

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205841

CPW 馈电的高隔离度一阻带 UWB-MIMO 天线设计^{*}

李碧珂¹ 杜成珠¹ 杨福慧² 杨志鹏¹ 程启明¹
(1. 上海电力大学 上海 200082; 2. 中电科微波通信(上海)有限公司 上海 200000)

摘 要:针对目前超宽带多输入多输出 (ultra wideband multiple-input multiple, UWB-MIMO) 天线仍存在的尺寸大、端口隔离不够高、抗干扰能力弱等缺陷,设计了一款使用共面波导馈电 (coplanar waveguide feed, CPW) 馈电的小型化具有陷波特性的 UWB-MIMO 缝隙天线,通过将方形辐射贴片切角来拓宽带宽,两天线单元地板互联,并在天线单元间增加栅栏形解耦枝节来提高天线的隔离度。天线尺寸仅为 30 mm×56 mm×0.8 mm。此外,在方形辐射贴片上刻蚀了开口谐振环 (split ring resonator, SSR) 结构的 C 形槽,可滤除 WLAN 频段信号 (5.15~5.85 GHz) 对 UWB 系统的干扰。天线的实测结果表明,该天线工作频段为 2.73~10.71 GHz,端口隔离度小于-20 dB,包络相关系数 ECC<0.01。实验结果表明该天线适用于 UWB-MIMO 通信系统。

关键词: 超宽带天线;共面波导馈电;缝隙天线;陷波;MIMO 天线;栅栏形枝节;小型化

中图分类号: TN822^{+.8} **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Design of high isolation single band-notch UWB-MIMO antenna with coplanar waveguide feed

Li Bike¹ Du Chengzhu¹ Yang Fuhui² Yang Zhipeng¹ Cheng Qiming¹
(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China;
2. CETC Shanghai Microwave Communication Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: In order to improve the defect of UWB-MIMO antenna, such as large size, insufficient port isolation and weak anti-interference ability, a miniaturized UWB-MIMO slot antenna with notch characteristics fed by coplanar waveguide (CPW) is proposed, which cutting the square radiation patch to broaden the bandwidth, by connecting the two antenna unit coplanar ground and adding fence shaped decoupling branches between the antenna units, the isolation of the antenna is improved. The antenna size is only 30 mm×56 mm×0.8 mm. In addition, a C-slot open resonator ring (SSR) structure is etched on the square radiation patch to filter the interference of WLAN band signals (5.15~5.85 GHz) to the UWB system. The measured results of the antenna show that the working frequency band of the antenna is 2.73~10.71 GHz, the port isolation is less than-20 dB, and the envelope correlation coefficient ECC is less than 0.01. It shows that the antenna is suitable for UWB-MIMO communication system.

Keywords: ultra wideband antenna; coplanar waveguide feed; slot antenna; notch; MIMO antenna; fence-shaped branches; miniaturization

0 引言

伴随现代无线通信的迅速发展,与之而来的是通信系统中天线的频谱资源紧缺,对宽带天线的需求越来越

大^[1-2]。UWB 技术,在 2002 年美国联邦通信委员会 (FCC) 规定其民用频带为 3.1~10.6 GHz 后,超宽带技术的应用广泛的普及在民用、商业等领域中^[3],超宽带天线具有传输速率高、带宽极宽、信道容量大、功耗低及抗干扰能力强等特点。^[4]

