

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508448

四元高隔离度二阻带超宽带 MIMO 槽天线的设计*

杨福慧¹ 李运胜¹ 印小忠¹ 章芳睿² 杜成珠²

(1. 中电科微波通信(上海)有限公司 上海 201815; 2. 上海电力大学人工智能学部 上海 200082)

摘要:针对目前超宽带(ultra-wideband, UWB)多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)天线容易受到多个频段的信号干扰,且各端口间隔离较差的问题。提出了一款具有二陷波特性的紧凑型高隔离超宽带四端口 MIMO 槽天线。天线尺寸为 65 mm×65 mm×0.8 mm。天线采用共面波导(coplanar waveguide, CPW)馈电,并加载十字形隔离结构来提高端口间的隔离度,通过在辐射贴片上刻蚀两个 C 形槽,在 3.25~3.85 GHz 和 4.32~5.69 GHz 频带产生陷波,可抑制 WiMAX(3.3~3.7 GHz)和 WLAN(5.15~5.825 GHz)频段的干扰信号。对天线的各项性能参数进行了深入分析,包括峰值增益、包络相关系数(envelope correlation coefficient, ECC)、分集增益(diversity gain, DG)以及全反射系数(total active reflection coefficient, TARC)。经过实测,该多输入多输出天线的工作频段为 2.48~11.2 GHz,隔离度大于 20 dB,包络相关系数小于 0.07,分集增益大于 9.97,分集性能良好。仿真与实测结果表明,该天线在信号传输和抗干扰方面表现优异,各端口间的干扰小,在超宽带 MIMO 通信系统中,尤其是 WiMAX 和 WLAN 陷波频段,具有良好的发展前景,可以满足无线通信的需求。

关键词:超宽带;共面波导;陷波;多输入多输出

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

Design of a quad-port high-isolation dual-notched ultra-wideband MIMO slot antenna

Yang Fuhui¹ Li Yunsheng¹ Yin Xiaozhong¹ Zhang Fangrui² Du Chengzhu²

(1. CETC Shanghai Microwave Communication Co., Ltd., Shanghai 201815, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

Abstract: Aiming at the issues that current ultra-wideband (UWB) multiple-input multiple-output (MIMO) antennas are prone to signal interference across multiple frequency bands and suffer from poor isolation between ports, a compact high-isolation ultra-wideband four-port MIMO slot antenna with dual-notched characteristics is proposed. The antenna has a dimension of 65 mm×65 mm×0.8 mm. Employing coplanar waveguide (CPW) feeding and integrated with a cross-shaped isolation structure to enhance the isolation between ports, this antenna generates notches in the 3.25~3.85 GHz and 4.32~5.69 GHz frequency bands by etching two C-shaped slots on the radiating patch. These notches can effectively suppress interference signals from the WiMAX (3.3~3.7 GHz) and WLAN (5.15~5.825 GHz) frequency bands. In-depth analyses were carried out on various performance parameters of the antenna, including peak gain, envelope correlation coefficient (ECC), diversity gain (DG), and total active reflection coefficient (TARC). Experimental measurements show that the proposed MIMO antenna operates within the frequency band of 2.48~11.2 GHz, with an isolation of over 20 dB, an ECC of less than 0.07, and a DG of more than 9.97, demonstrating excellent diversity performance. Both simulation and measurement results indicate that the antenna exhibits superior performance in signal transmission and anti-interference capability, with minimal interference between ports. It holds promising application prospects in ultra-wideband MIMO communication systems, particularly in the WiMAX and WLAN notched frequency bands, and can meet the requirements of wireless communication systems.

