



一种小型化高隔离度UWB-MIMO天线设计

张琦 卞立安 谢舒 王琰 刘任斌

Design of a miniaturized high isolation UWB-MIMO antenna

ZHANG Qi, BIAN Li-an, XIE Shu, WANG Yan, LIU Renbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03873>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于铁氧体的宽带高增益微带天线设计

Design of ferrite-based broadband high gain microstrip antenna

中国舰船研究. 2022, 17(4): 134-138, 219 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02582>

微波超天线技术的研究与发展

Research and development of microwave meta-antenna technology

中国舰船研究. 2022, 17(5): 45-51 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02889>

宽轴比波束双频带北斗导航天线设计

Design of double band Beidou navigation antenna with wide axial ratio beam

中国舰船研究. 2024, 19(2): 245-251 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03203>

一种面向综合射频效能的舰载共形天线优化设计方法

Efficiency optimization method for ship-based integrated RF antenna

中国舰船研究. 2022, 17(4): 121-125 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02530>

角锥喇叭天线高空电磁脉冲响应统计特性分析

Statistical analysis of pyramid horn antenna response to high-altitude electromagnetic pulse

中国舰船研究. 2023, 18(4): 35-42 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02486>

基于遗传算法的余割平方波束天线优化设计

Optimization design of cosecant square beam antenna based on genetic algorithm

中国舰船研究. 2020, 15(5): 85-89 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01685>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03873>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 张琦, 卞立安, 谢舒, 等. 一种小型化高隔离度 UWB-MIMO 天线设计 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(X): 1-8.

ZHANG Q, BIAN L - A, XIE S, et al. Design of a miniaturized high isolation UWB-MIMO antenna[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(X): 1-8 (in Chinese).

一种小型化高隔离度 UWB-MIMO 天线设计



扫码阅读全文

张琦¹, 卞立安¹, 谢舒¹, 王琰¹, 刘任斌²

1 长沙理工大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙, 410114

2 华诺星空技术股份有限公司, 湖南 长沙, 410205

摘要: [目的] 针对舰载无线通信装备布局紧凑、安装空间受限, 设备间电磁干扰严重导致的天线工作效率大幅降低等问题, 提出一种具有高隔离度的小型化超宽带多输入多输出 (ultra wideband multiple-input multiple-output, UWB-MIMO) 天线。[方法] 通过对辐射贴片进行切角设计和刻蚀偏置三角形挖孔, 有效地扩展天线带宽并增加天线回波损耗。接地板刻蚀互补开口谐振环 (complementary split-ring resonator, CSRR), 利用其带阻效应增强 MIMO 天线隔离度并添加谐振频点实现超宽带。同时在地板上加载多孔寄生贴片, 有效降低天线高频处耦合度。[结果] 仿真与实测结果均表明: 该天线整体尺寸极小, 仅为 28 mm×17 mm×1.6 mm, 天线的工作带宽为 4.6~10.9 GHz, 相对带宽达到 81.3%, 频段内隔离度均高于 15 dB, 最高可达 30.7 dB。天线的包络相关系数 ECC<0.008, 全频段内增益大于 2 dBi。[结论] 设计的 MIMO 天线尺寸紧凑的同时覆盖了超宽频带, 拥有良好的全向特性, 能够广泛适用于舰载小型无线通信设备。

关键词: 超宽带; MIMO 天线; 小型化; 高隔离度

中图分类号: U665.26; TN823

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03873

Design of a miniaturized high isolation UWB-MIMO antenna

ZHANG Qi¹, BIAN Li-an¹, XIE Shu¹, WANG Yan¹, LIU Renbin²

1 School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

2 Sinostar Technology Co., Ltd., Changsha 410205, China

Abstract: [Objective] Aiming at the problems such as compact layout of shipboard wireless communication equipment, limited space, and serious electromagnetic interference between equipment, a miniaturized ultra-wideband Multiple-Input Multiple-Output (UWB-MIMO) antenna with high isolation is proposed.

[Methods] The antenna bandwidth was extended and the antenna return loss was increased effectively by cutting Angle design and etching offset triangle hole. The Complementary Split-Ring Resonator (CSRR) is used to enhance the MIMO antenna isolation and add resonant frequency points to achieve ultra-wideband. At the same time, the porous parasitic patch is loaded on the floor to effectively reduce the coupling at high frequency of the antenna.

[Results] The simulation and measured results show that the overall size of the antenna is very small, only 28 mm×17 mm×1.6 mm, the working bandwidth of the antenna is 4.6~10.9GHz, the relative bandwidth is 81.3%, and the isolation degree in the frequency band is higher than 15 dB, and the maximum is 30.7 dB. The envelope correlation coefficient of the antenna is <0.008, and the gain in the whole band is >2 dB. [Conclusion] The MIMO antenna is compact in size, covers ultra-wide band and has good omnidirectional characteristics, which can be widely used in shipborne small wireless communication equipment.

