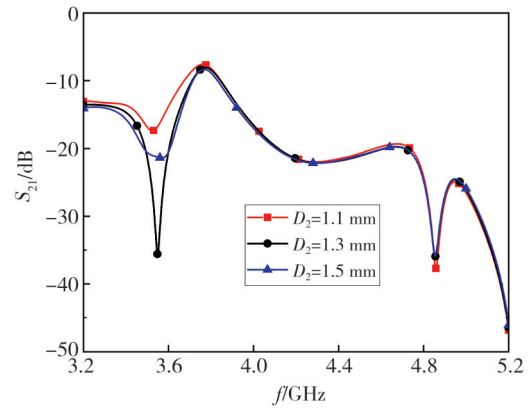
图 6 参数 L_1 、 D_3 和 f 对 S_{21} 的影响

Fig. 6 Impact of L_1 , D_3 and f on S_{21}

图 7 给出了弯折缝隙的边长 L_4 和位置 D_2 对 S_{21} 曲线的影响。由图 7(a) 可以看到, 随着 L_4 的增长, 较低频段的谐振频率逐渐降低, 说明可以调整参数 L_4 来控制较低频段的去耦频率。由图 7(b) 可以看到, 随着 D_2 的增长, 较低频段 S_{21} 曲线的去耦深度先增加后减少, 说明可以调整 D_2 来使隔离度最优。综合考虑工作频率和隔离度等因素, 最终选取参数 $L_4=5.2$ mm, $D_2=1.3$ mm。



(a) L_4 和 f 对 S_{21} 的影响



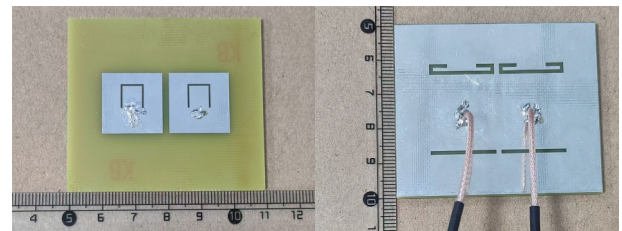
(b) D_2 和 f 对 S_{21} 的影响

图 7 参数 L_4 、 D_2 和 f 对 S_{21} 的影响

Fig. 7 Impact of L_4 , D_2 and f on S_{21}

3 结果与讨论

为了测试天线的实际性能, 对天线进行了加工制作。加工后的天线实物如图 8 所示, 天线整体尺寸为 60 mm×50 mm×2.4 mm, 采用同轴探针馈电。利用矢量网络分析仪实测得到 S 参数, 在微波暗室中测量得到辐射方向图。



(a) 天线顶视图

(b) 天线底视图

图 8 天线的加工实物图

Fig. 8 Physical picture of proposed antenna

3.1 S 参数

仿真和实测的 S 参数如图 9 所示。可以看出, 仿真的阻抗带宽为 3.49~3.60 GHz 和 4.78~4.91 GHz。实测的阻抗带宽为 3.48~3.63 GHz

