

DOI: 10.13382/j.jemi.2508208

基于特征模理论的超宽带双陷波 MIMO 天线的研究*

杨永康¹ 杨福慧² 章芳睿¹ 杜成珠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:随着无线通信技术的飞速发展,超宽带(ultra-wide band, UWB)通信具备高传输速率、大容量等优势,多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术在提升通信系统性能方面起着关键作用,提出了一种微带线馈电超宽带双陷波 MIMO 天线。通过在圆形辐射贴片上刻蚀半椭圆形缺口实现超宽带特性,在辐射贴片上刻蚀 U 型槽使天线抑制 WiFi 5G 频段(5.125~5.925 GHz)的干扰,在馈线上刻蚀倒 U 型槽来抑制 Ku 标准频段下行(12.2~12.75 GHz)的干扰,并用特征模理论进行验证分析。该天线由两个单元天线平行放置,单元天线的地板进行相连,通过 L 型隔离枝节有效提高天线隔离度(|S₂₁|)。天线尺寸为 60 mm×30 mm×1 mm。实测结果表明,天线的-10 dB 工作带宽为 3.88~20.49 GHz,相对带宽为 136.3%,MIMO 天线在工作频段内的端口隔离度均大于 20 dB,最大实测增益为 6.1 dB,包络相关系数(envelope correlation coefficient, ECC)小于 0.02,分集增益(diversity gain, DG)大于 9.99,分集性能良好,并且具有良好的辐射特性,在 UWB-MIMO 系统中具有广泛的应用前景,有助于推动无线通信领域的发展与创新。

关键词:超宽带;MIMO;特征模;陷波;高隔离度

中图分类号: TN828.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Research on ultra-wide band dual notch MIMO antenna based on characteristic mode theory

Yang Yongkang¹ Yang Fuhui² Zhang Fangrui¹ Du Chengzhu¹
(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: With the rapid development of wireless communication technology, ultra-wide band (UWB) communication offers advantages such as high transmission rates and large capacity. multiple-input multiple-output (MIMO) technology plays a crucial role in enhancing the performance of communication systems. This paper proposes a microstrip-fed ultra-wideband dual-notch MIMO antenna. By etching semi-elliptical notches on the circular radiating patch, ultra-wideband characteristics are achieved. A U-shaped slot is etched on the radiating patch to suppress interference from the 5G WiFi band (5.125~5.925 GHz), while an inverted U-shaped slot is etched on the feed line to reject interference from the Ku-band downlink standard frequency range (12.2~12.75 GHz). The design is validated and analyzed using characteristic mode theory. The antenna consists of two unit antennas placed in parallel. The unit antennas are connected through a shared ground plane, and an L-shaped isolation stub is employed to effectively improve the isolation (|S₂₁|) between the antennas. The antenna dimensions are 60 mm×30 mm×1 mm. Measurement results demonstrate that the antenna achieves an impressive -10 dB operating bandwidth of 3.88~20.49 GHz with a remarkable fractional bandwidth of 136.3%. The MIMO configuration exhibits excellent performance characteristics, including: port isolation greater than 20 dB across the entire operating band, a peak measured gain of 6.1 dB, envelope correlation coefficient (ECC) below 0.02, and diversity gain (DG) exceeding 9.99. These parameters confirm superior diversity performance and radiation characteristics. The proposed design shows significant potential for UWB-MIMO system applications, offering promising prospects for advancing wireless communication technologies and fostering innovation in this field.

Keywords: ultra-wide band (UWB); MIMO; characteristic mode theory (CMT); notch; high isolation

0 引 言

超宽带 (ultra-wide band, UWB) 技术是一种具有极高带宽和极低功率谱密度的无线通信技术,其有着其他通信技术不能比的特点,如支持极高的传输率、极大的系统容量、超宽的带宽、极低的功耗。多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术能够在不增加带宽和发射功率的情况下,显著提高通信系统的容量和可靠性,通过利用空间分集来对抗衰落。将 MIMO 技术与超宽带天线相结合,可以进一步提高通信系统的性能。

为了避免超宽带系统对现有窄带系统的干扰,同时减少其他系统对超宽带系统的影响,设计带有陷波特性的超宽带天线是极有必要的。目前研究者常用的设计陷波方法较多。如开槽技术^[1-3]、添加电磁带隙结构技术^[4-7]、刻蚀开口谐振环 (SRR) 技术^[8-10] 和加载寄生枝节技术^[11-13] 等。文献[4]在馈线处引入了一种半圆开口谐振环-电磁带隙 (SCSR-EBG) 结构,使单个 EBG 结构可以消除 WiMAX 和 WLAN 两个频段的干扰。文献[11]在天线的馈线附近加载了两个不同长度的 U 型寄生耦合枝节,使天线具有了在 WLAN 波段和 X 波段的两个陷波。在 MIMO 天线的设计中,常用来提高单元天线之间隔离度 (|S₂₁|) 的方法有中和线技术^[14-16]、缺陷地结构 (DGS)^[17-18]、EBG 结构^[19-20] 和极化分集技术^[21-23] 等。文献[20]提出一种 EBG 结构用于消除表面波的传输,减少单元天线间的相互耦合,有效提升了天线隔离度。文献[21]MIMO 天线采用垂直极化分集技术,并通过加载十字形去耦结构来使提高天线的隔离度。虽然上述 MIMO 天线性能良好,但要在实现结构简单、超宽带的工作带宽、具有多个陷波特性的前提下,设计具有高隔离度特性的 MIMO 天线仍比较困难。

