



基于复合去耦结构的小型化UWBMIMO天线设计

刘文进 潘佳欣 南敬昌 贾雨婷

Design of miniaturized UWB-MIMO antennas based on composite decoupling structures

Liu Wenjin, Pan Jiaxin, Nan Jingchang, Jia Yuting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04479>

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>

寄生单元加载的高增益可重构对称扇形贴片天线

High gain reconfigurable symmetrical sector patch antenna loaded with parasitic elements

中国舰船研究. 2025, 20(2): 350-356 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03530>

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>

高空核爆电磁脉冲入射情形下航空母舰上鞭状天线耦合特性分析

Analysis of coupling characteristics of whip antenna on aircraft carrier under incident electromagnetic pulse of high-altitude nuclear electromagnetic pulse

中国舰船研究. 2023, 18(4): 20-27 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03121>

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>

一种频率可重构的多模式微带准八木天线

Frequency reconfigurable multi-mode microstrip quasi-Yagi antenna

中国舰船研究. 2022, 17(4): 126-133 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02789>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 刘文进, 潘佳欣, 南敬昌, 等. 基于复合去耦结构的小型化 UWB-MIMO 天线设计 [J]. 中国舰船研究. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04479.

Liu W J, Pan J X, Nan J C, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antennas based on composite decoupling structures[J]. Chinese Journal of Ship Research (in Chinese). DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04479.

基于复合去耦结构的小型化 UWB-MIMO 天线设计



扫码阅读全文

刘文进^{1,2}, 潘佳欣^{*1,2}, 南敬昌^{1,2}, 贾雨婷^{1,2}

1 辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105

2 辽宁省无线射频大数据智能应用重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105

摘要: [目的] 基于舰船通信装置安装空间受限、其他装备干扰信号导致船舰通信效率低的问题, 提出一种小型化低耦合 UWB-MIMO 天线。[方法] 天线正面采用矩形和半圆形的组合形状, 对其进行切角处理; 天线背面引入一种复合去耦结构, 即多孔寄生贴片和缺陷地结构进行协同去耦, 整体尺寸为 30 mm×24 mm×1.6 mm。通过在辐射贴片上刻蚀倒 U 形缝隙实现卫星 C 波段上行频段 (5.925~6.425 GHz) 的陷波。[结果] 仿真与测试结果表明, 该天线工作频段为 2.95~20 GHz, 隔离度大于 19 dB, 最高可达 40dB, 包络相关系数 (ECC) 小于 0.005。[结论] 提出的 MIMO 天线实现了小型化、宽频带和低耦合的特点, 仿真与实测结果良好, 可以广泛应用于舰载无线通信设备中。

关键词: 天线; 超宽带; 多输入多输出 (MIMO); 小型化; 低耦合; 多孔寄生贴片; 缺陷地结构

中图分类号: U665.22; U665.26; TN929.5; TN822.4

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04479

0 引言

如今的海战中, 实现远距离目标探测和进行海上通信同等重要。随着舰船无线通信系统的快速发展, 海上通信环境变得复杂、拥挤。如何在有限空间内实现高效、可靠的通信成为急需解决的问题。多输入多输出 (MIMO) 技术凭借其在提高频谱利用率和通信质量方面的优势, 逐渐成为舰船通信系统的核心组成部分^[1-3]。但由于舰船通信装置安装空间受限, 导致天线在设计时要充分考虑尺寸问题^[4-5]。但是将天线紧密排布又会导致耦合效应的增强, 从而影响舰船通信的质量。因此, 设计一款兼具小型化、宽频带和低耦合特性的超宽带-多输入多输出 (UWB-MIMO) 天线, 对于提升舰船通信系统的抗干扰能力与稳定性具有重要意义^[6-7]。

常见的 MIMO 天线实现低耦合的方法有开槽、加载寄生枝节、自互补单元、添加中和线, 以及缺陷地结构 (defected ground structure, DGS) 等^[8-10]。Ren 等^[11] 通过加载 T 形短段和矩形槽结