Keywords: UWB; coplanar waveguide (CPW); notched-band; MIMO

0 引言

随着超宽带 (ultra-wideband, UWB) 技术的发展,人们对更高的数据速率和更大的带宽提出了更高的要求,以满足多种通信需求。自 2002 年起,美国联邦通信委员会(FCC)批准了 3.1~10.6 GHz 的 UWB 频段,其带宽超过 500 MHz,使 UWB 技术成为研究热点之一^[1]。在万物互联的时代,UWB 技术是一种实现各种室内设备互联的有效技术,未来仍具有广阔的发展空间和市场机遇。

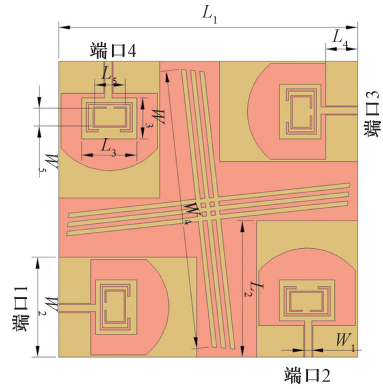
随着便携式小型化设备的发展,微带天线的研究越来越多^[2-19],而平板多输入输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 天线因其良好的抗多径能力而成为研究热点。针对不同应用频段的需求,对超宽带天线进行滤波设计已成为抑制特定频段干扰的有效手段和发展趋势。文献[4]设计了一款四端口 MIMO 天线,通过在辐射贴片上蚀刻 U 形槽以及在馈线两端加载谐振单元结构来实现陷波特性的。文献[13]设计了一款二端口 MIMO 天线,通过在辐射贴片上蚀刻 C 形槽来实现陷波特性的。文献[14]提出了一款四端口 MIMO 天线,通过在辐射贴片上蚀刻 U 形槽的方式在 4.35~6.08 GHz 处产生陷波特性的。文献[15]设计了一款具有单陷波特性的四端口 MIMO 天线,天线采用共面波导的方式进行馈电,通过在辐射贴片上蚀刻 C 型槽来实现陷波特性的。文献[16]提出了一种具有双陷波特性的四端口 MIMO 天线,天线陷波频段为 5.17~5.88 GHz 和 8.08~9.71 GHz,可抑制 WLAN 频段和 X 波段的通信。尽管上述 MIMO 天线在性能方面表现优异,但在保证结构简洁、具备超宽带工作范围及多个陷波特性的同时,实现高隔离度的 MIMO 天线设计依然面临较大挑战。

本文设计了一款适用于超宽带应用的四端口 MIMO 槽天线,能够有效抑制 WiMAX 频段(3.3~3.7 GHz)和 WLAN 频段(5.15~5.825 GHz)的信号干扰。MIMO 天线通过加载十字形隔离枝节实现了高隔离度,天线采用共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 馈电方式,有利于后续集成电路的集成,具有良好的应用前景。

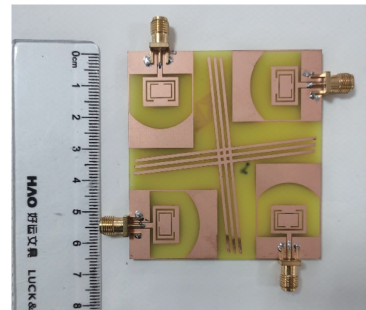
1 天线结构设计

1.1 天线整体结构

本文所提出的天线采用介电常数为 4.4 的 FR4 介质基板,基板厚度为 0.8 mm。天线结构和实物如图 1 所示。天线整体尺寸为 65 mm×65 mm×0.8 mm。天线采用共面波导的方式进行馈电,为了进一步降低天线单元之间的隔离度,将 4 个天线单元正交放置,并加载十字形隔离结构。天线具体尺寸如表 1 所示。



(a) 天线结构
(a) Antenna structure diagram



(b) 天线实物
(b) Antenna prototype photograph

图 1 天线结构和实物

Fig. 1 The antenna structure and physical structure

表 1 天线的尺寸

Table 1 Dimensions of the proposed antenna (mm)

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
65	30	12	7	6.7
W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
1.56	22	9	61.4	3.9