多输入多输出 (MIMO) 技术是通过在信号收发端使用多个天线进而在多个信道上传输数据,极大程度上提升了信道容量和分集性能^[5],在 MIMO 通信系统中,因使用了多天线,单元间的互相耦合会严重影响 MIMO 天线性能,单元间距离越近影响越大,同时各天线的结构、数量等都会对天线互耦产生巨大影响。近年来学者们将 MIMO 技术与 UWB 技术进行结合,即 UWB-MIMO 技术并能提高通信系统的传输速率和信道容量^[6-7]。在 UWB-MIMO 天线中增加陷波特性和超宽带 MIMO 天线具有滤除其他干扰信号的能力^[8]。超宽带 MIMO 天线中常用天线解耦方法通常有在天线辐射单元间增加隔离枝节、中和线和缺陷地等方法。文献[9]天线利用正面和背面添加的相同“H”形隔离枝节来减小天线耦合;文献[10]通过天线平面中心添加两条相互垂直的矩形空心枝节抑制从端口 1 流入端口 2 的耦合电流,从而达到降低耦合的目的;文献[11-12]利用中和线技术来减少天线的互耦。天线陷波特性的实现方法通常是在辐射贴片上开槽或增加寄生枝节。文献[13]的 UWB-MIMO 天线,在辐射贴片内加载“C”型枝节来抑制 X 波段信号对 UWB 的干扰;文献[14]通过在天线贴片上刻蚀的“C”形槽来实现陷波特性和,使天线可抑制 WLAN 信号。前面研究的天线基本能单独实现高隔离度^[15-16]或陷波特性,但要在实现小型化^[17]并具有陷波特性的前提下同时提高 UWB-MIMO 天线的隔离度仍比较困难^[18-20]。

基于以上研究背景,本文设计了一款使用共面波导 (CPW) 馈电的具有陷波特性的超小型化 UWB-MIMO 天线。该 MIMO 天线由两个平行放置的单元天线组成。与常规微带线馈电方式相比,采用 CPW 馈电的微带天线具有易于与其他微波器件集成的优点。将单元天线共面地相连使得两天线单元等电位,并通过在两单元间加载栅栏枝节来提高端口隔离度。且在贴片上刻蚀开口谐振环结构(C 形槽)实现了天线的陷波特。天线的实测带宽为 2.73~10.71 GHz(119%),陷波频率为 4.94~6.01 GHz,隔离度小于-20 dB。

1 天线结构设计

设计的天线使用 FR4 介质基板构成,介电常数和厚度分别为 4.4 和 0.8 mm。天线基本结构如图 1 所示,矩形基板上印刷有两个平行放置的单元天线、共面波导馈电、栅栏形解耦枝节和 C 形槽。具体如表 1 所示。

天线的设计演化流程如图 2 所示。首先将两个单元天线平行放置,通过调节天线辐射贴片大小 w_2 、馈线宽度 w_f 和共面地与馈线间的距离 g ,并对矩形贴片进行切

角来拓宽天线的带宽,使天线 I 的工作带宽可覆盖 3.1~10.6 GHz;另外,在连接共面地的地板处开矩形槽使天线 I 的隔离度实现全频段小于-15 dB 且部分频带小于-20 dB。其次在天线贴片上刻蚀总长约为陷波频率中心的 1/4 波长的 C 形缝隙并调整其总长度 c ,使天线 II 的陷波频率覆盖 WLAN 频段。最后,为提高天线间端口隔离度,在两单元天线间增加栅栏形解耦枝节,使得天线 III 端口隔离达到-20 dB。

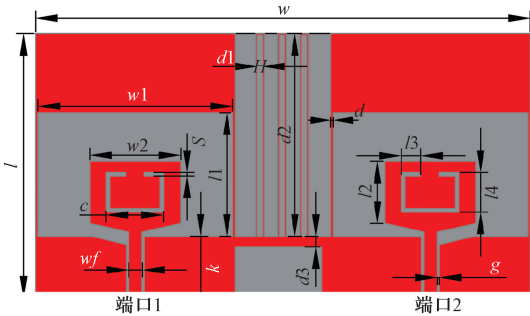


图 1 天线结构模型
Fig. 1 Structural model of the antenna

表 1 天线结构尺寸表			
Table 1 The size table of antenna structure mm			
参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
l	30	d	0.3
w	56	$d1$	0.6
$l1$	14	$d2$	23
$w1$	22	$d3$	5.8
$l2$	7	wf	1.5
$w2$	10.3	k	7
c	6.5	s	0.4
g	0.3	$l3$	2.2