Key words: UWB; MIMO antenna; miniaturization; high isolation

收稿日期: 修回日期: 网络首发时间: 20xx-xx-xx xx:xx

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目 (21B0278)

作者简介: 张琦, 女, 1999 年生, 硕士生。研究方向: 超宽带技术, MIMO 天线设计。E-mail: 1548923621@qq.com

卞立安, 男, 1985 年生, 博士, 硕士生导师。研究方向: 天线理论与技术。E-mail: dk061bianlian@126.com

*通信作者: 卞立安

0 引言

对于舰载通信设备而言,实现远距离信号的高速传输是核心需求。随着近现代通信技术的高速发展,舰载通信设备的集成度不断提升,海上通信资源日渐紧张,信号的多径衰落已成为突出问题。MIMO天线的出现大幅提升了天线的信道容量,其凭借优秀的抗干扰能力以及高信息传输速率被广泛应用。舰船通信系统集成度日益提升,这就要求天线在设计时要充分考虑到有限空间的可用性^[1-3]。而缩小天线尺寸,将天线紧密排布必然会导致互耦效应的增强,对天线的性能造成不利影响。所以高隔离度就成了多天线设计中注重的主要指标^[4]。

近年来,广泛用于MIMO天线单元之间去耦的技术主要有加载中和线、设置缺陷地结构、采用解耦网络、电磁带隙解耦及添加地板枝节等方法^[5-8]。Kan等^[9]在天线中加入互补谐振环结构来降低耦合度,尺寸为 $29\text{ mm}\times 23\text{ mm}$,最终实现频段内隔离度达到 15 dB 。Hao等^[10]通过折叠式互补谐振环原理降低耦合度^[11],使得天线隔离度达到 15 dB ,最终设计尺寸为 $36\text{ mm}\times 56.6\text{ mm}$ 。Chandel等^[12]通过缺陷地结构,在地板刻蚀L形缝隙来减少隔离,最终隔离度达到 22 dB 。Kumar等^[13]通过加载T形地板枝节来改善隔离,最终隔离度达到 18 dB 。由此可见,在兼顾低隔离特点的前提下将天线尽量小型化,仍旧是目前MIMO天线研究的重点。

本文设计了一款具有高隔离度、超宽带、小尺寸等多种优点的MIMO天线。两天线单元通过微带线馈电,天线正面主要通过贴片切角、刻蚀非对称三角挖孔等方式优化微带线馈电结构,有效增强谐振并拓宽带宽。天线背面通过加载互补开口谐振环结构和多孔寄生贴片作为地板枝节来增强隔离度并进一步增加带宽。最终天线的有效工作带宽为 $4.6\sim 10.9\text{ GHz}$,隔离度高于 15 dB ,且尺寸仅为 $28\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ 。

1 天线设计

1.1 天线模型

所设计的MIMO天线结构如图1所示。天线印制在介电常数为4.4的FR4介质基板上,基板介质的损耗角正切值为0.025,天线尺寸为 $28\text{ mm}\times 17\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$ 。该天线的正面印制经由双端口馈电的两个天线单元,辐射贴片由边长为

4.24 mm 的正六边形和对应斜边长的等腰三角形组合而成,同时在近微带线位置挖去非对称的三角形结构。天线背面由开槽的接地板组成,并在接地板正中心位置处加载一个多孔寄生贴片作为地板枝节。天线优化后的尺寸参数如表1所示。