1.2 天线设计过程

图 2 所示为天线的设计过程,天线单元采用槽天线设计,通过在辐射贴片上蚀刻 C 形槽来抑制 WLAN 频段和 WiMAX 频段的干扰,C 形槽的尺寸计算公式如下:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \tag{1}$$

$$f = \frac{c}{2L_c \sqrt{\epsilon_e}} \tag{2}$$

式中: c 为光速; ϵ_e 为有效介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; L_c 为 C 形槽总长度; f 为陷波频段的中心频率。在天线 I 中,天线单元之间正交放置,未添加任何隔离结构。天线 II 在天线 I 的基础上添加了十字形隔离结构。

利用 HFSS 软件对天线进行仿真分析,图 3 所示为天线 I 和天线 II 的 S 参数对比。从图 3(a)可以看出,隔离结构对天线的工作带宽影响不明显。从图 3(b)可以看

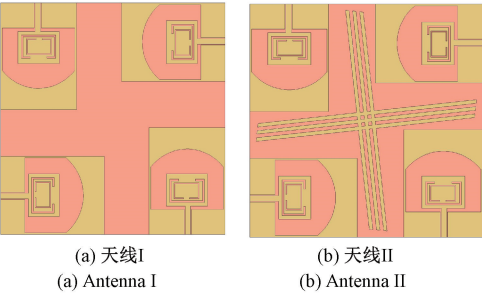


图 2 天线设计过程
Fig. 2 Antenna design process

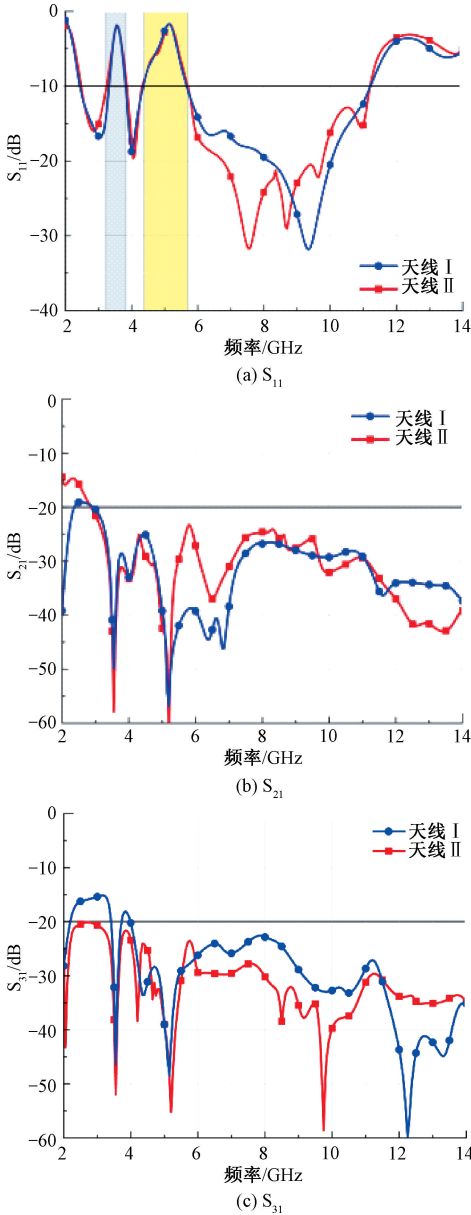


图 3 天线 I 和天线 II 的 S 参数对比
Fig. 3 Comparison of S parameters between antenna I and antenna II

出,在工作频段内,天线 I 和天线 II 的 S_{21} 值均小于 -20 dB。从图 3(c)可以看出,天线 I 的 S_{31} 值在低频处超过 -20 dB,而天线 II 的 S_{31} 值在全频段内均小于 -20 dB。结果表明,添加十字形隔离结构可以有效提高天线隔离度。

图 4 所示为天线 I 和天线 II 在 5.5 GHz 时的表面电流分布图。图 4(a)中,未添加隔离结构的天线 I 隔离效果不理想,大量电流耦合到其他端口。图 4(b)中,添加隔离结构之后,大量电流都集中在隔离结构上,并且其他天线元件的电流显著减小,这表明该隔离结构有良好的隔离效果。

