

# 基于HFSS的五陷波四端口超宽带天线的设计

杨萍<sup>1</sup>, 王代强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>贵州民族大学物理与机电工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年5月18日; 录用日期: 2023年7月10日; 发布日期: 2023年7月17日

## 摘要

针对超宽带(ultra wide band, UWB)多输入输出(multiple-input multiple-output, MIMO)天线存在陷波数量少, 尺寸较大及隔离度不高等缺陷, 提出了一种具有五陷波的四端口超宽带天线。天线采用共面波导馈电(co-planar waveguide feed, CPW), 由葫芦型辐射贴片、缺陷接地面和解耦结构共同组成, 工作带宽为3.06~10.6 GHz。通过蚀刻两个帽子型槽、一个圆底烧瓶型槽和一对缺口类C型槽, 以及在馈线两侧添加一对C型寄生贴片, 实现包括全球微波接入互联(world interoperability for microwave access, WIMAX)波段(3.3~3.6 GHz)、国际移动通信系统(IMT-2020 (5G))通信波段(4.84~4.98 GHz)、WLAN部分频段(5.725~5.825 GHz)、X下行波段(7.25~7.75 GHz)和X上行波段(7.9~8.4 GHz)在内的五个陷波。经过仿真与实测的对比, 天线在通信频段内存在五个陷波频段, 实测值存在频偏等现象, 但隔离度、包络相关系数(envelope correlation coefficient, ECC)和分集增益(diversity gain, DG)等性能指标均符合要求。

## 关键词

超宽带, 多端口, 五陷波, C型谐振器, 天线, 隔离度

# Design of a Quad-Port UWB Antenna with Five Notch on HFSS

Ping Yang<sup>1</sup>, Daiqiang Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Big Date and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>School of Physics and Mechatronic Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang Guizhou

Received: May 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 10<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 17<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

A quad-port ultra wide band (UWB) antenna with five notch is proposed. The proposed antenna is

arranged to solve the defects of a small number of notch, large size, and low isolation in UWB-MIMO antennas. The antenna is fed by co-planar wave guide (CPW) and composed of a calabash-shaped radiation patch, a defective ground plane and a decoupling structure. The antenna operates in the range of 3.06~10.6 GHz. By etching two hat-shaped slots, a round-bottomed-flask-shaped slot, and a pair of C-shaped slots with notch, as well as adding a pair of C-shaped parasitic patches on both sides of the feeder, the antenna achieves five notch including the world interoperability for micro-wave access (WIMAX) band (3.3~3.6 GHz), the international mobile telecommunications (IMT-2020 (5G)) band (4.84~4.98 GHz), some WLAN bands (5.725~5.825 GHz), X-band downlink (7.25~7.75 GHz), and X-band uplink (7.9~8.4 GHz). After comparison between simulation and actual measurement, it was found that there are five notch in the communication frequency band of the antenna, and frequency deviations in the measured values. However, performance indicators such as isolation, envelope correlation coefficient (ECC), and diversity gain (DG) all meet the requirements.

## Keywords

Ultra-Wideband, Multi-Port, Five Band-Notched, C-Shaped Resonators, Antenna, Isolation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