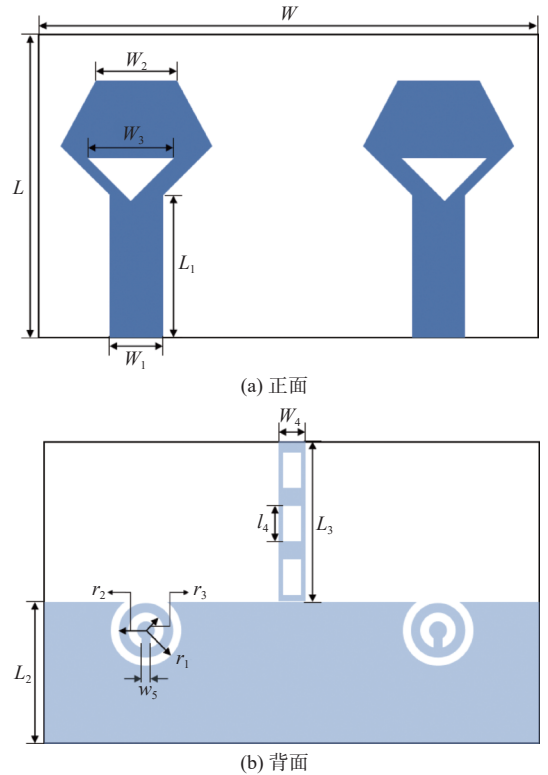


图1 天线结构示意图

Fig. 1 Antenna structure diagrams

表1 MIMO天线尺寸

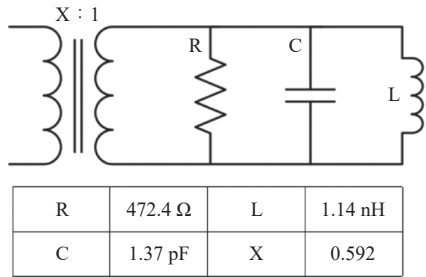
Table 1 Dimensions of the MIMO antenna

参数	数值/mm	参数	数值/mm
L	17	W	28
L_1	8	W_1	3.05
L_2	8	W_2	4.24
L_3	9	W_3	4.95
l_4	2	W_4	1.5
r_1	2	w_5	0.5
r_2	1.5	r_3	1

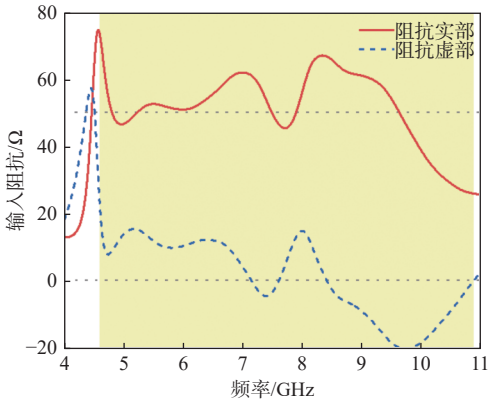
1.2 天线等效电路

天线的电气模型有助于从等效的角度对天线进行性能分析。天线作为一种谐振器,可以等效建模为并联的RLC电路。在Keysight Advance Design System(ADS)中对MIMO天线进行等效电路建模,天线的电路模型及各元件的值如图2(a)所示。其中R是天线的辐射电阻,L和C共同表述了期望谐振频率的谐振电路,传输线可等效为

耦合比为 $X:1$ 的阻抗变压器。通过全波仿真分析可以得到该等效电路模型的输入阻抗结果,与 MIMO 天线输入阻抗的实际仿真结果完全匹配,如图 2(b)所示。



(a) 天线等效电路模型



(b) 输入阻抗曲线图

图 2 天线的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of antenna

由天线的输入阻抗结果可以得到, MIMO 天线在 7.52 GHz 谐振点位置的阻抗匹配为 50Ω , 并且在所有有效工作频段内, 天线输入阻抗的阻值都位于 50Ω 附近, 同时输入阻抗的电抗分量均在 0 附近。这说明该天线对于各类广泛使用的输入端口都有着较强的配适性。

1.3 天线结构演进

贴片天线的演进形式如图 3 所示。经过计算确定矩形贴片天线 1 的尺寸。天线 2 在矩形贴片靠近馈电微带线处进行切角, 同时将贴片上半部分切角为正六边形。切角设计可以增加贴片与地板间的距离, 提高阻抗的连续性, 从而降低天线的回波损耗。天线 3 将得到的辐射贴片对称放置, 并在背面加入等馈线高度地板, 初步形成 MIMO 天线。天线 4 在辐射贴片与馈电微带线连接处挖去两个非对称的三角形结构, 该偏置挖孔进一步优化了馈电结构, 能够增强谐振并扩大带宽。

天线地板的演进形式如图 4 所示, 天线 4 此时只具有简单的地板结构, 两天线间会产生较强的互耦干扰。天线 5 在每个天线单元微带馈线对应的地板处刻蚀两个半径不等、缝隙不等、开口方

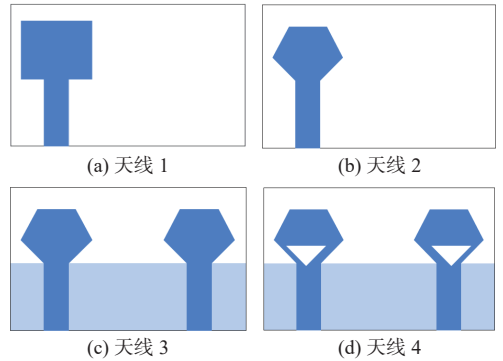


图 3 贴片天线演进形式

Fig. 3 Evolution process of patch antenna

向相反的圆环, 形成一个 CSRR 谐振器, 有效增强天线隔离, 并进一步拓展工作带宽。天线 6 在两个辐射贴片之间的地板中心处添加矩形地板枝节, 但提高隔离度的效果有限, 天线 7 在该地板枝节上刻蚀三个均匀的矩形孔, 形成一个多孔寄生贴片, 此时两天线间的隔离度得到显著提升。