和 4.79~4.92 GHz。仿真的 S_{21} 曲线在两个频段分别小于 -20 dB 和小于 -25 dB。实测的 S_{21} 曲线

在两个频段分别小于 -20.91 dB 和小于 -27.11 dB。仿真与实测结果间的误差很小。

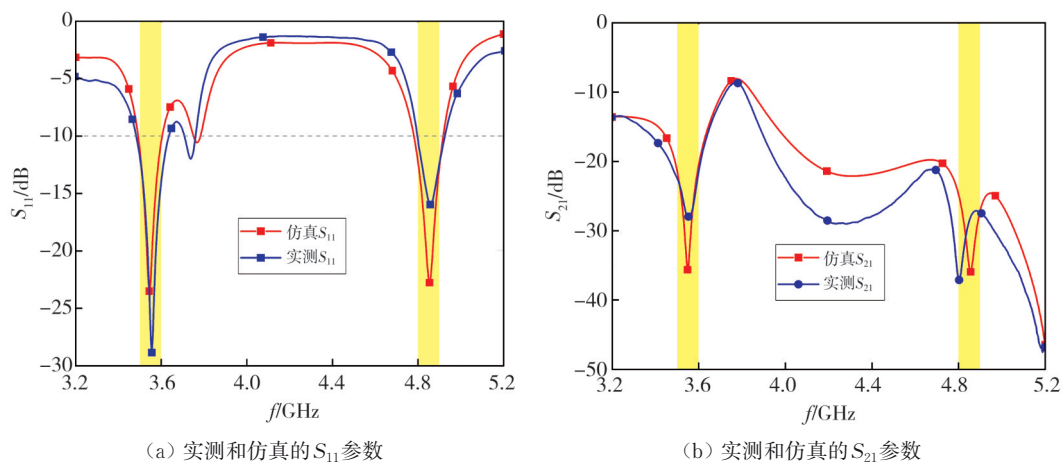


图 9 实测和仿真的 S 参数

Fig. 9 Measured and simulated S -parameters

3.2 辐射性能分析

图 10 为 3.55 GHz 和 4.85 GHz 频率下 xoz 面和 $yo z$ 面的二维方向图仿真和实测结果。可以看

出, 仿真与实测的辐射方向图在最大辐射方向上基本一致, 测量结果与模拟结果吻合。天线在 3.55 GHz 和 4.85 GHz 频段的峰值增益分别为 1.77 dBi 和 1.92 dBi。

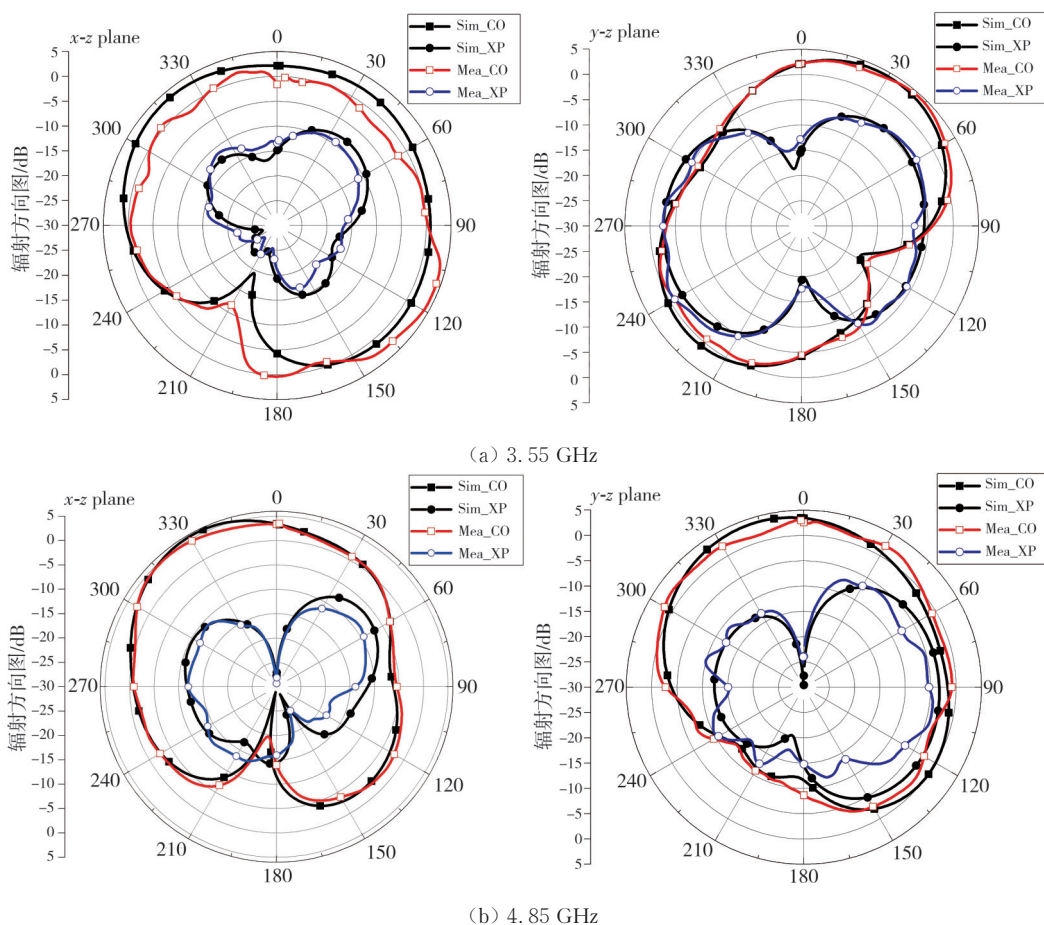


图 10 MIMO 天线的辐射方向图

Fig. 10 Radiation pattern of MIMO antenna

3.3 分集特性

包络相关系数(Envelope Correlation Coefficient, ECC)是衡量两天线空间耦合强度的物理量。ECC 越低,天线间的相关性越弱,MIMO 系统的分集增益(Diversity Gain, DG)就越高。在工程上一般要求 ECC 低于 0.5,本文的 ECC 由式(1)计算得到。