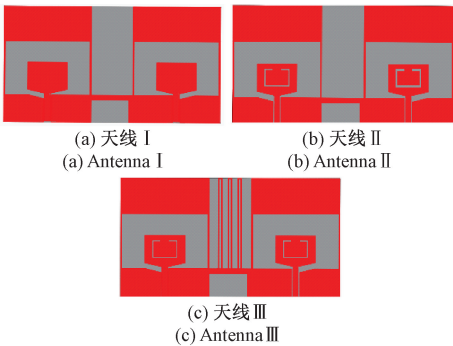


图 2 天线的演化流程
Fig. 2 The evolutionary process of antennas

根据演化过程并对其优化分析,加工出的天线实物如图 3 所示。

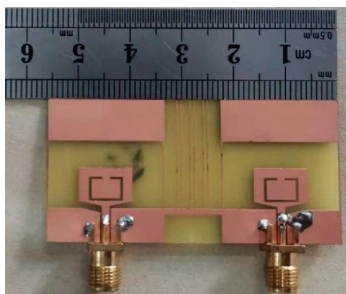


图 3 天线实物图

Fig. 3 Physical image of the antenna

2 天线分析与实验结果

设计天线及其仿真优化是在电磁仿真软件 ANSYS Electronics 2016 上进行的,并优化了天线的基本结构尺寸等参数,还对天线的 C 形缝隙总长度和栅栏形枝节对天线性能的影响进行了分析。然后对比了天线电性能的仿真与实测。最后对天线电性能的仿真与实测值进行了对比。

2.1 天线结构分析

1) C 形缝隙长度对天线的性能影响分析

天线 II 的陷波功能是通过在辐射贴片上刻蚀 C 形槽来实现的,C 形槽的总长约为所设计的陷波频率中心的 1/4 波长,具体计算公式如式(1)和(2)所示:

$$L_c = \frac{C}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

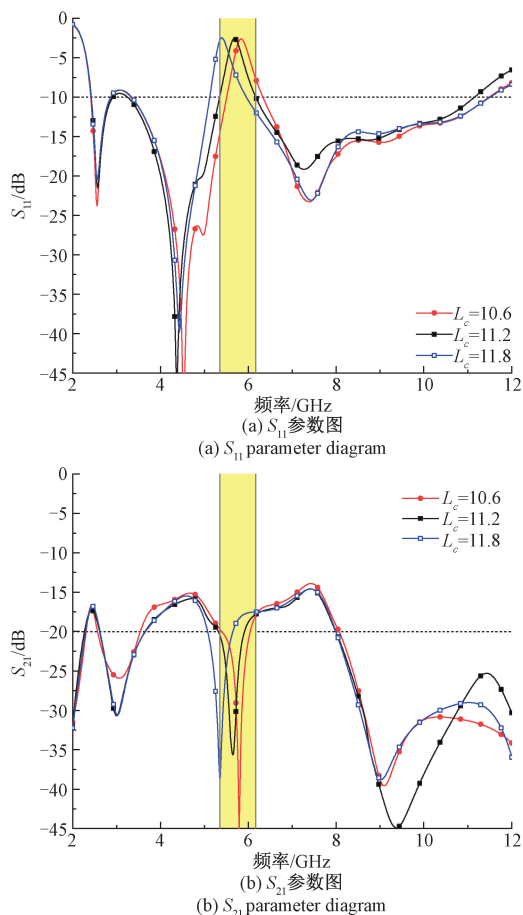
$$\epsilon_{eff} \approx \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} \quad (2)$$

其中, L_c 为 C 形槽长度; ϵ_{eff} 为有效介电常数; ϵ_r 为介质基板介电常数。

图 4 为天线 II 的 C 形槽总长 L_c 对天线 S 参数的影响图,图 4(a) 表明 C 形槽的总长度影响陷波的中心频率, L_c 越长,陷波中心频率越往低频偏移,但图 4(b) 表明其对隔离度的影响并不明显。 L_c 的最终优化值为 11.2 mm。

2) 栅栏形解耦枝节对天线性能影响分析

MIMO 天线设计中的端口隔离度 S_{21} 是衡量单元天线间耦合程度的重要指标。设计的天线通过添加栅栏形枝节来减小天线单元间的耦合,实现了高隔离度。前文分析天线 II 的 S_{21} 虽能满足小于 -15 dB 的指标,但这表明天线单元间仍存在耦合,需继续改进。于是在天线 II 基础上,使用中和线技术在辐射单元间添加栅栏形去耦枝节以减小单元间的耦合电流。图 5 是天线 II 与天线 III 的 S 参数比较。如图 5 所示,在加载了栅栏形枝节的情况下,天线 III 的 S_{11} 略有偏移但总趋势变化不大,仍能满足需求;而 S_{21} 值在 4~8 GHz 处明显减低,最终其在全频