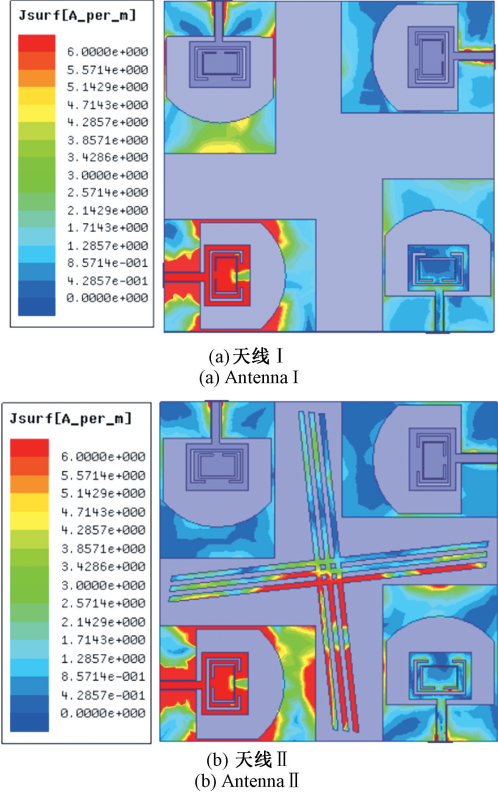


图 4 天线 I 和天线 II 的电流分布
Fig. 4 Current distribution of antenna I and antenna II

2 天线仿真与实测分析

本文采用商用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 19 进行天线的仿真设计和参数优化分析,其次依据模拟和测试结果分析天线的各类参数。

2.1 天线隔离结构分析

天线隔离结构会影响天线的隔离度,对十字形隔离枝节数目进行分析。图 5 所示为不同隔离枝节数对 S 参数的影响。由图 5(a)可知,当隔离枝节数目为 3 时,天线带宽略微向左偏移 0.15 GHz,工作带宽为 $2.45 \sim 11.35$ GHz,仍满足设计要求。枝节数目对天线的 S_{11} 几

乎没有影响。由图 5(b) 可知,当隔离枝节数目为 1 时,天线在 2.2~3.25 GHz 范围内的隔离度小于 20 dB,当隔离枝节数目为 2 时,天线在 2.25~2.75 GHz 范围内的隔离度小于 20 dB,当隔离枝节数目为 3 时,天线在全频段内的 S_{31} 值均小于 -20 dB。