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

式中: S_{11}^* 为 S_{11} 的共轭转置; S_{21}^* 为 S_{21} 的共轭转置。

本文天线的 ECC 值如图 11 所示,在两个工作频带内 ECC 值均小于 0.001,远小于在工程上的一般要求。DG 的标准是尽可能接近 10 dB。本文的 DG 由式(2)计算得到。

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

计算结果如图 12 所示,可以看到在两个工作频带内 DG 值均接近 10 dB,说明本文天线具有良好的分集特性。

表 2 为部分参考文献中的双端口 MIMO 天线与本文所设计天线的对比。其中, λ_0 为自由空间内天线较低频段谐振频率的对应波长。可以看出,与文献[3-4]相比,本文天线能在边到边间距更小的条件下实现去耦,同时的值更低。与文献[8]相比,本文天线的 ECC 值更低,天线间的相关性更弱。与使用 DGS 去耦的文献[13-15]相比,本文天线的边到边间距最低, ECC 值最低。说明本文天线具有结构紧凑、分集特性良好的特点。与文献[13]相比,本文天线

在两个频段的隔离度更高。与文献[14]相比,本文天线实现了双频去耦。

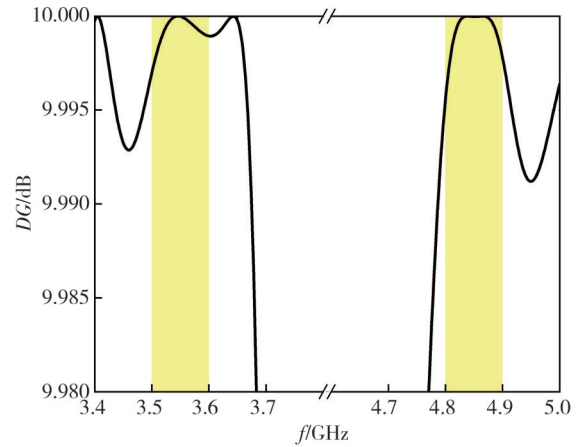


图 12 天线的分集增益

Fig. 12 DG of antenna

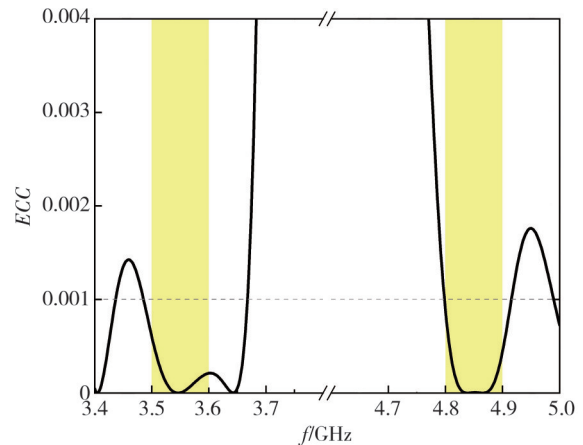


图 11 天线的包络相关系数

Fig. 11 ECC of antenna

表 2 双端口 MIMO 天线的性能
Tab. 2 Performance of dual-port MIMO antennas

来源	带宽/GHz	去耦方法	隔离度/dB	边到边间距	ECC
文献[3]	3.42~3.60	Electromagnetic Bandgap(EBG)	26	0.34 λ_0	0.013
	4.70~5.10		44		0.001
文献[4]	2.26~2.65	Neutralization Line(NL)	20	0.09 λ_0	0.01
	4.87~6.07		20		0.01
文献[8]	2.50~2.70	Metasurface-Based Decoupling Method(MDM)	25	0.008 λ_0	0.08
	3.40~3.60		25		0.01
文献[13]	2.40~2.48	DGS and Meandering Resonant Branch(MRB)	15	0.115 λ_0	0.02
	5.15~5.825		15		0.02
文献[14]	5.722~5.892	DGS	34.1	0.05 λ_0	0.03
文献[15]	2.84~4.02	DGS and Parasitic Branch(PB)	23	0.14 λ_0	0.004
	4.52~5.59		29		0.004
本文	3.49~3.60	DGS	20	0.024 λ_0	0.001
	4.78~4.91		25		0.001