图 4 C 形槽总长度 L_c 对 S 参数的影响Fig. 4 S-parameters for the overall length L_c of the C-slot

段均小于 -20 dB 且大部分频段能达到 -25 dB,表明该 MIMO 天线具有良好的端口隔离度。

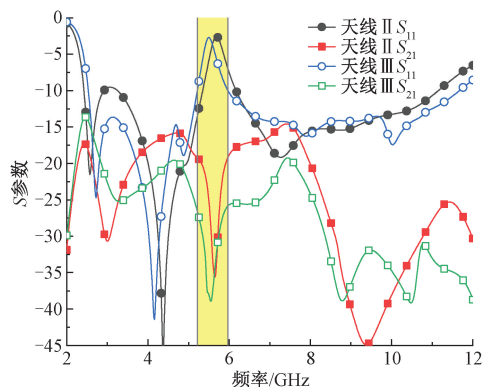


图 5 天线 II 与天线 III 的 S 参数比较

Fig. 5 Comparison of S-parameters of antenna II and antenna III

图 6 为天线 II 和天线 III 的表面电流分布图,(端口 1 为信号激励端,端口 2 接入 50 Ω 负载)。由图 6(a) 可知,对于未加上隔离枝节的天线 II,当端口 1 中加载激励

信号时,会有较多的电流通过耦合出现在了端口 2 附近,严重影响了 MIMO 系统性能。图 6(b)中的天线Ⅲ为添加了栅栏形枝节的 MIMO 天线,当端口 1 中加载激励信号时,栅栏结构限制了大量耦合电流,端口 2 附近的耦合电流有了明显降低。

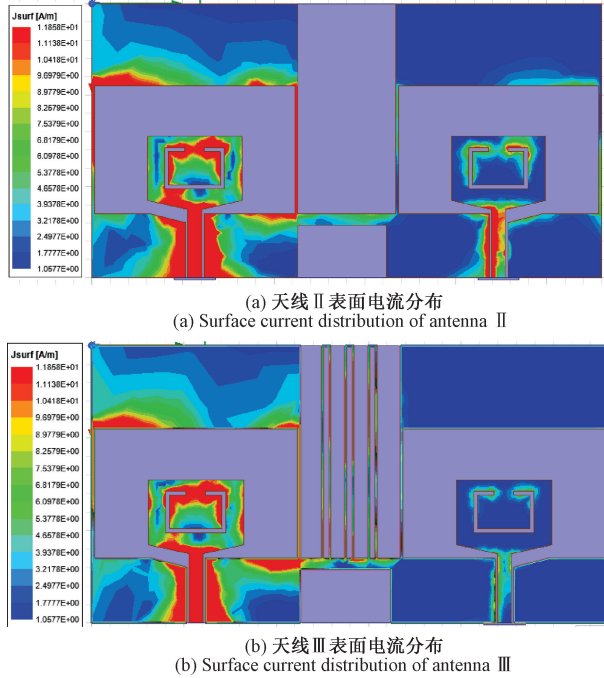


图 6 天线Ⅱ与天线Ⅲ的表面电流分布

Fig. 6 Surface current distribution of antenna II and antenna III

2.2 S 参数

图 7 将天线的 S 参数仿真与实测结果进行了比较。其中图 7(a)是天线 S_{11} 曲线对比图,仿真的天线工作带宽在 2.5~11.8 GHz,而实际测试的天线带宽为 2.73~10.71 GHz,符合 UWB 通信,陷波频段处实测值在 4.94~6.01 GHz 虽满足 WLAN 频段的陷波特性,但与仿真结果有些偏移。图 7(b)是天线 S_{21} 曲线对比图,结果显示 S_{21} 的实测与仿真结果较为一致,在 4~6 GHz 处下降趋势最为明显,最大值能达到 -45 dB。天线 S 参数仿真值与实测值有些小差别。通过进一步误差分析,微波频段,天线加工精度和 SMA 头的焊接是影响天线性能的主要原因。最终实测结果表明,天线在 2.1~12 GHz 内隔离度小于 -20 dB,说明天线在工作频段内具有良好的端口隔离度。