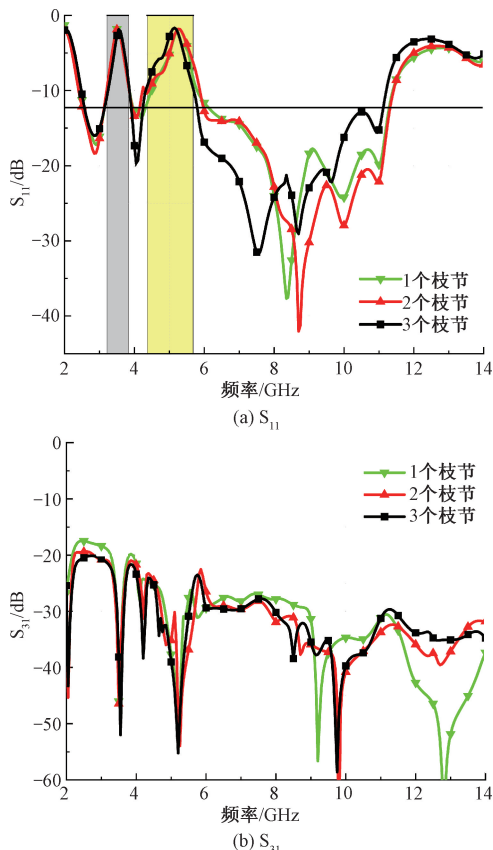


图 5 不同隔离枝节数对 S 参数的影响

Fig. 5 Effect of different number of isolated branches on s parameters

2.2 天线 S 参数

图 6 所示为仿真和实测的 S 参数对比,可以看出,天线的工作带宽为 2.48~11.2 GHz,阻抗匹配较好。该天线有效抑制了 WiMAX 和 WLAN 频段的干扰,陷波频段范围分别为 3.25~3.85 GHz 和 4.32~5.69 GHz。仿真和测量结果有良好的一致性。由图 6(b) 可知,天线的实测隔离度在整个工作频段都高于 20 dB。

2.3 辐射方向图

天线在 3、6 和 9 GHz 的实测与仿真辐射方向图如图 7 所示。该天线 E 面大致呈“8”字形,H 面呈“O”形。从图 7 可以清楚地观察到天线具有良好的辐射性能。当频率较高时,由于介质基板的损耗和不确定的测试环境,辐射方向图出现了轻微的恶化。但是,辐射方向图的总趋势保持不变,天线可以正常发射和接收

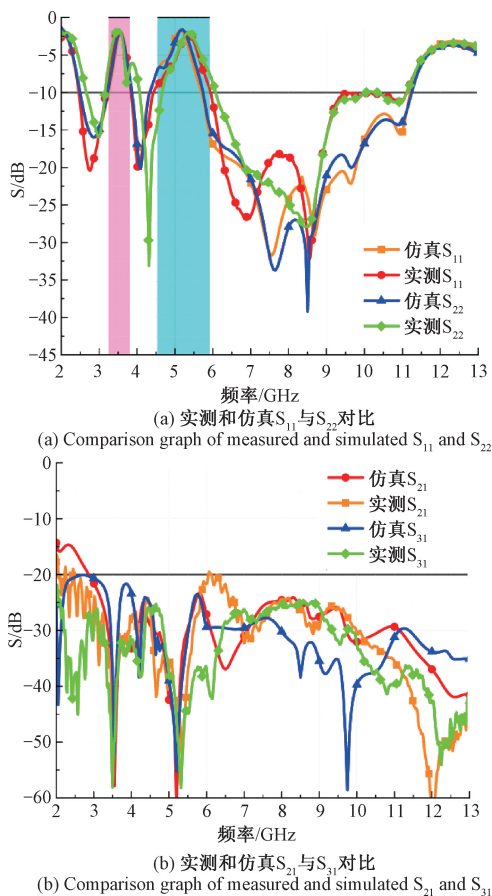


图 6 天线 S 参数仿真与实测对比

Fig. 6 Comparison between simulation and measurement of antenna s parameters

信号。

2.4 天线增益

天线增益图如图 8 所示,天线仿真和实测的增益曲线也显示了该天线的两个陷波特性和两条增益曲线基本趋于一致。在某些频点,由于环境问题和设备损耗,实测增益会略低于仿真增益。

2.5 包络相关系数(ECC)和分集增益(DG)

ECC 通常表示 MIMO 系统中两个天线单元之间的相关性。在实际应用中,ECC 的值一般应小于 0.5。ECC 可通过 S 参数计算,其计算公式如下所示^[20]:

$$ECC = \frac{|S_{ii}^* S_{ij} + S_{ji}^* S_{jj}|^2}{(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ji}|^2)(1 - |S_{jj}|^2 - |S_{ii}|^2)} \quad (3)$$