特征模分析方法通过求解天线结构的特征电流分布及其对应的特征值,能够从电磁场本质特性层面揭示天线的辐射机理。文献[24]先对一款窄带单极子天线进行特征模分析,在其结构上引入渐变结构和矩形槽,使特征模式在目标频段内谐振,并通过馈电激励方式激发该特征模式。文献[25]运用特征模理论进行验证分析,指出对陷波频段有贡献的特征模式,验证了特征模理论指导设计天线的可行性。

本文提出了一种超宽带双陷波 MIMO 天线,并用特征模理论进行分析。该天线采用微带线馈电,两个单极子天线平行放置,天线工作带宽为 3.88~20.49 GHz,在辐射贴片上刻蚀 U 型槽和倒 U 型槽,使天线在 4.59~6.89 GHz 和 11.57~13.95 GHz 之间产生两个阻带,有效抑制了 WiFi 5G 频段和 Ku 标准下行频段的电磁干扰,并

用特征模理论进行验证分析。通过加载一对 L 形隔离枝节并连接使天线整个频段内的隔离度均大于 20 dB。

1 MIMO 天线结构设计

1.1 单元天线设计

本文设计的天线印制在 FR4_epoxy 介质基板上,其介电常数为 4.4,损耗角正切值为 0.02。单元天线的结构如图 1 所示,其 S 参数如图 2 所示,天线尺寸为 30 mm×30 mm×1 mm,选用 50 Ω 微带线进行馈电,通过在天线上切角及开槽,实现了超宽带双陷波特性。单元天线的具体尺寸如表 1 所示。

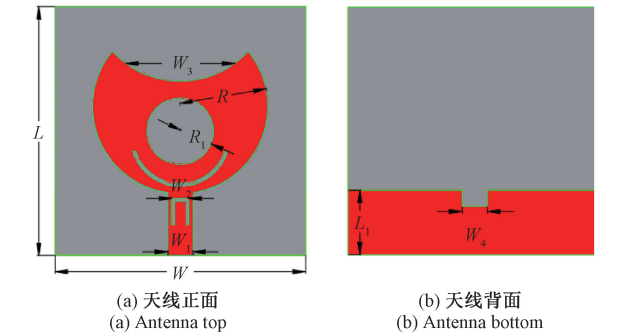


图 1 单元天线结构
Fig. 1 Unit antenna structure

表 1 单元天线的几何参数

Table 1 Unit antenna geometric parameters			
参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
L	30	W_1	2
W	30	W_2	1.06
R	10.5	W_4	2
R_1	4	L_1	7.85
W_3	11.5		

1.2 二元 MIMO 天线设计

将两个单元天线平行放置在介质基板上设计成一款带宽为 3.88~20.49 GHz 的双陷波二元 MIMO 天线,天线的总体尺寸为 30 mm×60 mm×1 mm,二元 MIMO 天线的结构和实物如图 3 所示。二元 MIMO 天线的具体尺寸如表 2 所示。

表 2 二元 MIMO 天线的几何参数

Table 2 Dual-element MIMO antenna geometric parameters			
参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
L	30	W	60
L_2	19.5	W_2	14
L_3	7.5	W_3	5

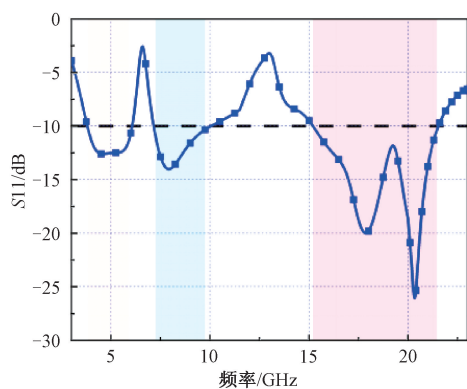
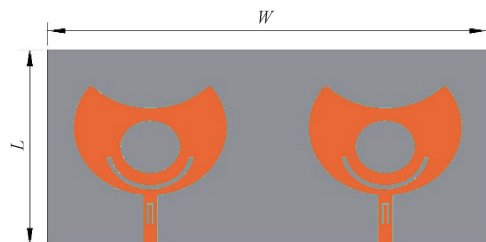