2.3 辐射方向图

辐射方向图是评估天线辐射性能的指标,图 8 为天线分别在 3.5、7 和 9 GHz 频点处 EH 面方向图的仿真与实测图(端口 1 处接入信号输入端,端口 2 处接 50 Ω 负载)。据图 8,天线的 E 面方向图呈现“8”字形,天线的 H 面方向图呈现“O”字形,表明 UWB-MIMO 天线系统的辐

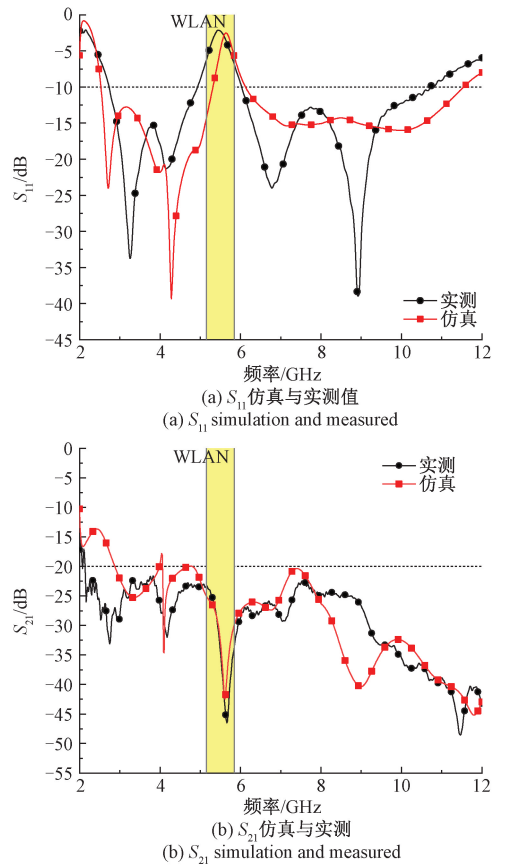


图 7 S 参数仿真与实测比较

Fig. 7 Comparison of S-parameter simulation and actual measurement

射性能良好。

2.4 ECC 和 DG 曲线图

包络相关系数(ECC)是 MIMO 天线信道相关程度的度量,可由式(3)计算。

$$ECC =$$

$$\frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (3)$$

基于天线的远场测试数据,由式(4)可计算更精确的 ECC 数值:

$$\rho_{eij} = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (XPR \cdot E_{\theta i} \cdot E_{\theta j}^* \cdot P_\theta + E_{\varphi i} \cdot E_{\varphi j}^* \cdot P_\varphi) d\Omega \right|}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (XPR \cdot E_{\theta i} \cdot E_{\theta i}^* \cdot P_\theta + E_{\varphi i} \cdot E_{\varphi i}^* \cdot P_\varphi) d\Omega} \times \frac{1}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (XPR \cdot E_{\theta j} \cdot E_{\theta j}^* \cdot P_\theta + E_{\varphi j} \cdot E_{\varphi j}^* \cdot P_\varphi) d\Omega} \quad (4)$$