构, 实现天线在 2.9~12 GHz 的工作带宽, 隔离度优于 -15 dB, 天线尺寸为 32 mm×32 mm×0.8 mm; 张琦等^[12] 通过加载开口谐振环和多孔寄生贴片, 在 4.6~10.9 GHz 频段内达成优于 -15 dB 的隔离性能, 且尺寸为 28 mm×17 mm×1.6 mm; Liu 等^[13] 在不添加任何去耦结构的情况下, 采用近似自互补单极子天线单元以及非对称结构, 获得了 2.19~11.07 GHz 的工作频率, 隔离度优于 -20 dB, 其尺寸为 60 mm×41 mm×1 mm; Li 等^[14] 通过在地板上加载 DGS, 使其隔离度优于 -18 dB, 天线工作在 2~14 GHz, 尺寸为 30 mm×20 mm×1.6 mm。由此可见, 这些方法多数在带宽、尺寸或隔离度等方面存在权衡, 不易兼顾小型化、宽频带和低耦合等多重性能指标。同时, 前人研究中较少将多孔寄生贴片与 DGS 结构进行协同去耦, 以实现结构小型化并具有低耦合特性。除此之外, 天线设计还需充分考虑材料的工程可实现性。FR4 作为目前印制电路板中广泛应用的基材, 具有价格低廉、机械性能稳定、加工工艺成熟等优势, 可适用于舰船通信。其厚度 1.6 mm 作为中等厚度, 可以

收稿日期: 2025-04-23 修回日期: 2025-05-18

作者简介: 刘文进, 女, 1970 年生, 副教授。研究方向: 信号处理等。E-mail: lntuliuwenjin@163.com

潘佳欣, 女, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 通信电路与系统等。E-mail: pjx1020@163.com

*通信作者: 潘佳欣

帮助天线实现良好的性能。

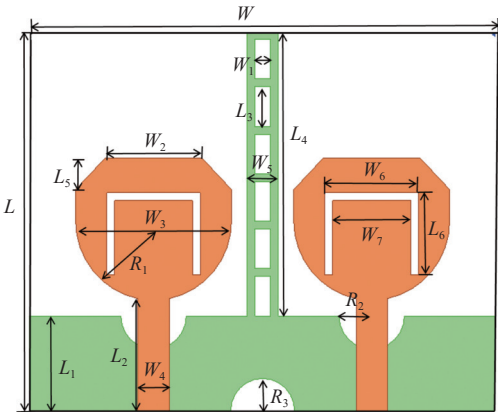
因此,本文拟提出一种基于复合结构去耦的小型化 UWB-MIMO 天线,通过在天线接地板融合引入多孔寄生贴片与 DGS,形成一种复合去耦结构,以有效抑制单元间耦合,提升隔离度。天线辐射贴片采用矩形与半圆组合结构,并通过切角处理实现宽频带覆盖。同时,在辐射贴片上刻蚀倒 U 形缝隙,实现对卫星 C 波段上行频段 (5.925~6.425 GHz) 的陷波,进一步提升抗干扰性能。实测结果表明,该天线在 2.95~20 GHz 范围内工作稳定,隔离度大于 19 dB,包络相关系数 (ECC) 小于 0.005,具备显著的小型化、超宽带、低耦合和高可靠性优势,具有广泛的舰船通信应用前景。

1 天线设计

本文设计的天线结构如图 1 所示。尺寸大小为 30 mm×24 mm,采用厚度为 1.6 mm 的 FR4 材料作为介质基板。整体天线由介质基板、半圆和矩形组合的辐射贴片、带有多孔寄生贴片和缺陷地结构的接地板组成。通过在辐射贴片上蚀刻倒 U 形缝隙,天线可在 5.71~6.56 GHz 的频率范围内产生陷波。天线各部分的详细尺寸如表 1 所示。

1.1 天线的宽频设计

图 2 为天线单元设计的演进过程。天线 1 由矩形辐射贴片和微带馈线组成,但其阻抗匹配失衡,由此考虑可以应用半圆形和矩形贴片的组合,得到天线 2。与矩形贴片相比,半圆形角度变化更平滑,其当电流通过半圆形辐射贴片时,产生的反射相对较小,反射系数得到提高。然而,天线 2 的 S 参数在 7.5 GHz 附近大于 -10 dB,最后对天线 2 进行切角处理,得到天线 3。切角处理在物



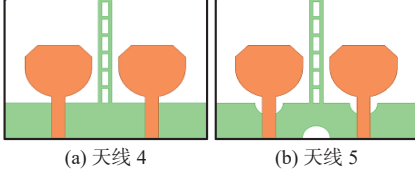


图 4 天线接地板演变形式

Fig. 4 Evolution of antenna ground plane

天线 4 加载了多孔寄生贴片, 其位于两天线单元中间。当天线被激励时, 寄生贴片会产生反向的辐射场, 其相位与原始耦合电场正好相反, 通过叠加可以抵消其耦合。而多孔寄生贴片则增加了其互耦电流的流经路径, 可以有效地提高天线的隔离度。图 5 为天线工作在 9 GHz 时, 有无多孔寄生贴片时的电流分布对比图。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, 多孔寄生贴片有效抑制了耦合效应对天线产生的影响。