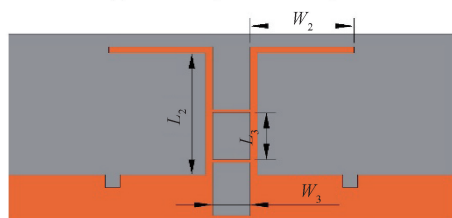
图 2 单元天线 S11

Fig. 2 Unit antenna S11



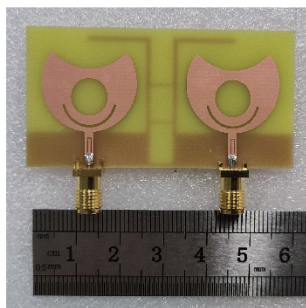
(a) 天线正面结构

(a) Antenna top structural diagram



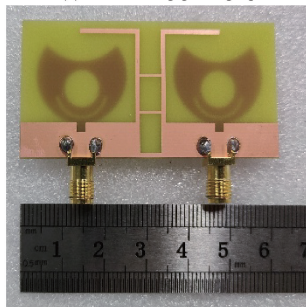
(b) 天线背面结构

(b) Antenna bottom structural diagram



(c) 天线正面实物

(c) Antenna top photograph



(d) 天线背面实物

(d) Antenna bottom photograph

图 3 天线结构和实物

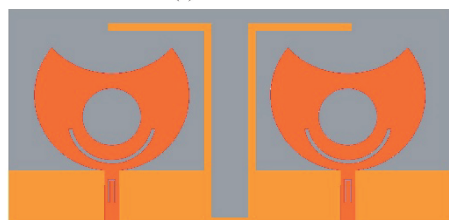
Fig. 3 Antenna structural diagram and photograph

二元 MIMO 天线设计过程如图 4 所示, 天线 I 为两个单元天线平行放置, 地板连接。在天线 I 基础上, 天线 II 在接地板上端增加一对 L 型枝节, 并在接地板刻蚀一个矩形槽, 对单元天线间的耦合效果进行优化。在此基础上, 天线 III 连接了两个 L 型枝节来改善隔离结构, 进一步优化了单元天线间的隔离度。



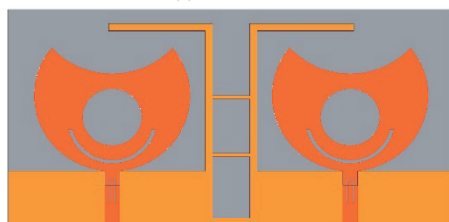
(a) 天线 I

(a) Antenna I



(b) 天线 II

(b) Antenna II



(c) 天线 III

(c) Antenna III

图 4 二元 MIMO 天线设计过程

Fig. 4 Dual-element MIMO antenna design process

天线设计过程的 S 参数结果如图 5 所示。天线 I 的工作带宽为 3.5 ~ 23.6 GHz, 在 4.8 ~ 6.9 和 11.9 ~ 14.9 GHz 内产生两段陷波, 隔离度基本小于 15 dB, 解耦效果不理想。增加一对 L 型枝节后, 天线 II 的工作带宽在高频处减小, 第 2 段陷波整体略微向低频处移动, 隔离度提升至 17 dB 以上, 隔离效果得到明显改善。天线 III 在优化隔离枝节后, 工作带宽与天线 II 基本保持一致, 第 2 段陷波频段又频移至天线 I 的频段, 工作频段内隔离度整体大于 20 dB, 在高频处的陷波频段几乎没有发生偏移, 满足设计要求。

1.3 天线结构的特征模分析

利用 CST 仿真软件对单元天线开展特征模理论验证分析, 仿真分析了天线在 3 ~ 22 GHz 频段内的 22 个模式, 其中, 模式 1、3、4、5、6、8、9、10、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21 及 22 对天线带宽产生贡献; 模式 2、7 和 11

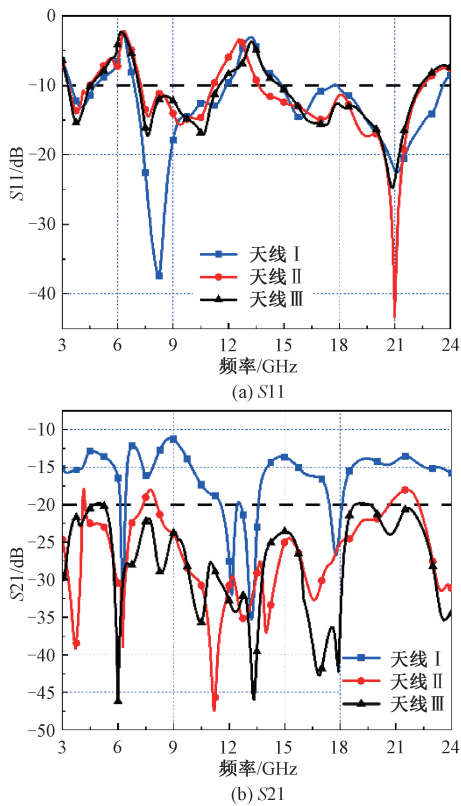


图 5 二元 MIMO 天线设计过程 S 参数对比
Fig. 5 Comparison of S -parameters in the design process of a dual-element MIMO antenna