其中, XPR 为交叉极化比; P 是入射波的角密度函数; E 是辐射远场的复合包络; Ω 是球面坐标的立体角^[8]。

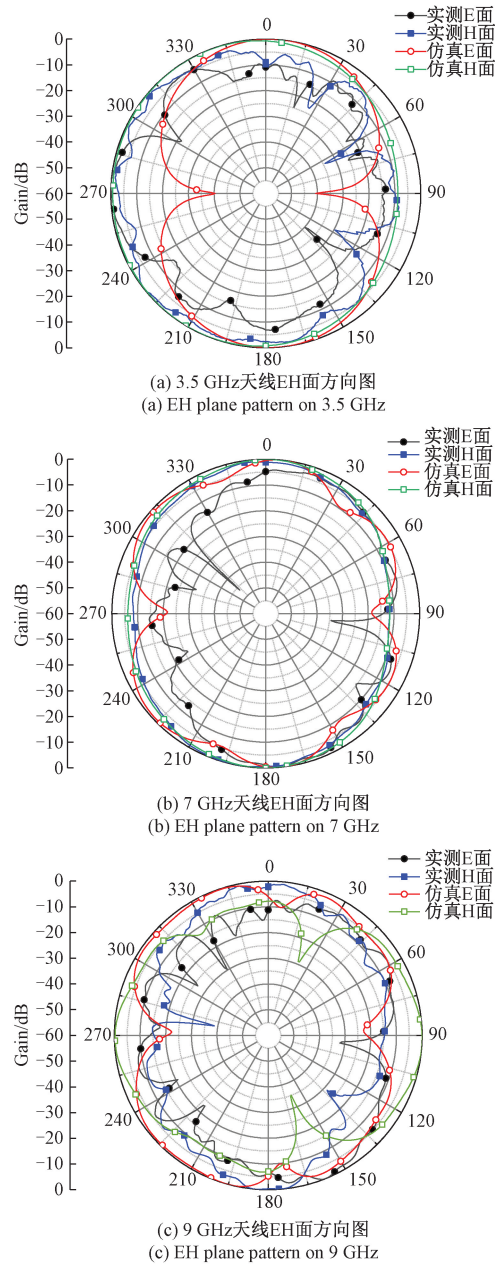


图 8 天线辐射方向图的仿真与实测图
Fig. 8 Simulation and measurement of the radiation pattern of antenna

分集增益 (diversity gain, DG) 是另一评估 MIMO 系统的分集性能指标,可由式 (5) 计算:

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

图 9(a) 和 (b) 为天线的 ECC 和 DG 的仿真实测图,由图 9 可知天线在超宽带频段内能满足 $ECC < 0.01$, $DG > 9.9$,符合 MIMO 天线设计对 ECC 和 DG 的要求,说明天线单元收发信号的能力强,MIMO 天线的信道独立程度较高。

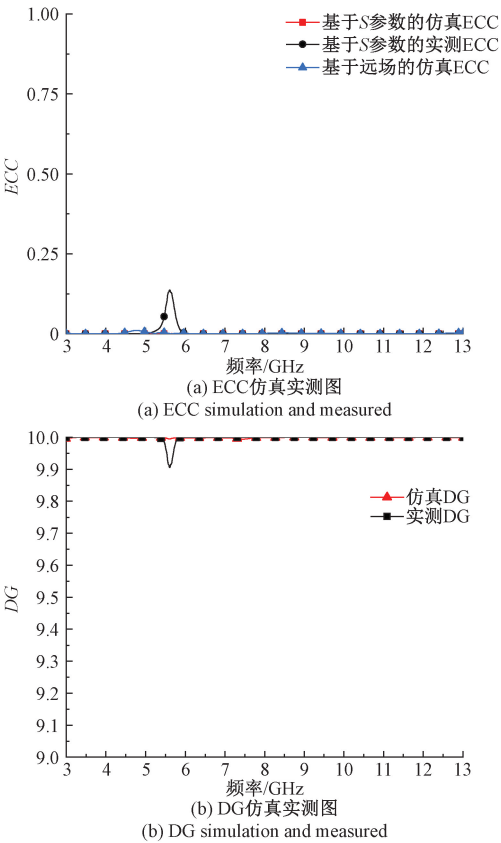


图 9 天线的 ECC 和 DG 仿真实测图
Fig. 9 Simulation and measurement diagram of antenna ECC and DG

2.5 增益

天线增益是一用来评估天线在某方向上辐射能力强度的重要指标。图 10 所示为天线增益的实测与仿真对比,MIMO 天线增益的实测值与仿真曲线变化趋势基本一致。天线实测最大增益为 6.98 dB,并且在陷波频段处能观察到明显的增益下降趋势。

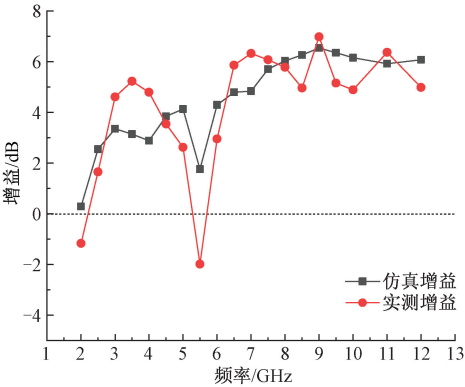


图 10 实测与仿真的增益结果
Fig. 10 Measured and simulated gain results

3 UWB-MIMO 天线性能参数比较

在表 2 中,将设计的天线与近些年来已发表文献中 UWB-MIMO 天线的性能进行了比较,对天线尺寸、馈电形式、带宽、隔离度、陷波带宽、包络相关系数、端口数、极化方式和峰值增益等参数进行对比。与文献[8]、[13]、