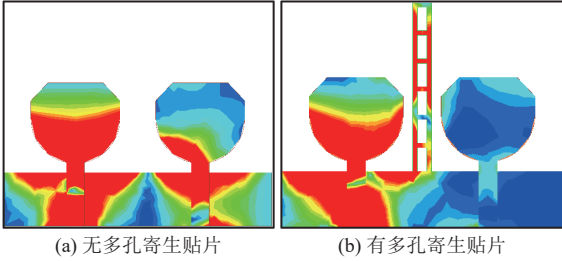


图 5 有无多孔寄生贴片时的电流分布图

Fig. 5 Current distributions with/without porous parasitic patches

但天线单元在高频部分仍然存在耦合, 因此天线 5 在矩形接地板上刻蚀 3 个半圆形凹槽, 从而引入了 DGS。DGS 技术的特点是会在地面形成并联的 LC 谐振电路, 使其在谐振频率及其谐振附近产生高阻抗区, 从而阻断地面上的表面波传播, 抑制高频耦合路径的形成。其 DGS 等效电路如图 6 所示, $50\ \Omega$ 微带馈线可以视为等效电感, 所刻蚀的凹槽可以视为等效电容^[15-16]。其谐振频率、等效电容和等效电感可以用式(1)~式(3)进行计算。 Z_0 表示传输线的特性阻抗; f_0 表示谐振频率; ω_c 表示截止角频率; ω_0 是谐振角频率。

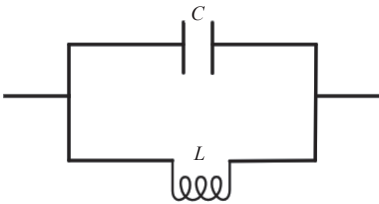


图 6 DGS 等效电路图

Fig. 6 DGS equivalent circuit diagram

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$C = \frac{\omega_c}{2Z_0(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (3)$$

不同接地板结构的 S_{21} 变化如图 7 所示。在高频部分 DGS 结构的去耦效果比多孔寄生贴片的去耦效果更加理想。原因是在高频部分, 主流的耦合是表面波耦合。多孔寄生贴片侧重于辐射场的耦合, 对表面波耦合抑制作用弱, 同时其寄生贴片的尺寸通常为 $\frac{1}{4}\lambda$ 或 $\frac{1}{2}\lambda$ 的寄生元件, 随着频率的升高, 寄生贴片的尺寸与波长不再匹配, 感应电流减弱, 导致其去耦效果呈劣势状态。而 DGS 的谐振频率由开口尺寸、位置和形状决定, 可设计在高频部分, 阻断其耦合, 提高隔离度。

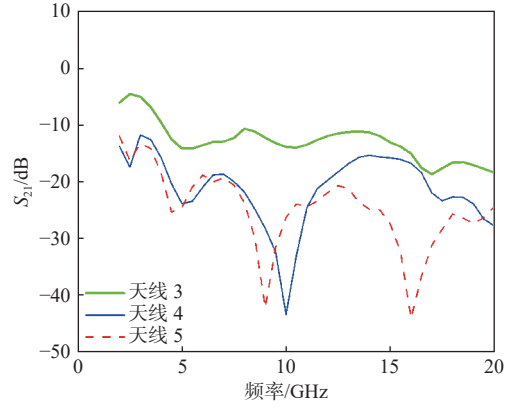

 图 7 不同接地板结构对 S_{21} 的影响

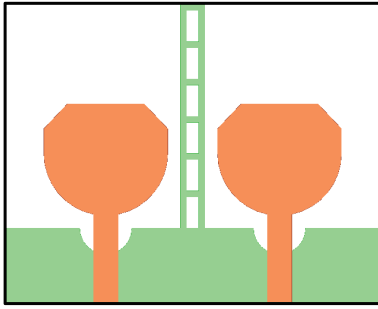
 Fig. 7 Effect of different ground plane configurations on S_{21}