对陷波频带产生贡献,模式 2 主要影响低频陷波频段,模式 7 和 11 主要影响高频陷波频段。图 6 所示为模式 1、2、5、7、11、17 的模式显著性 (model significance, MS) 曲线。

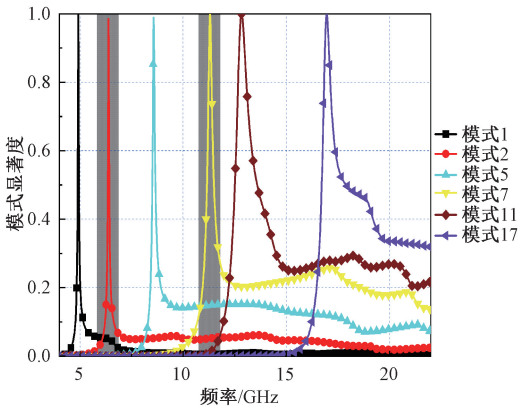


图 6 模式显著性
Fig. 6 Model significance

图 7 所示是模式 1 (4.9 GHz)、2 (6.39 GHz)、5 (8.57 GHz)、7 (11.3 GHz)、11 (12.83 GHz)、17 (16.95 GHz) 在各自谐振频点的模式方向图,各模式

对应的谐振点与在该模式下 MS 值为 1 的点相互对应。从图 7 可见,模式 2、7 和 11 的方向图在 Z 轴出现凹陷,而 6.39、11.3、12.83 GHz 恰处于天线陷波频段。

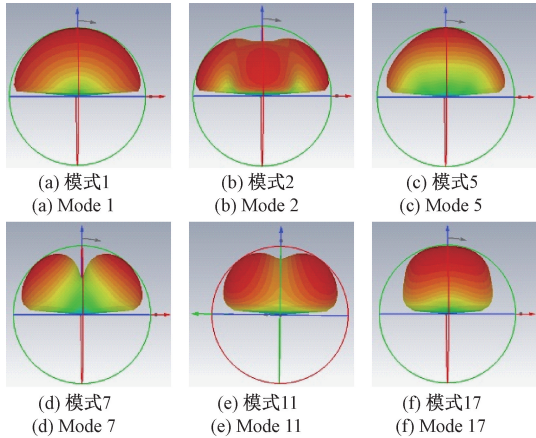


图 7 不同频点的模式方向图
Fig. 7 Mode patterns at different frequencies

2 天线仿真与实测分析

2.1 天线参数分析

解耦结构中 L 型枝节的长度对天线的性能会产生影响,因此对 W_2 和 L_2 两个参数进行仿真优化分析。不同尺寸的 W_2 对应 S 参数的变化如图 8 所示。从图 8(a) 可以看出,随着 W_2 值的变大,天线在 7~11 GHz 的 S_{11} 值整体向上移动,其余工作频段基本保持不变。由图 8(b) 可以看出,当 $W_2 = 12$ mm 时,天线在 4.6~5.7、7.7~8.6 和 18.3~20.1 GHz 内的隔离度大于 17.5 dB,没有达到 20 dB 的隔离效果;当 $W_2 = 16$ mm 时,天线在低频处的隔离度得到明显改善 (均大于 20 dB),但在 18.3~20 GHz 内隔离度仅大于 18.2 dB;当 $W_2 = 14$ mm 时,天线在工作频段内隔离度均大于 20 dB,满足设计要求。 L_2 的长度对天线 S 参数的影响如图 8 所示。如图 9(a) 所示,随着 L_2 值的增大,天线的 S_{11} 值在 8.3~12 GHz 内向下移动,其余工作频段基本不变。而图 (b) 可以看出,当 $L_2 = 17.5$ mm 时,天线在 3.88~5.8 和 18.3~19.8 GHz 内仅达到 16.9 dB 的隔离效果;当 $L_2 = 21.5$ mm 时,天线在 18.2~20 GHz 隔离度仍仅大于 17 dB;通过对比分析, $L_2 = 19.5$ mm 时,天线在工作频段内隔离度均大于 20 dB,满足设计要求。

2.2 天线 S 参数

图 10 所示为天线仿真和测试的 S 参数结果。从图 10 实测结果可以看出,天线的工作频段为 3.88~20.49 GHz,且在工作频段内隔离度均大于 20 dB,同时具有 4.59~6.89 和 11.57~13.95 GHz 频段内的两个陷波,可抑制 WiFi 5G 频段 (5.125~5.925 GHz) 和 Ku 频段下