除了 ECC,DG 也是作为衡量 MIMO 天线性能的一个重要参数,一般要求 DG 的值应大于 9.5,DG 计算公式如下:

$$DG = 10\sqrt{1 - (ECC)^2} \quad (4)$$

图 9 所示为 ECC 与 DG 的仿真与实测结果的对比。

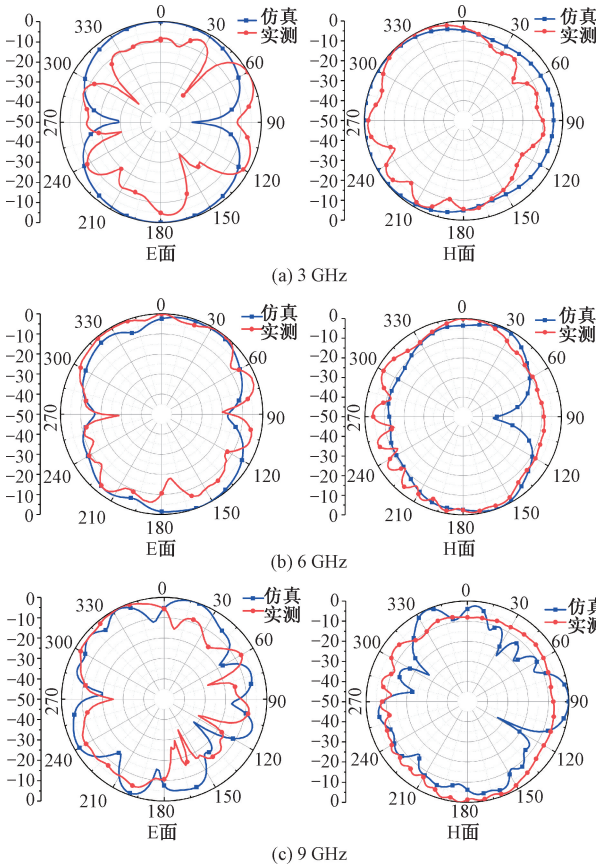


图 7 仿真与实测方向图的比较结果
Fig. 7 Comparison results of simulated and measured patterns

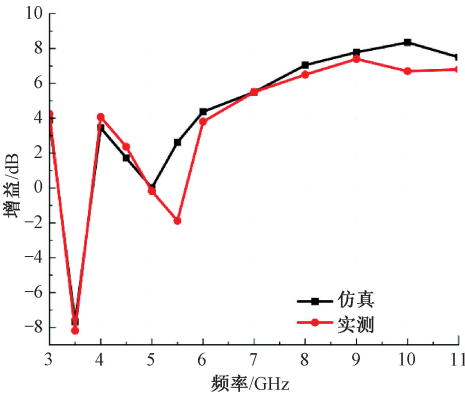


图 8 天线增益仿真与实测对比
Fig. 8 Simulated and measured results of gain

由图 9(a) 可知,在工作频带内,MIMO 天线的实测 ECC 值均小于 0.07,由图 9(b) 可知,DG 在全频段内均高于 9.97,表明该 MIMO 天线元件间的相关性很小,分集性能优异。

2.6 全反射系数(TARC)

TARC 是 MIMO 天线系统中用于衡量天线性能的一

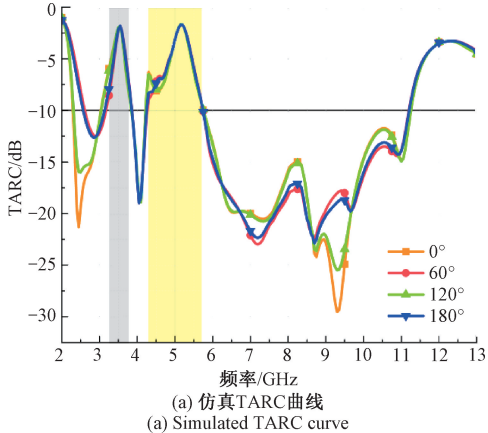


图 9 ECC 和 DG 仿真实测对比
Fig. 9 Simulated and measured results of ECC and DG

个重要指标,评估了天线在不同端口同时激励时的反射特性,可通过 S 参数进行计算,计算公式如下:

$$TARC = N^{-0.5} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left| \sum_{k=1}^N S_{ik} e^{j\theta_{k-1}} \right|^2} \quad (5)$$