1.3 天线的参数影响分析

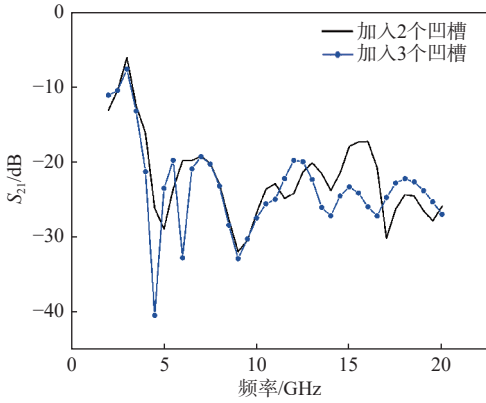
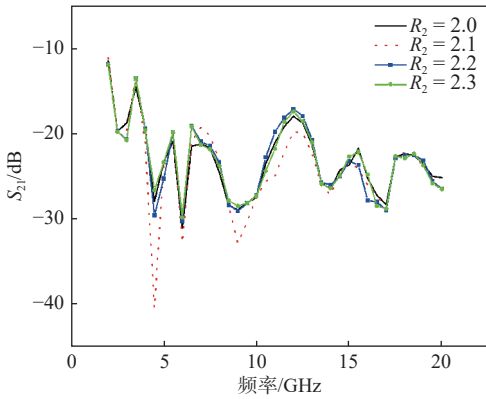
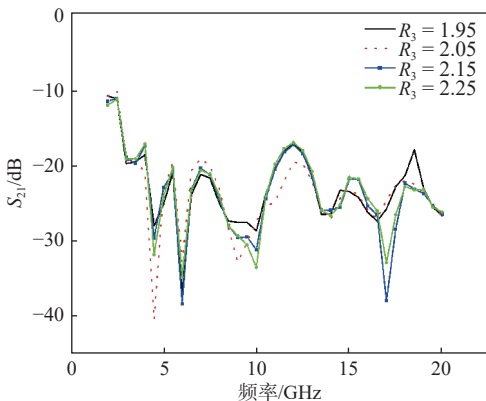
为进一步优化提出的缺陷地结构, 对其缺陷地结构的数量以及凹槽半径 R_2 和 R_3 进行参数化分析。

图 8 对比了加载不同数量凹槽时的 S_{21} 曲线。当接地板只有 2 个凹槽时, 在高频部分的隔离度呈下降趋势, 原因是凹槽数量减少, 等效谐振模式数减少, 无法全面覆盖高频耦合区域; 高频时, 电流集中于地板边缘, DGS 区域未能有效切断其传播路径, 导致带阻能力不足, 从而使高频耦合增强, 隔离度下降。

图 9 给出了天线隔离度 S_{21} 随 R_2 和 R_3 的变化曲线。可以看出, $R_2=2.1\text{ mm}$ 时, 天线在工作频段范围内 S_{21} 的谷值深度最优, 可达 -40 dB 。当 R_2 继续增大时, 电流路径变长, 等效电感增加, 从而导致谐振频率 f_0 向左偏移, 谷值深度明显变小, 隔离度下降。当 $R_3=2.05\text{ mm}$ 时, 天线在 $3\sim 16\text{ GHz}$ 主要频段范围内表现出最佳的隔离效果, 此时的等



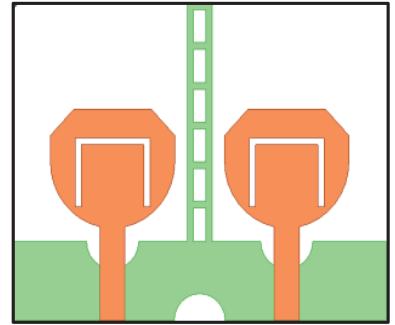
(a) 两个凹槽结构图

(b) 不同凹槽数量 S_{21} 对比图图8 结构图以及不同凹槽数量的 S_{21} 对比图Fig. 8 Structure diagram and comparison of S_{21} with different groove numbers(a) R_2 不同取值对应的 S_{21} (b) R_3 不同取值对应的 S_{21} 图9 R_2 和 R_3 变化对应的 S_{21} 曲线Fig. 9 S_{21} curves versus R_2 and R_3 variations

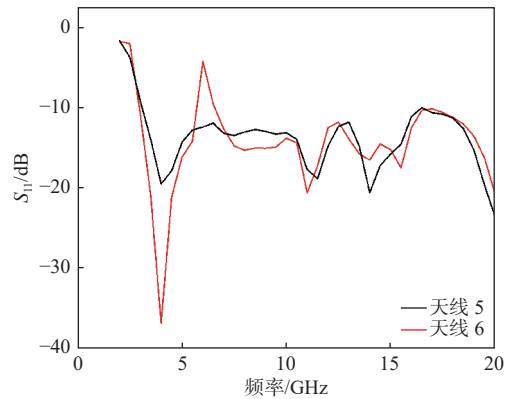
效谐振频率 f_0 与天线耦合频段高度重合,使其谷值深度明显优于其他尺寸。

1.4 天线的陷波结构设计

在现代通信系统中,为保障通信质量,需要尽可能地抑制其干扰信号的影响,因此可以通过改变天线辐射贴片的结构或者调整其结构位置,以达到天线在相应陷波频段内无法辐射和接收干扰信号。本设计在辐射贴片上刻蚀倒U形缝隙,如图10(a)所示,通过及时调整结构的位置和长度来实现陷波特性和。由图10(b)可知,加入倒U形缝隙后,天线在5.71~6.56 GHz频段产生陷波,有效抑制了卫星C波段上行频段(5.925~6.425 GHz)的干扰。