[14]相比,该天线使用了共面馈电的方式并在较宽的带宽内有较高的隔离度,共面馈电的方式使天线容易应用于集成电路中。与文献[15]、[18]相比,该天线具有更高的隔离度并且具备陷波功能。与文献[21]相比,该天线具有在较宽的工作带宽、更高的隔离度及较小的尺寸的优点。

表 2 UWB-MIMO 天线性能参数比较
Table 2 UWB-MIMO antenna performance parameters comparison

文献	天线尺寸	馈电方式	工作带宽/GHz	隔离度/dB	陷波带宽/GHz	包络相关系数	端口数	极化方式	峰值增益/dBi
[8]	35 mm×20.6 mm	侧馈	2~18	>15	5.725~5.875	<0.2	2	线极化	5.2
[13]	41 mm×25 mm	侧馈	3.1~12	>20	7.0~7.9	<0.006	2	线极化	7.0
[14]	46 mm×46 mm	侧馈	2.95~11.2	>20	5.15~5.85	<0.02	2	线极化	6.0
[15]	45 mm×45 mm	共面馈电	3~12	>17	—	<0.02	2	线极化	2.5
[16]	120 mm×60 mm	共面馈电	3.1~12.7	>15	—	<0.19	2	线极化	3.98
[21]	50 mm×50 mm	共面馈电	3.1~10.6	>15	5~6	<0.01	2	线极化	6.0
本文	30 mm×56 mm	共面馈电	2.73~10.71	>20,部分 25	4.94~6.01	<0.01	2	线极化	6.98

4 结 论

经由仿真优化,设计了一种使用共面波导馈电的高隔离度一阻带 UWB-MIMO 天线,该天线由两平行放置的矩形槽单元天线、共面波导馈线和栅栏形枝节组成。通过添加与共面地相连的栅栏形枝节,从而提高了天线的隔离度,并在辐射贴片上刻蚀 C 形槽来实现陷波特性的。实测结果表明天线的工作频段为 2.73~10.71 GHz,在 4.94~6.01 GHz 处实现了陷波特性,可抑制 WLAN 信号的干扰,并且全频段内的隔离度均大于 20 dB。天线的 ECC 小于 0.01,同时分集增益 DG 大于 9.9,表明天线具有良好的分集性能。天线实测最大增益为 6.98 dB。该天线适用于超宽带 MIMO 通信系统。

参考文献

[1] 叶敏杰,张玉龙,吴次南,等. 面向未来移动通信的可调谐双频 PIFA 天线[J]. 传感技术学报, 2019, 32(2): 327-331.
YE M J, ZHANG Y L, WU C N, et al. Tunable dual-band planar inverted-F antenna for future mobile communication [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(2): 327-331.
[2] 王涵,徐凌伟,廖建庆,等. 多天线无线传感器移动通信网络的物理层安全性能[J]. 传感技术学报, 2019, 32(2): 304-308.
WANG H, XU L W, LIAO J Q, et al. Physical layer security performance analysis of multi-antenna wireless sensor mobile communication network [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(2):