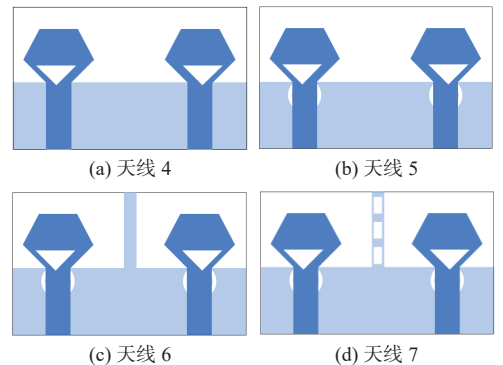


图 4 天线地板演进形式

Fig. 4 Evolution process of antenna floor

1.4 天线 S 参数分析

天线结构演进过程中 S 参数的变化如图 5 所示。由图 5(a) 可得, 天线 3 的辐射贴片经切角处理后, S_{11} 呈现凹陷趋势, 但参数并不理想。这主要是由于两天线单元间存在较强的互耦效应, 耦合电流干扰了电流分布。天线 4 在贴片的微带馈线端刻蚀偏置三角形挖孔, 形成类扳手型馈电结构。该结构可以降低谐振频率处的回波损耗, 此时 S_{11} 在 5 GHz 处形成较明显谐振下陷。天线 5 在地板上加入两个对称的类互补开口谐振环结构, 产生一个在 7.5 GHz 附近谐振的新频带, 从而大幅拓展天线带宽, 同时显著增强天线隔离。由图 5(b) 可得, 天线 5 隔离度大幅提升, 但在高频处仍存在失配现象。天线 7 加载多孔寄生贴片, 该结构能够改变电流路径并抵消产生的耦合电流, 从而有效提高天线隔离度。此时天线 7 在工作频段内 S_{21} 均小于 -15 dB 。 S_{11} 也达到了 $4.6 \sim 10.9$

GHz的超宽频带。

为进一步优化提出的多孔寄生贴片结构, 对其宽度 W_4 进行了参数化分析。图6给出了天线回波损耗随 W_4 的变化曲线, 可以看到, 随着 W_4 的逐渐增大, 天线回波损耗呈下沉趋势, 但在 W_4 达到 1.5 mm 后, S_{11} 开始劣化发展。当 $W_4=1.5$ mm 时, 天线获得最佳辐射性能。

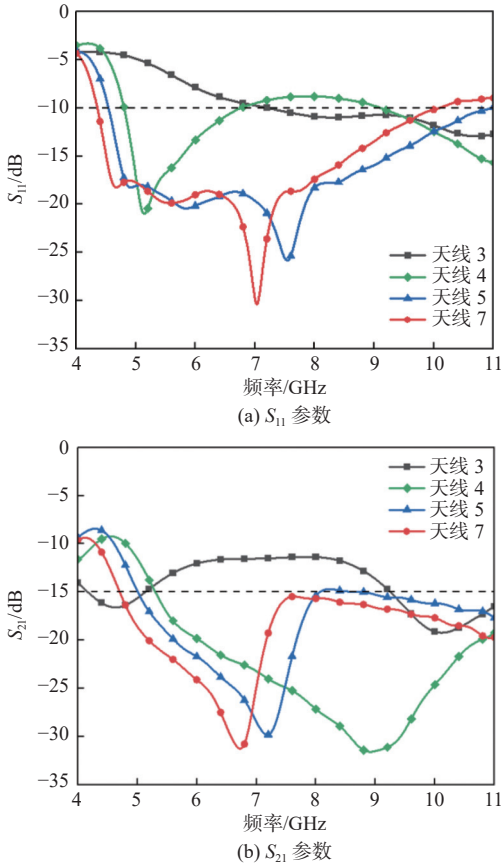


图5 改进过程中 S 参数变化图

Fig. 5 diagrams of S -parameter in improvement

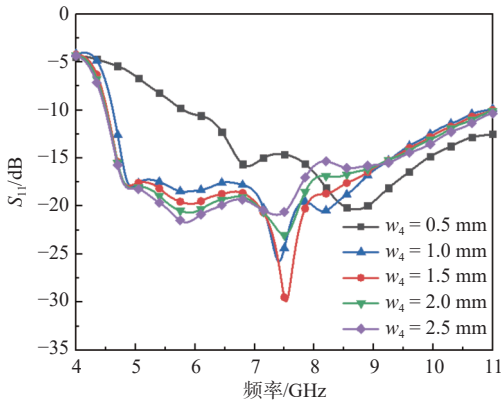


图6 回波损耗变化曲线

Fig. 6 Return loss change curve

2 解耦机理分析

在 MIMO 天线的设计过程中, 一个端口输出的信号会通过电磁感应耦合到另一端口的辐射贴

片上, 形成与输出信号方向相反的电流, 从而阻碍天线的信号传输。如何有效减弱天线之间的互耦效应一直是 MIMO 天线研究的重点。

2.1 互补开口谐振环解耦分析

互补开口谐振环是由两个朝向相反的开口谐振环 (split-ring resonator, SRR) 嵌套而成的, 可以在微波电路中充当一种滤波结构。CSRR 通过对 SRR 反向开口等方式延长电流路径, 从而进一步提高带阻效应, 增强谐振吸收峰。改变开口大小和金属环缝隙宽度以调整开口电容和金属环等效电感的值, 进而能够使谐振吸收峰产生在需要的微波频段。