(a) 天线6

(b) 不同陷波结构所对应的 S_{11} 图10 天线6的结构图以及不同陷波结构所对应的 S_{11} Fig. 10 Structure diagram of Antenna 6 and the corresponding S_{11} for different notch structures

为更直观地解释天线陷波频段的原理,并且验证所设计的倒U形缝隙对陷波频段的影响,本文采用HFSS仿真软件对天线表面的电流分布进行分析。如图11所示,在6.125 GHz时,天线表面的电流主要集中分布在倒U形缝隙附近,右侧天线单元上并没有明显的电流分布。这一现象足以证明倒U形缝隙结构成功地降低了天线在该频率范围内的辐射和接收效率,达到所期望的陷波效果。

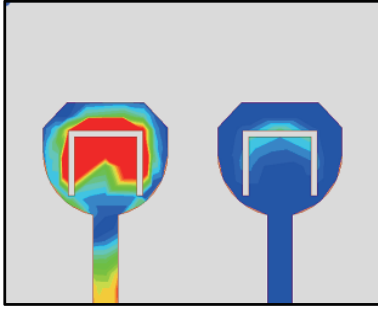


图 11 陷波中心频率处电流分布

Fig. 11 Current distribution at the notch center frequency

2 实验仿真与实测

2.1 S 参数

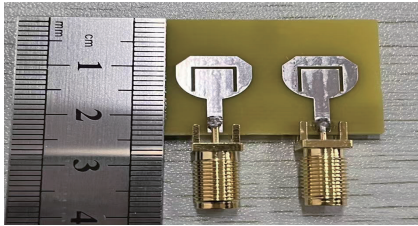
为进一步验证天线的性能, 对其进行了实物制作, 如图 12 所示。使用矢量网络分析仪 Ceyear3674 H 进行测试。仿真和实测 S 参数如图 13 所示。从图中可以看出, 在 2.95~20 GHz 范围内, S_{11} 均小于 -10 dB, 且工作带宽内 S_{21} 均小于 -19 dB。天线在 5.71~6.56 GHz 频段内成功抑制了卫星 C 波段上行频段(5.925~6.425 GHz)的干扰, 具备良好的陷波特性。

2.2 辐射特性

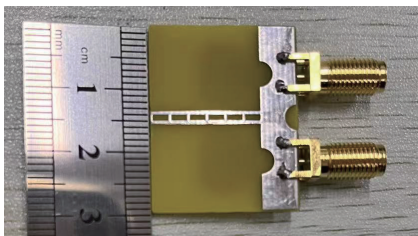
天线辐射方向图是用于表征天线在 E 面和 H 面方向上对电磁信号的接收和发送的性能。图 14 为 UWB-MIMO 天线在 5.5 GHz 和 8 GHz 频率下 E 面与 H 面的二维辐射方向图。可以看出, 仿真与实测结果大致相同, 天线的 E 面呈“8”形, H 面呈圆形, 具有全向辐射特性。

2.3 分集性能

天线的 ECC 用于量化 MIMO 系统中各天线



(a) 正面



(b) 背面

图 12 天线实物图

Fig. 12 Photographs of the proposed antenna

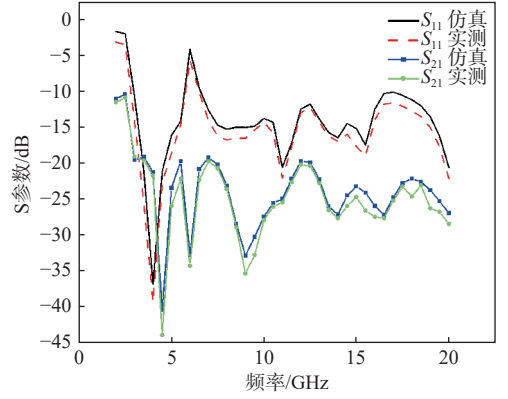
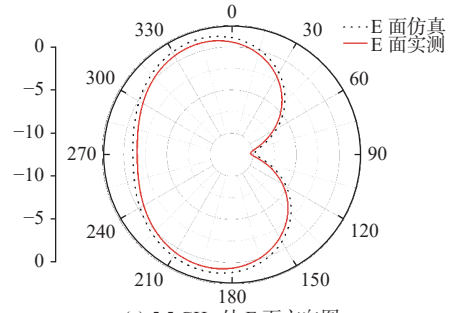
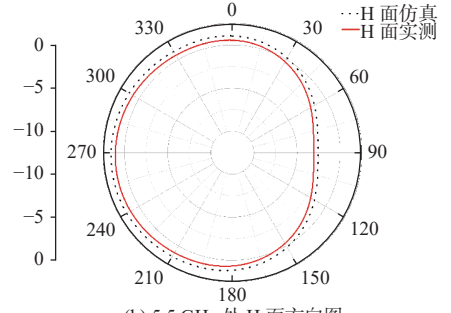