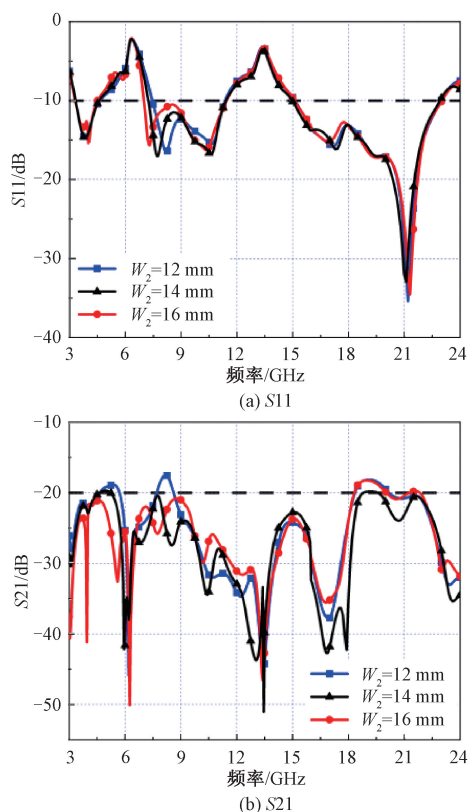
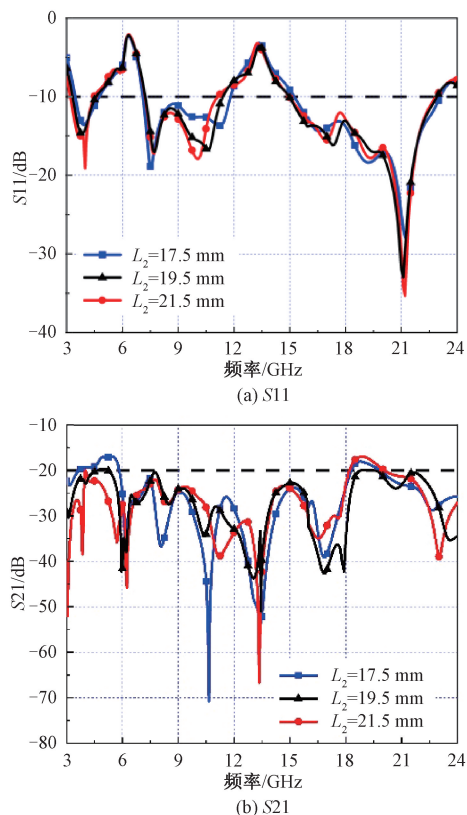
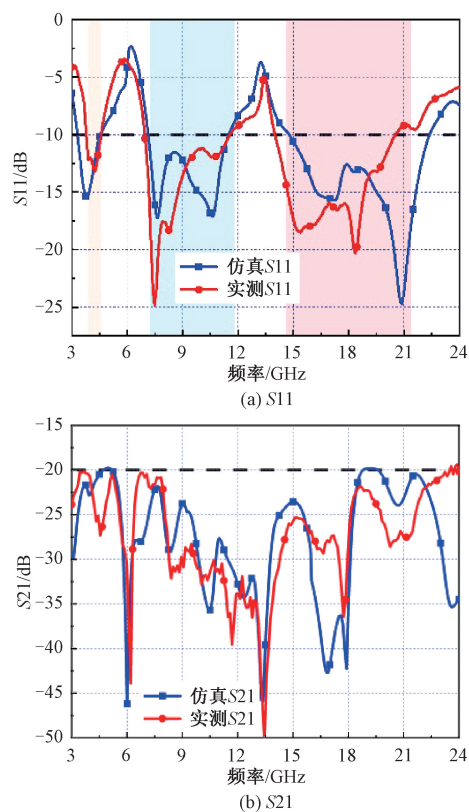
图 8 不同尺寸 W_2 对 S 参数的影响Fig. 8 The impact of different W_2 sizes on S-parameters图 9 不同尺寸 L_2 对 S 参数的影响Fig. 9 The impact of different L_2 sizes on S-parameters

图 10 仿真和实测 S 参数

Fig. 10 Simulated and measured S-parameters

行信号(12.2~12.75 GHz)的干扰。由于加工误差、馈电接头和测试电缆等因素的影响,实际测试结果和仿真结果存在些许差别。

2.3 辐射方向图

图 11 所示为天线在 4、10、16 GHz 时,E 面与 H 面实测与仿真的远场辐射方向图。在这 3 个频点,E 面呈现“8”字型,具有较好的双向辐射模式;H 面呈现“O”型,辐射方向图具有全向辐射的特性,但随着频率的增加,辐射方向图逐步发生畸变,天线的实测与仿真存在一定误差。整体来看,天线具有良好的辐射性能。

2.4 天线增益

天线增益是用来衡量天线将输入功率集中辐射的能力,是天线的一个重要参数。天线增益图如图 12 所示,天线在工作频段内的最大实测增益可达到 6.1 dB,总体上仿真与实测结果具有较好的一致性。