加载 CSRR 后的天线电流分布如图7所示, 可以看到电流主要集中在谐振环上, 互耦电流被有效吸收, 耦合到右边天线单元的电流明显减少, 有效提高天线之间的隔离度。

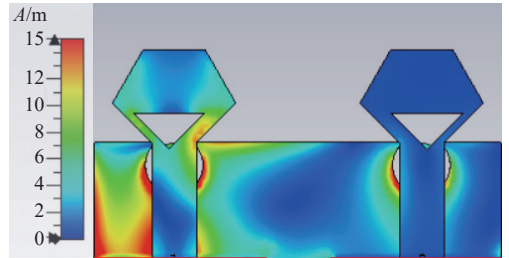


图7 加载 CSRR 的电流分布图

Fig. 7 Current distribution after loading CSRR

2.2 多孔寄生贴片解耦分析

寄生单元位于两天线中央, 当天线被激励时, 会分别在寄生单元上产生大小相同、方向相反的耦合电流, 两种电流互相抵消, 从而达到去耦的目的。刻蚀开孔能够增加互耦电流的流经距离, 进一步提高天线隔离度。图8为天线工作在 7.54 GHz 时, 加载两种地板枝节的电流分布对比图, 可以看到在加载多孔寄生贴片后, 天线右部分几乎没有耦合电流分布, 有效抑制了耦合效应对天线产生的影响。

图9给出了该天线在4种不同的频率下的电流分布, 以观察其隔离度。分别在 4.87, 5.90, 7.54 和 9.00 GHz 处对左端口进行激励, 可以观察到 CSRR 结构与多开口槽地板枝节有效地吸收了互耦电流, 天线的端口隔离度在各个频段都有着优秀的表现。

3 实测与仿真结果分析

3.1 S 参数

天线的实物图如图10所示, 在微波暗室内通

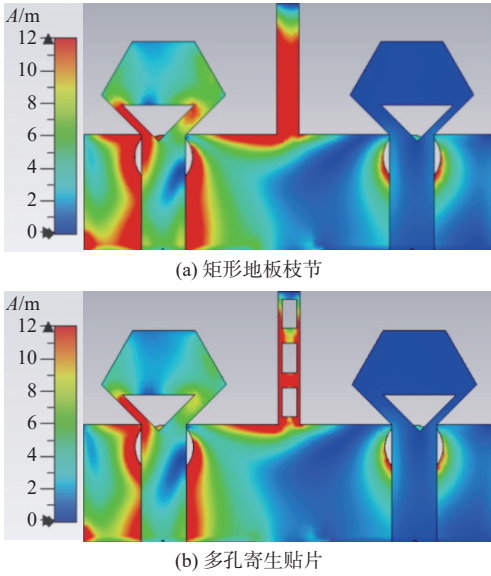


图 8 不同地板枝节电流分布对比图

Fig. 8 Current distribution with different floor branches

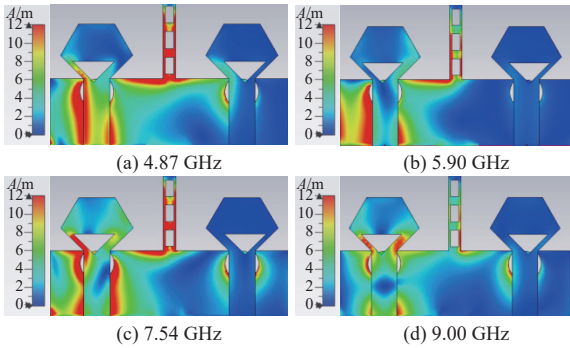


图 9 不同频率下天线表面电流分布

Fig. 9 Surface current distributions at different frequencies

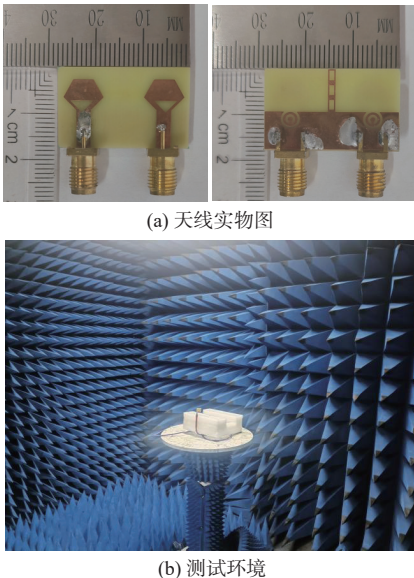


图 10 MIMO 天线实物图

Fig. 10 MIMO antenna physical image

过矢量网络分析仪对天线进行测试, 天线 S_{11} 与 S_{21} 参数的仿真和实测结果如图 11 所示。实际测试的天线阻抗带宽为 4.6~10.9 GHz, 实测结果与仿真结果基本吻合。