4 结 论

本文设计了一种能够同时覆盖中国联通 n78

(3.50~3.60 GHz)频段和中国移动 n79(4.80~4.90 GHz)频段的双频紧凑高隔离度 5G MIMO 天线。天线单元通过刻蚀 U 型缝隙实现了 3.49~

3.60 GHz和4.78~4.91 GHz的阻抗带宽。为了减少耦合,在接地板上添加了缺陷地缝隙结构,使两个频段的隔离度分别高于20 dB和25 dB, *ECC*都小于0.001。该天线综合性能良好,结构紧凑,满足了现如今对于天线空间的限制以及多频的需求,可用于5G无线通信系统。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 姜英爽, 刘东林, 曹喜生. 2*2 MIMO 系统模型搭建及误码率分析[J]. 电气传动自动化, 2024, 46(4): 67-70.
JIANG Yingshuang, LIU Donglin, CAO Xisheng. 2*2 MIMO system model construction and error rate analysis [J]. Electric Drive Automation, 2024, 46(4): 67-70. (in Chinese)
- [2] 司晴晴, 曾庆生, 石源, 等. 用于 5.8 GHz 频段的低互耦圆形微带阵列天线[J]. 航空兵器, 2022, 29(3): 107-113.
SI Qingqing, ZENG Qingsheng, SHI Yuan, et al. A low mutual coupling circle microstrip array antenna for 5.8 GHz band [J]. Aero Weaponry, 2022, 29(3): 107-113. (in Chinese)
- [3] TAN X, WANG W, WU Y, et al. Enhancing isolation in dual-band meander-line multiple antenna by employing split EBG structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2769-2774.
- [4] 严冬, 郭琪富, 程威, 等. 一种可应用于 WLAN 的高隔离度双频 MIMO 天线设计[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(6): 91-96.
YAN Dong, GUO Qifu, CHENG Wei, et al. Design of a high-isolation dual-frequency MIMO antenna for WLAN [J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(6): 91-96. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] HU W, LI Q, WU H, et al. Dual-band antenna pair with high isolation using multiple orthogonal modes for 5G smartphones [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(2): 1949-1954.
- [7] 林倍进, 陈新伟, 苏晋荣. 面向 5G 无线通信的紧凑型高隔离度双频 MIMO 天线[J]. 测试技术学报, 2023, 37(1): 87-92.
LIN Beijin, CHEN Xinwei, SU Jinrong. Compact and high isolation dual-band MIMO antenna for 5G wireless communication [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(1): 87-92. (in Chinese)
- [8] LIU F, GUO J, ZHAO L, et al. Dual-band metasurface-based decoupling method for two closely packed dual-band antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(1): 552-557.
- [9] CHENG Y, CHENG K M. Compact wideband decoupling and matching network design for dual-antenna array [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(5): 791-795.
- [10] 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.
- [11] YANG D, CHEN Z N, YIN J, et al. Mode conversion for broadband mutual coupling suppression of a slot-fed metasurface mosaic antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(9): 6930-6938.
- [12] ZHA L, PAN Y M, ZHENG S Y. Self-decoupled linear and planar MIMO microstrip patch antenna arrays operating in the fundamental TM_{01} mode [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(2): 1224-1233.
- [13] DENG J, LI J, ZHAO L, et al. A dual-band inverted-F MIMO antenna with enhanced isolation for WLAN applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2270-2273.
- [14] 王新延, 高振斌, 郑宏兴. 具有缺陷地结构的低耦合阵列天线设计[J]. 河北工业大学学报, 2021, 50(1): 37-43.
WANG Xinyan, GAO Zhenbin, ZHENG Hongxing. Design of low-coupling array antenna with defected ground structure [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2021, 50(1): 37-43. (in Chinese)
- [15] 段铸, BILLAH MASUM, 白茹冰. 一种应用于 5G 的高隔离度双频 MIMO 天线设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2025, 45(2): 71-76.
DUAN Zhu, BILLAH MASUM, BAI Rubing. A high isolation dual-frequency MIMO antenna for 5G applications [J]. Research & Progress of SSE, 2025, 45(2): 71-76. (in Chinese)
- [16] GAO D, CAO Z X, FU S D, et al. A novel slot-array defected ground structure for decoupling microstrip antenna array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(10): 7027-7038.