2.5 天线分集性能

包络相关系数(envelope correlation coefficient, ECC)是用来描述天线之间相关程度的参数,计算公式如下:

$$ECC =$$

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

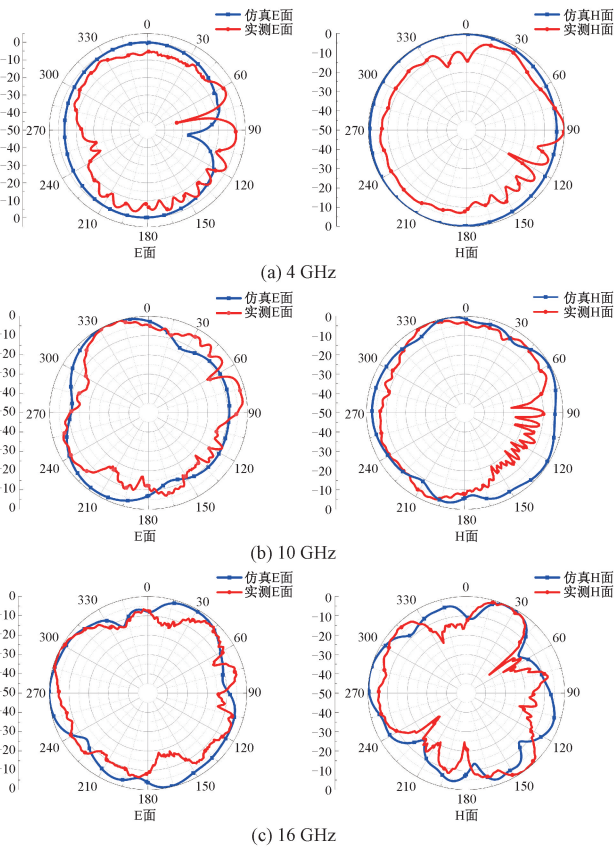


图 11 天线辐射方向图
Fig. 11 Antenna radiation pattern

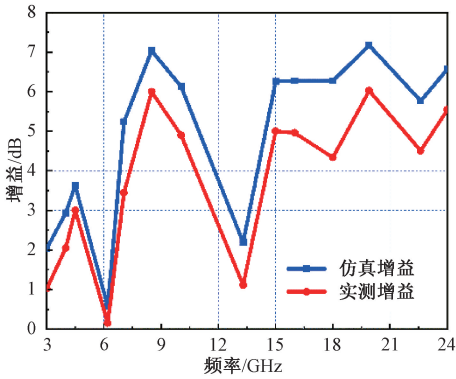


图 12 天线增益
Fig. 12 Antenna gain

分集增益 (diversity gain, DG) 作为衡量 MIMO 天线性能的另一个重要指标,计算公式如下:

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

ECC 实测与仿真曲线如图 13 所示,MIMO 天线的仿真与实测 ECC 值在工作频段内均小于 0.02,说明天线单元间具有良好的独立性。DG 实测与仿真曲线如图 14 所示,DG 值均高于 9.99 dB,说明天线单元间具有良好的分集性能。

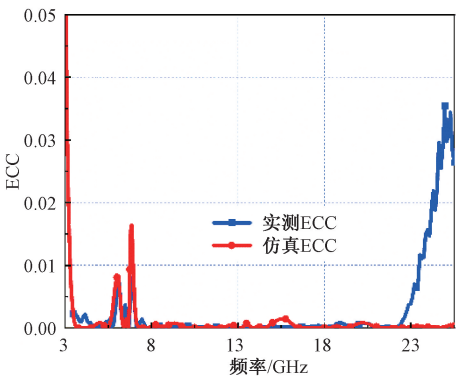


图 13 ECC 实测与仿真曲线
Fig. 13 ECC measurement and simulation curves

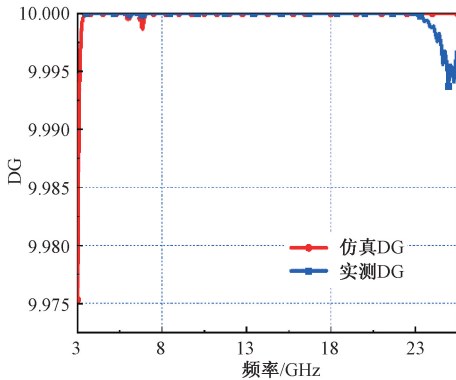


图 14 DG 实测与仿真曲线
Fig. 14 DG measurement and simulation curves

3 天线性能对比

表 3 为所设计的基于特征模理论的超宽带双陷波 MIMO 天线和其他方法的性能在端口数、工作带宽、陷波频段、隔离度和是否进行特征模分析这五方面进行对比,可以看出,本文设计的天线具有较宽的工作带宽、双陷波特性和特征模理论的验证分析,在超宽带通信系统中具有更广泛的应用前景。

表 3 天线性能比较

Table 3 Antenna performance comparison					
方法	端口数	工作带宽/ GHz(相对带宽)	陷波频段/ GHz	隔离度/ dB	特征模 分析
文献[2]	2	2.8~10.3(114%)	5.3~6.3 7.5~8.8	>21	无
文献[11]	2	3~11.5(117%)	5~6 7.2~8.6	>20	无
文献[26]	2	2.9~11.5(119%)	5.0~5.9	>20	无
文献[27]	4	2.46~10.6(124%)	4.35~6.08	>20	无
文献[28]	2	3.07~11.1(113%)	-	>20	有
本文	2	3.88~20.49 (136%)	4.59~6.89 11.57~13.95	>20	有