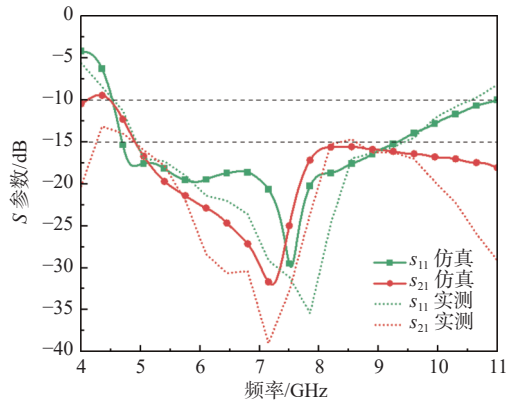


图 11 S 参数仿真与实测结果

Fig. 11 The simulation and measurement results of S-parameters

3.2 辐射性能

图 12 为 MIMO 天线在 4.87 GHz、5.90 GHz 和 7.54 GHz 处, E 面与 H 面远场辐射方向图的仿真结果与实测结果。由图中可以看出, 天线在中低频段的表现都十分良好, E 面与 H 面都接近圆形。在高频处时, 由于 FR4 材料随着频率的升高, 其介电常数会出现非线性的降低, 从而影响天线的辐射效率, 可以看到在 7.54 GHz 处天线的 H 面辐射方向图出现了一定程度的畸变, 然而依然接近圆形。说明该 MIMO 天线是一款辐射性能良好的全向天线。

图 13 为天线的峰值增益与辐射效率曲线, 天线的峰值增益在几乎整个工作频带内都大于 2 dBi, 并且最高可达 3.34 dBi。同时, 该天线在全部超宽带频段内都具有着大于 63% 的辐射效率, 最高可达到 86%, 拥有着良好的天线增益。

3.3 包络相关系数 (ECC)

ECC 是衡量天线分集程度的重要参数, 在理想环境下 ECC 的值应为 0, 但实际上受外界干扰和出于加工精度等因素无法达到零值, 一般规定 MIMO 天线的 ECC 值需小于 0.5。ECC 和分集增益 (DG) 由式 (1) 和式 (2) 给出:

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

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

MIMO 天线的 ECC 和 DG 如图 14 所示, 在超宽带频段内该天线 ECC 均小于 0.008, 远远小于 0.5。DG 在工作频段内均大于 9.99, 展现了良好的分集性能。