图 13 S 参数仿真与实测结果

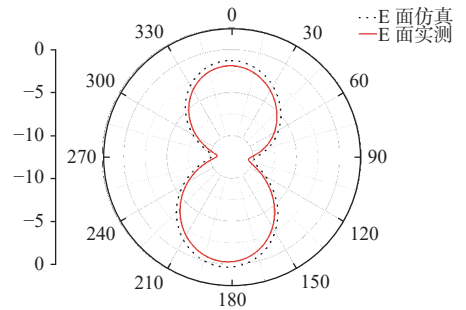
Fig. 13 The simulation and measurement results of S-parameters



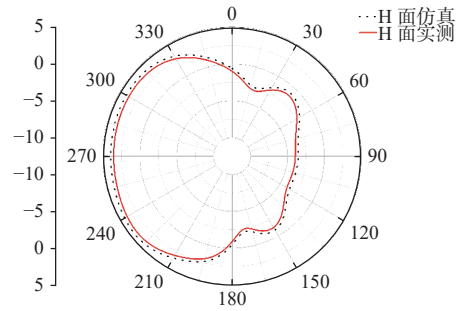
(a) 5.5 GHz 处 E 面方向图



(b) 5.5 GHz 处 H 面方向图



(c) 8 GHz 处 E 面方向图



(d) 8 GHz 处 H 面方向图

图 14 天线 E 面和 H 面方向图

Fig. 14 Antenna E-plane and H-plane radiation patterns

单元输出信号之间的相似性,即信号包络之间的相关程度。分集增益(DG)则表征天线传输过程中所能提供的同一信号独立副本的最大个数。

ECC 和 DG 均是衡量 MIMO 天线系统分集性能和耦合性能的重要参数指标^[17],其计算方式分别如式(4)和式(5)所示。

$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2))(1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2))}$$
 (4)

$$DG = 10 \sqrt{1 - |ECC|^2}$$
 (5)

天线的 ECC 和 DG 结果如图 15 所示,在工作频段内该天线 ECC 值均小于 0.005, DG 均大于 9.9,展现了良好的分集性能。

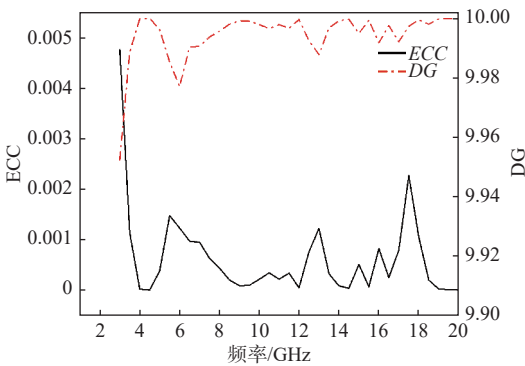


图 15 天线的 ECC 和 DG

Fig. 15 Envelope correlation coefficient and diversity gain of the proposed antenna

2.4 天线增益

图 16 为天线的增益图,在工作频段内天线增益基本保持在 0~5 dBi,表现出较为稳定的辐射性能。但在陷波频段处,增益有所下降。尽管仿真结果与实测结果在增益数值上存在一定差异,但整体趋势仍较为一致。该差异可能源于 SMA 接头焊接过程中引入的微量焊锡材料,但此影响较小,对天线整体性能无显著影响。