4 结 论

针对现代无线通信系统对高性能、低成本和小型化的迫切需求,该研究的核心思路是设计一种超宽带陷波天线,以满足对超宽带通信系统需求,因此提出了一种具有双陷波特性的超宽带 MIMO 天线,通过在单极子天线的辐射贴片上刻蚀 C 型槽和倒 U 型槽来产生两个陷波,在天线单元间刻蚀矩形槽和加载 L 型枝节来改善隔离效果,并运用特征模理论进行验证分析。该研究采用的核心技术包括辐射贴片开槽和倒 L 形隔离枝节的引入。在技术难点方面,该研究克服了 MIMO 天线设计中的相互耦合和隔离度问题。通过调整隔离枝节的形状,以及合理控制各个辐射单元之间的距离,确保了在所需频段内的高隔离度。实测结果表明,天线的工作带宽为 3.88 ~ 20.49 GHz,在 4.59 ~ 6.89 和 11.57 ~ 13.95 GHz 频段内具有陷波,有效抑制了 WiFi 5G 频段和 Ku 频段下行频段的窄带干扰信号,在工作频段内隔离度整体大于 20 dB, ECC 值均低于 0.02, DG 值高于 9.99 dB。本文设计的天线不仅满足了现代无线通信的多重需求,同时对未来超宽带无线通信系统的发展提供了有力支持。

参考文献

- [1] 李林, 刘洪庆, 李荣强. 一种超宽带双陷波可穿戴天线设计[J]. 电子元件与材料, 2024, 43(3): 353-358, 366.
- LI L, LIU H Q, LI R Q. Design of an ultra-wideband dual band-notched wearable antenna [J]. Electronic Components and Materials, 2024, 43(3): 353-358, 366.
- [2] 王庆祥, 任永立, 杜成珠. 二元超宽带高隔离度 MIMO 二阻带槽天线设计[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(1): 102-105.
- WANG Q X, REN Y L, DU CH ZH. Design of two-port UWB high isolation MIMO double band-notched slot antenna[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(1): 102-105.
- [3] 杨萍, 王代强. 一种四端口多陷波超宽带天线的设计[J]. 电子元件与材料, 2023, 42(10): 1256-1262, 1267.
- YANG P, WANG D Q. Design of a quad-port ultra-wideband antenna with multi-notched band characteristics [J]. Electronic Components and Materials, 2023, 42(10): 1256-1262, 1267.
- [4] 时晶晶, 姚佰栋, 吴先良, 等. 一种紧凑型电磁带隙结构双陷波超宽带天线设计[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(3): 349-354.
- SHI J J, YAO B D, WU X L, et al. A compact dual

band-notched UWB antenna design based on electromagnetic-bandgap structure[J]. Radar Science and Technology, 2023, 21(3): 349-354.

- [5] ABBAS A, HUSSAIN N, SUFIAN M A, et al. Highly selective multiple-notched UWB-MIMO antenna with low correlation using an innovative parasitic decoupling structure[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2023, 43(Suppl C): 101440.
- [6] ALIZADEH F, GHOBADI C, NOURINIA J, et al. UWB dual-notched planar antenna by utilizing compact open meander slitted EBG structure [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2021, 136(Suppl C): 153715.
- [7] MUKHERJEE S, ROY A, MUKHERJEE A, et al. Notch band characteristics improvement of a printed ultra wideband antenna by embedding frequency Selective Surface [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2024, 178: 155276.
- [8] HAJLAOUI E A, ALMOHAIMEED Z. New SRR/CSRR antenna dual Band-notch for WLAN and X Band Satellite communication [J]. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2024, 23(1): 1-12.
- [9] SALEEM S, KUMARI S, YADAV D, et al. SRR loaded WLAN band-notched UWB MIMO antenna with spatial diversity characteristics [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022, 771: 303-310.
- [10] SUVALKA R, AGRAHARI S, YADAV A K S, et al. EBG and SRR loaded triple band notched UWB antenna [J]. Scientia Iranica, 2024, 31(5): 458-468.
- [11] 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.
- [12] ADDEPALLI T, NAGARAJU V S, KILARU M, et al. A compact self isolated UWB-MIMO antenna with WiMAX and WLAN band notched characteristics for portable wireless applications [J]. Wireless Personal Communications, 2024, 135(3): 1363-1382.
- [13] HEMALATHA T, ROY B. Ground plane alteration extremely wideband SPAS pair-based MIMO antenna with improved isolation and band notched characteristics [J].

- AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2024, 176: 155118.
- [14] KAPURE V R, RATHOD S S. A two element EBG-inspired UWB MIMO antenna with triple band notched characteristics and high isolation [J]. *Sādhana*, 2023, 48(1): 1-16.
- [15] TIGHILT Y, BENSID C, SAYAD D, et al. Low-profile UWB-MIMO antenna system with enhanced isolation using parasitic elements and metamaterial integration[J]. *Electronics*, 2023, 12(23): 4852.
- [16] YUE Z, DU C, YANG F. Design of ultra-wideband multi-input multi-output slot antenna with high isolation fed by coplane waveguide [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2023, 45(6): 903-909.
- [17] DING T, YANG H, CHEN Z, et al. A 4-Element UWB MIMO antenna system with high isolation performance[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2023, 38(10): 799-806.
- [18] ZHAO L, WANG Y, LIU C, et al. Compact circular-shaped MIMO antenna covers UWB bandwidth with four frequently-used band-notched characteristics for multi-scenario applications [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 32762-32771.
- [19] BABU N S, ANSARI A Q, KANAUIA B K, et al. A two-port UWB MIMO antenna with an EBG structure for WLAN/ISM applications [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 74(Part 2): 334-339.
- [20] PAKALA R, DASARI R. Mutual coupling reduction in UWB-MIMO antenna using circular slot EBG structures[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2023, 119: 177-188.
- [21] JAYANT S, SRIVASTAVA G. Close-packed quad-element triple-band-notched UWB MIMO antenna with upgrading capability[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(1): 353-360.
- [22] KA'BI A A. Planar MIMO antenna model for spectrum sensing applications [J]. *Wireless Personal Communications*, 2024, 135(2): 919-939.
- [23] YIN W F, CHEN S X, CHANG J J, et al. CPW Fed Compact UWB 4-Element MIMO Antenna with High Isolation [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(8): 2688.
- [24] 王岩, 李奕欣, 王昊, 等. 基于特征模理论的超宽带单极子天线设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(11): 3078-3085.
- WANG Y, LI Y X, WANG H, et al. Design of UWB monopole antenna based on characteristic mode theory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 43(11): 3078-3085.
- [25] RAO B R, CHAKRADHAR K S, NATARAJ D. Design, optimization and experimental verification of UWB-MIMO antenna with WLAN and complete X-band notched characteristics, checked with characteristic mode analysis (CMA) [J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2023, 115(1): 139-158.
- [26] 李其强, 王新, 杨凯, 等. 一种高隔离度陷波 UWB-MIMO 天线设计[J]. *无线电工程*, 2024, 54(11): 2618-2623.
- LI Q Q, WANG X, YANG K, et al. Design of a high isolation notched UWB-MIMO antenna [J]. *Radio Engineering*, 2024, 54(11): 2618-2623.
- [27] 张玲, 杜成珠, 胡鹏, 等. 超宽带单陷波四元 MIMO 天线的设计 [J]. *压电与声光*, 2024, 46(3): 392-398.
- ZHANG L, DU CH ZH, HU P, et al. Design of four-element UWB-MIMO antenna with single notched band[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2024, 46(3): 392-398.
- [28] LI W, WU L, LI S, et al. Bandwidth enhancement and isolation improvement in compact UWB-MIMO antenna assisted by characteristic mode analysis [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 17152-17163.

作者简介



杨永康, 2023 年于上海电力大学获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带 MIMO 天线、陷波天线。

E-mail: 1909871210@qq.com

Yang Yongkang received his B. Sc. degree from Shanghai University of Electric Power in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Electric Power. His main research interests include UWB MIMO antenna and notch antenna.



杨福慧, 1995 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2002 年于南京邮电大学获得硕士学位, 现为中电科微波通信(上海)股份有限公司高级工程师, 主要研究方向包括宽带天线、阵列天线技术及无线通信技术。

E-mail: yangfuhui@waveguide.com.cn

Yang Fuhui received the B. Sc. degree from the Xidian University in 1995 and M. Sc. degree from Nanjing University of

Posts and Telecommunications in 2002. Now he is a senior engineer of CETC Shanghai Microwave Communication Co. LTD. His main research interests include wideband antenna, array antenna and wireless communication.



章芳睿, 2022 年于南京邮电大学获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为多频段 MIMO 天线。

E-mail: 675382943@qq.com

Zhang Fangrui received his B. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Electric Power. His main research interest includes Multiband MIMO antenna.



杜成珠 (通信作者), 1995 年于西安电子科技大学学士学位, 2003 年于南京邮电大学获得硕士学位, 2012 年于上海大学获得博士学位, 现为上海电力大学副教授, 主要研究方向包括柔性天线和纺织天线、多频和宽带天线以及 MIMO 技术。

E-mail: duchengzhu@163.com

Du Chengzhu (Corresponding author) received her B. Sc. degree from the Xidian University in 1995, M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2003, and Ph.D. degree from Shanghai University in 2012. Now she is an associate professor of Shanghai University of Electric Power. Her main research interests include flexible antenna and textile antenna, multiband and wideband antennas and MIMO technologies.