3.4 性能对比

表 2 为本文设计天线与其他功能相似的文献

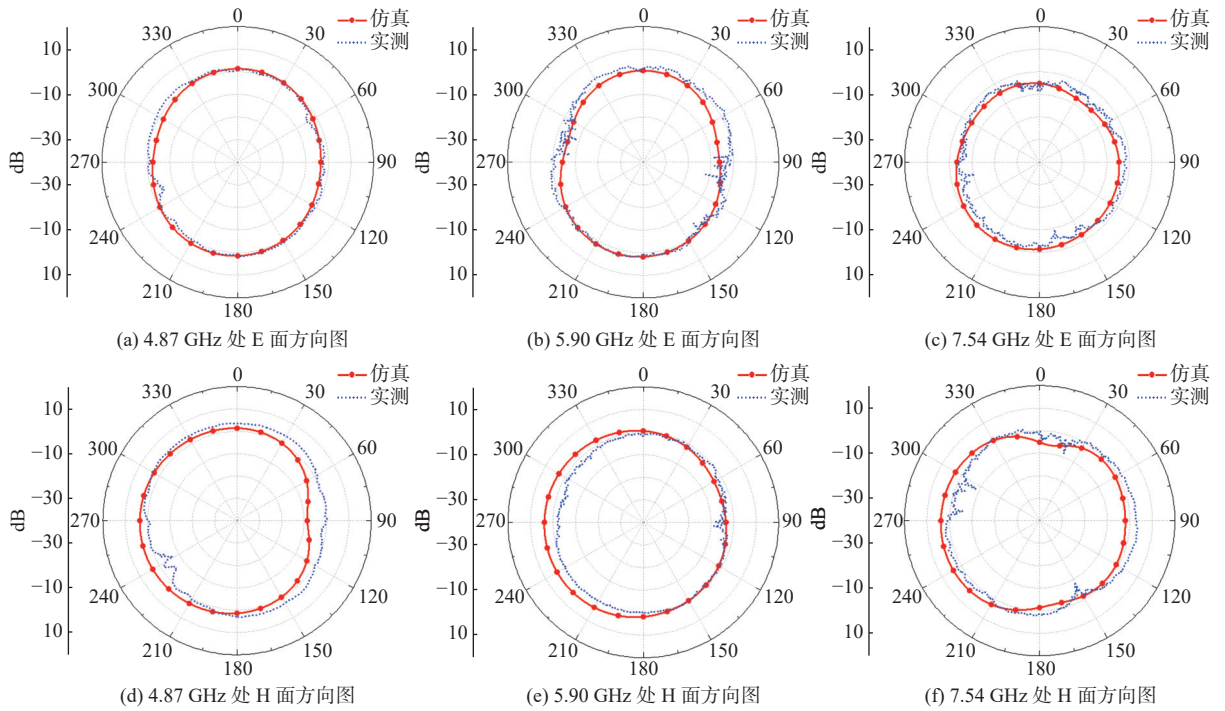


图 12 天线辐射方向图

Fig. 12 Antenna radiation patterns

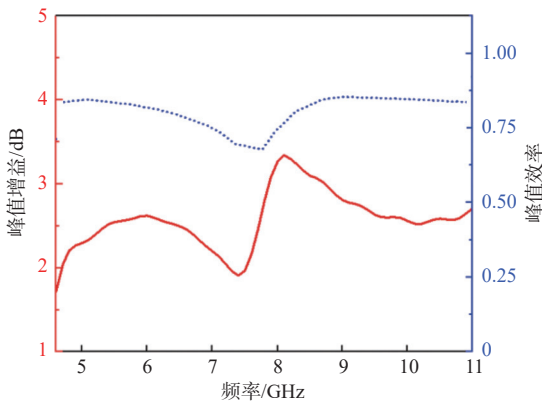


图 13 峰值增益与辐射效率

Fig. 13 Peak gain and radiation efficiency

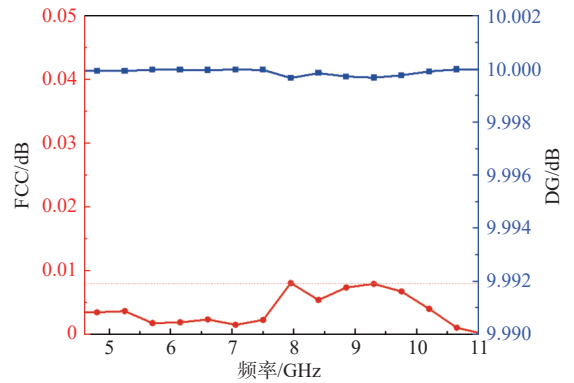


图 14 UWB-MIMO 天线的 ECC 和 DG

Fig. 14 Envelope correlation coefficient and diversity gain of the UWB-MIMO antenna

表 2 文献性能对比

Table 2 Comparison of antenna performance

文献	去耦方法	尺寸/mm	工作带宽/GHz	隔离度/dB	增益/dBi	ECC/dB
[9]	CSRR	29×23	3.0~12.0	15	0~4.7	<0.15
[10]	Meta-FCRR	34×56.6	2.0~10.0	15	—	<0.4
[13]	地板枝节	30×19	3.1~10.6	18	1.2~2.9	<0.13
[14]	寄生单元	90×10	2.4~7.1	22	—	—
[15]	DGS	22×18	2.75~10.64	20	—	<0.015
[16]	EBG	41×25	3.1~12.0	20	0~6i	<0.006
[17]	地板枝节	28×22	3.2~9.5	15	2.5~5i	—
[18]	地板枝节	35×20.6	2~18	15	0~5.2i	<0.2
本文	CSRR寄生贴片	28×17	4.6~10.9	15	2~3.4i	<0.008

的对比。从表中可以看出,本文设计天线尺寸均小于文献 [9-18]。在相同的性能条件下,该天线

拥有着更小而紧凑的尺寸。在隔离度方面,本文设计天线略低于文献 [13~16],但依旧达到大多

数文献的 15 dB 要求。并且相较于文献 [13~16], 本文在尺寸、增益与 ECC 方面都各有优点。在相似的尺寸下, 本文设计天线也在带宽、隔离度与 ECC 参数上有较大优势, 具有更高的性能。