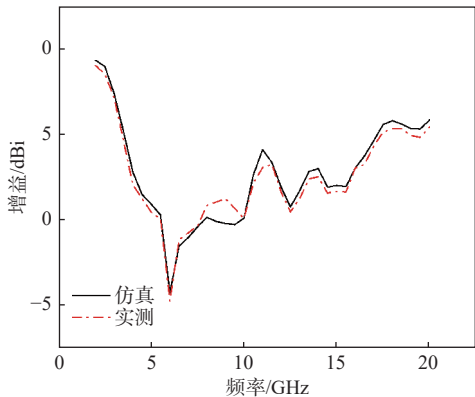


图 16 天线增益图

Fig. 16 Gain of the proposed antenna

2.5 性能对比

表 2 为本文所设计的小型化宽频低耦合 MIMO 天线性能与已发表文献相关天线的性能进行综合比较的结果。可以看出,本文所提天线在尺寸方面更加紧凑,在宽频特性上也展现出相对优越的性能。在耦合性能方面,虽然所设计天线的隔离度略低于文献 [3][4][12] 和 [15],但通过在天线地板引入多孔寄生贴片与 DGS,有效抑制了端口间的耦合,整体仍满足多数文献中提出的 15 dB 隔离要求。综上所述,本文所设计天线在带宽、尺寸紧凑性、隔离度以及 ECC 等关键性能指标上均有良好表现,显示出优异的综合性能,具备在舰船无线通信等高可靠性应用场景中的实际应用潜力。

表 2 本文设计天线与文献中天线参数对比
Table 2 Performance comparison of proposed and reference antennas

文献	天线尺寸/mm	超宽带工作频率/GHz	隔离度/dB	ECC
[3]	36 mm×22 mm	2.9~10.7	20	0.02
[4]	32 mm×32 mm	3.4~10	20	0.05
[12]	28 mm×17 mm	4.6~10.9	15	0.008
[14]	30 mm×20 mm	2~14	18	0.003
[15]	23 mm×54 mm	6.3~12.6	22.5	—
[18]	35 mm×20.6 mm	2~18	15	0.2
[19]	28 mm×22 mm	3.2~9.5	15	—
本文	30 mm×24 mm	2.95~20	19	0.005

3 结 论

本文设计了一种小型化、低耦合、超宽带 MIMO 天线,尺寸仅为 30 mm×24 mm×1.6 mm,实测工作带宽覆盖 2.95~20 GHz,隔离度优于 19 dB, ECC 低于 0.005,具备良好的宽频、陷波与低耦合特性,适用于舰船无线通信等场景。天线采用复合结构,结合多孔寄生贴片与 DGS 实现高隔离,电流分布合理,结构紧凑,为舰船通信天线的小型化与高性能方面提供了可行思路与实践基础。

但当前设计在高频段的耦合控制方面仍存在局限。未来可进一步研究多模态 DGS 结构,提升高频带宽。

参考文献:

[1] LUADANG B, AINTHACHOT C, JANPANGNERN P, et al. EBG-backed ultrawideband circularly polarized Archimedean spiral antenna scheme for IoT applications[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 11769.