304-308.
[3] 吴艳杰,龙云亮. 一种小型化超宽带 MIMO 天线设计[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 421-425.
WU Y J, LONG Y L. A design of compact ultra wide band MIMO antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(3): 421-425.
[4] 刘振. 超宽带陷波天线的研究与设计[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
LIU ZH. Research and design of ultra-wideband band-notch antenna [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
[5] 陈执戡. 小型化超宽带 MIMO 天线的研究与实现[D]. 成都:电子科技大学,2020.
CHENG ZH J. Design and application of compact UWB MIMO antennas [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
[6] YANG D G, KIM D O, KIM C Y. Design of dual-band MIMO monopole antenna with high isolation using slotted CSSRR for WLAN [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(10): 2252-2257.
[7] 徐家铭,杜成珠,郭敏. 一种 CPW 馈电的高隔离度超宽带 MIMO 天线设计[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(11): 79-84.
XU J M, DU CH ZH, GUO M. High isolation ultra-wideband multiple-input-multiple-output antenna with coplanar wave guide feed [J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(11): 79-84.
[8] 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]. *Microwave Journal*, 2021, 37(S1): 52-55.
- [9] 南敬昌, 王明寰, 王宛, 等. 采用阶梯形微带馈线的高隔离度超宽带 MIMO 天线 [J]. *微波学报*, 2021, 37(3): 6-9, 46.
- NAN J CH, WANG M H, WANG W, et al. High isolation ultra-wideband MIMO antenna using stepped microstrip feeder [J]. *Microwave Journal*, 2021, 37(3): 6-9, 46.
- [10] AZARM B, NOURINIA J, GHOBADI C, et al. A compact WiMAX band-notched UWB-MIMO antenna with high isolation [J]. *Radio Engineering*, 2018, 27(4): 983-989.
- [11] TIWARI R N, SINGH P, KANUAUJIA B K. A compact UWB MIMO antenna with neutralization line for WLAN/ISM/mobile applications [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(11): 1-9.
- [12] ZHANG S, PEDERSEN G F. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 166-169.
- [13] 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, SON Y, NAN J CH, et al. Research of a compact UWB-MIMO antenna with X band-rejected [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(1): 149-156.
- [14] 邓永云, 代喜望, 罗国清. 一种陷波超宽带 MIMO 天线设计 [J]. *电波科学学报*, 2018, 33(4): 436-440.
- DENG Y Y, DAI X W, LUO G Q. Design of a compact ultra wide band MIMO antenna wit WLAN band-rejected [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, 33(4): 436-440.
- [15] SRIVASTAVA G, KANUIJIA B, PAULUS R. UWB MIMO antenna with common radiator [J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2017, 9(3): 573-580.
- [16] ZHAO X, RIAZ S, GENG S. A reconfigurable MIMO/UWB MIMO antenna for cognitive radio applications [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 46739-46747.
- [17] 陈鸿海, 孙学良, 赵鹤鸣, 等. 高增益蓝牙天线的设计与应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 197-206.
- CHENG H H, SUN X L, ZHAO H M, et al. Design and application of high gain Bluetooth antenna [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(2): 197-206.
- [18] RAJKUMAR S, ANTO AMALA A, SELVAN K T. Isolation improvement of UWB MIMO antenna utilising molecule fractal structure [J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(10): 576-579.
- [19] CHEN Z, ZHOU W, HONG J. A miniaturized MIMO antenna with triple band-notched characteristics for UWB applications [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 63646-63655.
- [20] DU CH Z, WANG X, JIN G Y. A compact triband flexible mimo antenna based on liquid crystal polymer for wearable applications [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2021, 102: 217-232.
- [21] 裴玺, 陈进, 崔玉家, 等. 具有带阻性能的新型超宽带带分集天线 [J]. *电子元件与材料*, 2014, 33(3): 62-65.
- PEI X, CHEN J, CUI Y J, et al. A novel CPW-fed band-notched UWB diversity antenna [J]. *Electronic Components and Materials*, 2014, 33(3): 62-65.

作者简介



李碧珂, 2020 年于湖南工程学院获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为高隔离度多输入多输出天线和超宽带天线。

E-mail: 1204078320@qq.com

Li Bike received his B. Sc. degree from Hunan Institute of Engineering in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Shanghai University of Electric Power. His main research interests include high isolation MIMO antenna and ultra wideband antenna.



杜成珠 (通信作者), 于 1995 年、2003 年和 2012 年分别获得西电大学学士学位、南京邮电大学硕士学位和上海大学博士学位。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、多频带和宽带天线以及 MIMO 技术。

E-mail: duchengzhu@163.com

Du Chengzhu (Corresponding author) received the B. Sc. degree from the Xidian University, M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications and Ph. D degree from Shanghai University, in 1995, 2003, and 2012. Now she is currently 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.