4 结 论

本文设计了一种具有高隔离度的小型化 UWB-MIMO 天线, 总尺寸仅为 28 mm×17 mm×1.6 mm, 通过对辐射贴片切角处理、刻蚀偏置三角形挖孔来实现超宽带的匹配, 最终的天线的工作带宽为 4.6~10.9 GHz。在地板上引入多孔寄生贴片, 同时刻蚀互补开口环结构以增强隔离, 使天线隔离度达到 15 dB 以上。该天线同时还拥有低 ECC、高增益等优点, 能够广泛应用于舰载通信设备, 以及小型无线设备和便携式电子仪器等。

参考文献:

- [1] 高明明, 王纪禹, 南敬昌, 等. 一种紧凑型三陷波 UWB-MIMO 天线的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 144–151.
GAO M M, WANG J Y, NAN J C, et al. Design of a compact triple-notch UWB-MIMO antenna[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 144–151 (in Chinese).
- [2] TANG Z J, WU X F, ZHAN J, et al. Compact UWB-MIMO antenna with high isolation and triple band-notched characteristics[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 19856–19865.
- [3] WANI Z, KUMAR D. Dual-band-notched antenna for UWB MIMO applications[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2017, 9(2): 381–386.
- [4] 高明明, 宋杨, 南敬昌, 等. 一种小型化的高隔离度 UWB-MIMO 天线 [J]. *电波科学学报*, 2022, 37(3): 484–490.
GAO M M, SONG Y, NAN J C, et al. A miniaturized high isolation UWB-MIMO antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, 37(3): 484–490 (in Chinese).
- [5] KIM S, KIM D K, KIM Y, et al. A 24 GHz ISM-band Doppler radar antenna with high isolation characteristic for moving target sensing applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1532–1536.
- [6] KHAN S M, IFTIKHAR A, ASIF S M, et al. A compact four elements UWB MIMO antenna with on-demand WLAN rejection[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(2): 270–276.
- [7] PATCHALA K, RAO Y R, PRASAD A M. Triple band notch compact MIMO antenna with defected ground structure and split ring resonator for wideband applications[J]. *Heliyon*, 2020, 6(1): e03078.
- [8] ZHANG X X, REN A D, LIU Y. Decoupling methods of MIMO antenna arrays for 5G applications: a review[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, 21(1): 62–71.
- [9] KHAN M S, CAPOBIANCO A D, ASIF S M, et al. A compact CSRR-enabled UWB diversity antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 808–812.
- [10] HAO C H, ZHENG H M, GU Y Q, et al. Mutual coupling reduction of MIMO antenna array using meta-FCRR[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 119(4): 3435–3445.
- [11] 南敬昌, 韩欣欣, 高明明, 等. 一种 K 波段小型化 MIMO 天线设计 [J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(10): 1085–1092.
NAN J C, HAN X X, GAO M M, et al. Design of a K-band miniaturized MIMO antenna[J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(10): 1085–1092 (in Chinese).
- [12] CHANDEL R, GAUTAM A K, RAMBABU K. Tapered fed compact UWB MIMO-diversity antenna with dual band-notched characteristics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(4): 1677–1684.
- [13] KUMAR A, ANSARI A Q, KANAUIA B K, et al. An ultra-compact two-port UWB-MIMO antenna with dual band-notched characteristics[J]. *AEU -International Journal of Electronics and Communications*, 2020, 114: 152997.
- [14] 王再跃, 汪建安, 安凯, 等. 一种基于寄生单元结构的高隔离度 MIMO 天线 [J]. *电子制作*, 2023, 31(2): 75–77, 119.
WANG Z Y, WANG J A, AN K, et al. A high isolation MIMO antenna based on parasitic element structure[J]. *Practical Electronics*, 2023, 31(2): 75–77, 119 (in Chinese).
- [15] 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 J C, HAN X X, GAO M M, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antenna based on DGS[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(5): 89–95 (in Chinese).
- [16] 高明明, 宋杨, 南敬昌, 等. 紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(1): 149–156.
GAO M M, SONG Y, NAN J C, et al. Research on compact ultra-wideband MIMO antenna[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(1): 149–156 (in Chinese).
- [17] 杨阔, 刘川. 一种小型化超宽带 MIMO 天线的设计 [J]. *无线电工程*, 2020, 50(9): 775–779.

- YANG K, LIU C. Design of a miniaturized ultra-wide-band MIMO antenna[J]. [Radio Engineering](#), 2020, 50(9): 775–779 (in Chinese).
- [18] 刘力, 张汐, 朱佳乐, 等. 小型化超宽带陷波 MIMO 天线设计 [J]. [微波学报](#), 2021, 37(S1): 52–55.
- LIU L, ZHANG X, ZHU J L, et al. Design of miniaturized UWB notch MIMO antenna[J]. [Journal of Microwave](#), 2021, 37(S1): 52–55 (in Chinese).
- [19] NADEEM I, CHOI D Y. Study on mutual coupling reduction technique for MIMO Antennas[J]. [IEEE Access](#), 2019, 7: 563–586.