- [2] ADDEPALLI T, MEDASANI S, RANI C J, et al. Four-element MIMO diversity antenna for 5G sub-6 GHz N79 band applications and verified with TCM analysis[J]. *Wireless Personal Communications*, 2025, 140(3): 1167–1190.
- [3] 李国金, 马微, 马雨欣, 等. 一种紧凑型四陷波 UWB-MIMO 天线的设计 [J/OL]. 中国舰船研究. (2025-03-17)[2025-04-18]<https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03862>.
LI G J, MA W, MA Y X, et al. Design of a compact four-trap UWB-MIMO antenna[J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*. (2025-03-17)[2025-04-18]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03862> (in Chinese).
- [4] 王琰, 卞立安, 谢舒, 等. 一种小型化宽频带高隔离紧凑型 MIMO 天线设计 [J/OL]. 中国舰船研究. (2024-03-11) [2024-03-11]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03551>.
WANG Y, BIAN L A, XIE S, et al. Compact MIMO antenna with miniaturized wideband and high isolation [J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*. (2024-04-21) [2024-03-11]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03551> (in Chinese).
- [5] 程奇东. 小型化超宽带陷波天线的研究与设计 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024. doi: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2024.001408.
CHENG Q D. Research and design of miniaturized ultra wideband notch antenna[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2024. doi: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2024.001408 (in Chinese).
- [6] THAKUR V, JAGLAN N. A T-shaped compact dual-band MIMO antenna system for 5G smartphone applications[J]. *Wireless Networks*, 2024, 30(3): 1683–1695.
- [7] TAHA H S. A tapered feed UWB-MIMO antenna with high characteristics based on fractal method[J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(12): 125012.
- [8] 景梦娇, 吴涛, 蔡洋, 等. 具有双陷波特性的微型化超宽带 MIMO 天线设计 [J]. *现代电子技术*, 2022, 45(21): 20–26.
JING M J, WU T, CAI Y, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antenna with dual band-notched characteristics[J]. *Modern Electronics Technique*, 2022, 45(21): 20–26 (in Chinese).
- [9] 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 X Y, GAO Z B, ZHENG H X. Design of low-coupling array antenna with defected ground structure[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2021, 50(1): 37–43 (in Chinese).
- [10] 李国金, 朱佳辉. 可用于 WLAN 的双频 MIMO 天线设计 [J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(1): 115–120.
LI G J, ZHU J H. Dual-band MIMO antenna design for WLAN[J]. *Electronic Components and Materials*, 2024, 43(1): 115–120 (in Chinese).
- [11] REN J, HU W, YIN Y Z, et al. Compact printed MIMO antenna for UWB applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1517–1520.
- [12] 张琦, 卞立安, 谢舒, 等. 一种小型化高隔离度 UWB-MIMO 天线设计 [J/OL]. 中国舰船研究. (2024-10-21) [2025-05-13]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03873>.
ZHANG Q, BIAN L A, XIE S, et al. Design of a miniaturized high isolation UWB-MIMO antenna[J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*. (2024-10-21) [2025-05-13]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03873> (in Chinese).
- [13] LIU X L, WANG Z D, YIN Y Z, et al. A compact ultrawideband MIMO antenna using QSCA for high isolation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1497–1500.
- [14] LI P, NAN J C, QIAN J N. Design of a miniaturized dual notch UWB-MIMO antenna[C]//2024 6th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE). Guangzhou: IEEE, 2024: 140–143. doi: 10.1109/CISCE62493.2024.10653284.
- [15] KAUR G, KAUR A, KAUR S, et al. Dual port UWB MIMO dielectric resonator antenna (DRA) with airplane shaped defective ground plane (DGS) with improved isolation level[J]. *Wireless Personal Communications*, 2024, 139(2): 1225–1237.
- [16] 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).
- [17] 丁玮, 庄华伟, 庄俊杰, 等. 毫米波宽带双陷波 MIMO 天线设计 [J]. *电子元件与材料*, 2023, 42(12): 1515–1520, 1528.
DING W, ZHUANG H W, ZHUANG J J, et al. Design of the dual broadband notched MIMO millimeter wave antenna[J]. *Electronic Components and Materials*, 2023, 42(12): 1515–1520, 1528 (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 ultra-wideband MIMO antenna with band notch characteristics[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(S1): 52–55 (in Chinese).
- [19] 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. doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2020.09.011.

Design of miniaturized UWB–MIMO antennas based on composite decoupling structures

Liu Wenjin^{1,2}, Pan Jiaxin^{*1,2}, Nan Jingchang^{1,2}, Jia Yuting^{1,2}

1 School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China

2 Liaoning Key Laboratory of Radio Frequency and Big Data for Intelligent Applications, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China

Abstract: [**Objective**] To address the limited installation space and strong mutual coupling encountered in shipborne communication systems, this study proposes a compact, low-coupling, ultra-wideband (UWB) multiple-input multiple-output (MIMO) antenna. The goal is to enhance system reliability and communication efficiency under complex electromagnetic environments typically found in naval platforms. [**Method**] The front-side radiating patch of the antenna adopts a combination of rectangular and semicircular shapes, along with chamfered corners, to optimize impedance matching and achieve wideband coverage. The innovation on the backside lies in the introduction of a composite decoupling structure that integrates porous parasitic patches and defected ground structures (DGS), endowing the antenna with low coupling characteristics. To further enhance anti-interference performance, an inverted U-shaped slot is etched into the radiating patch to generate a notch band targeting the satellite C-band uplink frequency range (5.925~6.425GHz). The antenna is fabricated on a 1.6 mm thick FR4 substrate, which provides a good balance between mechanical strength and cost efficiency, with overall dimensions of 30 mm×24 mm×1.6 mm. [**Results**] Simulated and measured results demonstrate that the antenna supports stable operation across a wide frequency range of 2.95~20 GHz. The reflection coefficient remains consistently below -10 dB, and the isolation consistently exceeds 19 dB, with a peak isolation of up to 40 dB observed in higher frequency bands. The envelope correlation coefficient (ECC) is less than 0.005, and the diversity gain DG remains above 9.9 throughout the entire operating range. The antenna also achieves stable omnidirectional radiation with gain levels maintained between 0 and 5 dBi. The introduced notch structure effectively eliminates interference within the designated C-band uplink frequency range. [**Conclusion**] The proposed UWB-MIMO antenna offers advantages such as compact structure, wide bandwidth, high isolation, and strong anti-interference capability. It demonstrates excellent performance and engineering feasibility, making it well-suited for modern shipborne wireless communication systems and showing great potential for practical engineering applications.

Key words: antennas; ultra-wideband (UWB); multiple-input, multiple-output(MIMO); miniaturization; low coupling; porous parasitic patch; defected ground structure