式中: θ 为激励相位角。本文选取 0° 、 60° 、 120° 和 180° 4 个相位研究 MIMO 天线的特性。图 10 所示为天线的 TARC 仿真和实测曲线,从图 10 可以看出,在工作频段内的 TARC 值均在 -10 dB 以下,显示出该 MIMO 天线良好的性能。



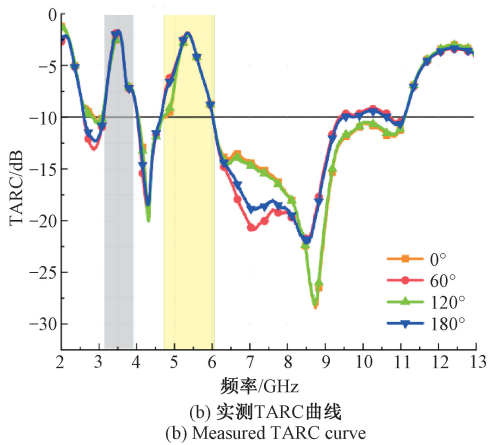


图 10 TARC 仿真和实测曲线

Fig. 10 Simulated and measured results of TARC

3 天线性能比较

表 2 为本文所提出的天线与文献[2,12-15]的天线性能对比。由表可见,本文设计的四端口 MIMO 天线采用 CPW 的方式进行馈电,并具有较高的隔离度,能够抑制 WiMAX 和 WLAN 频段的干扰,在超宽带天线系统中具有广阔的应用前景。

表 2 天线与其他设计性能对比

Table 2 Comparison of antenna performance parameters					
天线	端口数目	馈电方式	频段/GHz	陷波数量	隔离度/dB
文献[2]	2	侧馈	2.8~15 (137%)	1	>20
文献[12]	2	侧馈	2.9~18 (144%)	1	>18
文献[13]	2	侧馈	3.1~14 (127%)	1	>23
文献[14]	4	CPW	2.64~10.6 (120%)	1	>20
文献[15]	4	CPW	3.6~18 (133%)	1	>15
本文	4	CPW	2.48~11.2 (127%)	2	>20

4 结 论

本文提出了一种具有双陷波特性的 高隔离超宽带四元 MIMO 天线,对天线的设计过程、表面电流进行了仿真

分析。天线的实测工作频段为 2.48~11.2 GHz,陷波频段为 3.25~3.85 GHz 和 4.32~5.69 GHz,可有效抑制 WiMAX 和 WLAN 频段的干扰信号。在工作频段内天线的隔离度大于 20 dB,ECC 值小于 0.07,DG 大于 9.97。该天线在抑制 WiMAX 频段和 WLAN 频段的超宽带 MIMO 通信系统中具有良好的应用前景。

参考文献

[1] DKIOUAK A, EL OUAHABI M, CHAKKOR S, et al. High performance UWB MIMO antenna by using neutralization line technique [J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2023, 131: 185-195.

[2] SALEEM S, KUMARI S, MIRDHA V, et al. Circular split ring resonator (SRR) slot and ground stub based slotted circular ultra-wideband MIMO antenna with WLAN band exclusion and high isolation performance [J]. Sādhanā, 2024, 49(1): 1-8.

[3] ADDEPALLI T, RANI C J, NIMMAGADDA P, et al. Design and analysis of UWB antenna with triple band notched characteristics verified with TCM analysis [J]. Wireless Personal Communications, 2024, 134: 1641-1664.

[4] EL-GENDY M S, ALI M M M, THOMPSON E B, et al. Triple-band notched ultra wideband microstrip MIMO antenna with bluetooth band [J]. Sensors, 2023, 23(9): 4475.

[5] HEMALATHA T, ROY B. Low-profile CO-CSRR and EBG loaded tri-quarter circular patch EWB MIMO antenna with multiple notch bands [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2024, 5(3): 634-643.

[6] KUMAR P, ALI T, PATHAN S, et al. A quad port dual band notch UWB MIMO antenna using hybrid decoupling structure [J]. Results in Engineering, 2024, 23: 102551.

[7] KAPURE V R, RATHOD S S. A two element EBG-inspired UWB MIMO antenna with triple band notched characteristics and high isolation [J]. Sādhanā, 2023, 48(1): 1-16.

[8] ALAZEMI A J, ALSALEH Y T. An ultrawideband antenna with two independently tunable notch bands [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 79: 402-410.

[9] BASIR S, ALIMGEER K S, A GHOURI S, et al. MIMO antenna with notches for UWB system (MANUS) [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2022,

DOI:10.1155/2022/4870661.

- [10] 南敬昌, 潘俊汝, 高明明, 等. 具有高隔离度的紧凑型三陷波 UWB MIMO 天线设计[J]. 电波科学学报, 2023, 38(6): 1105-1114.

NAN J CH, PAN J R, GAO M M, et, al. Compact triple trap UWB-MIMO antenna design with high isolation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38 (6): 1105-1114.

- [11] BANTUPALLI P, GIMMADI S, SHAIK A S. Design of UWB antenna with band rejection characteristics using EBG structures [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 2025, 106: 103-111.

- [12] KAREEMULLA S, KUMAR V. Diversity performance of band notched ultra-wideband MIMO antenna[J]. Optik, 2023, 272: 170128.

- [13] AWAIS M, BASHIR S, KHAN A, et al. A novel compact highly isolated UWB MIMO antenna with WLAN notch [J]. Computers, Materials & Continua, 2023, 75(1): 669-681.

- [14] 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.

- [15] AGGARWAL I, PANDEY S, TRIPATHY M R, et al. A super wideband MIMO antenna with metamaterial superstrate for gain enhancement at WLAN frequency band [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2023, 14(Suppl 2): 643-658.

- [16] PUNNA B, MUTHUSAMY P. Compact fractal based UWB MIMO antenna with dual band dispensation[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2022, 112(3): 485-494.

- [17] 张范然, 杨福慧, 李运胜, 等. 基于 5G 与 WiFi 6E 应用的三频 MIMO 天线设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(4): 114-121.

ZHANG F R, YANG F H, LI Y SH, et, al. Design of tri-band MIMO antenna based on 5G and WiFi 6E applications[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(4): 114-121.

- [18] 南敬昌, 苏东蕊, 高明明, 等. 应用 SRR/CSRR 去耦的毫米波 MIMO 天线[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 195-202.

NAN J CH, SU D R, GAO M M, et al. Millimeter-wave MIMO antenna applying SRR/ CSRR decoupling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 195-202.

- [19] 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.

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.

- [20] ALSATH M G N, KANAGASABAI M. Compact UWB monopole antenna for automotive communications [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63(9): 4204-4208.

作者简介



杨福慧, 1995 年于西安电子科技大学获得学士学位和 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 his 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.



李运胜, 2000 年于上海理工大学获得学士学位, 现为中电科微波通信(上海)股份有限公司总经理, 主要研究方向包括机械结构设计及工艺技术。

E-mail: liyunsheng@waveguide.com.cn

Li Yunsheng received his B. Sc. degree from the University of Shanghai for Science and Technology in 2000. Now he is the general manager of CETC Shanghai Microwave Communication Co. Ltd. His main research interests include mechanical structure design and technological design.



印小忠, 2004 年毕业于上海电力大学。现为中电科微波通信(上海)股份有限公司副总经理, 主要研究方向包括天线结构设计及工艺技术。

E-mail: yinxiaozhong@waveguide.com.cn

Yin Xiaozhong graduated from Shanghai University of

Electric Power in 2004. Now he is the vice general manager of CETC Shanghai Microwave Communication Co. Ltd. His main research interests include antenna structure design and antenna technological design.



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 interests include multiband MIMO antenna.

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



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.

杜成珠 (通信作者), 1995 年于西安电子科技大学获得学士学位, 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。