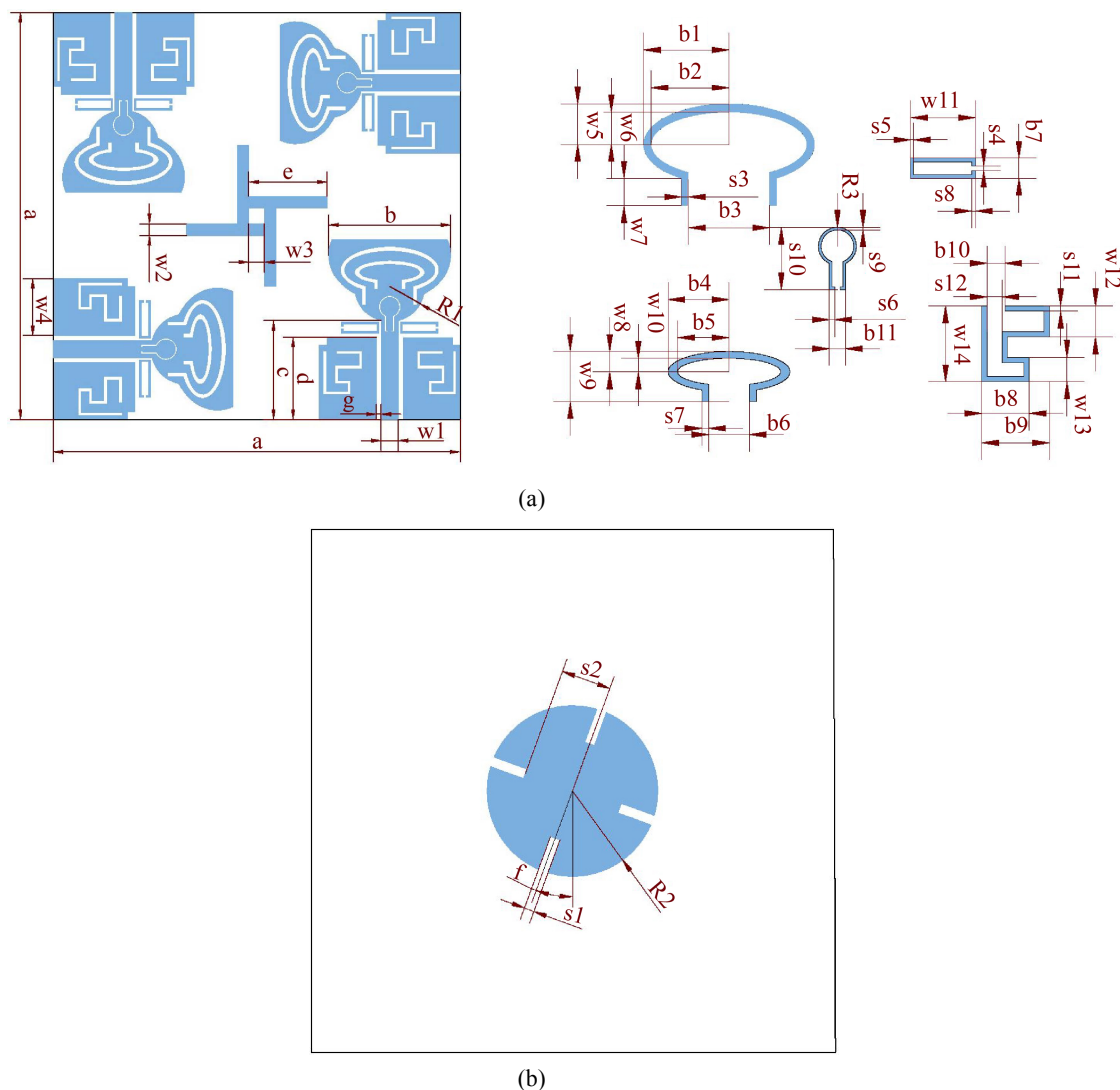
近年来,超宽带(ultra wide band, UWB)天线凭借着其高速率、低发射功率、低成本等优点而得到广泛研究[1]。由于超宽带技术发射功率低,仅适用于短距离通信,而多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统提升了通道容量和数据速率,同时充分发挥 MIMO 技术的抗多径衰落优势,有效弥补 UWB 系统无法远距离传输的缺点,因此将 UWB 技术和 MIMO 系统相结合[2]。为了抑制 UWB-MIMO 天线工作带宽内如 WiMAX (3.3~3.6 GHz)、WLAN 波段(5.725~5.825 GHz)、X 波段下行频率(7.25~7.75 GHz)、X 波段上行频率(7.9~8.4 GHz)等窄带的干扰[3] [4], 需要实现天线的多陷波功能。多端口天线面临着隔离度问题,常用的提高隔离度的方法包括分集法[5]、使用缺陷接地结构[6]、添加寄生枝节[7]、使用电磁带隙结构[8]等。

通过对文献的阅读,例如文献[9]将四个超宽带天线单元正交布置,利用接地面突出枝节并引入“卍”形寄生枝节有效提高了隔离度。文献[10]实现了双端口和四端口天线的仿真与实测,通过 U 形槽和一对“工”字形寄生贴片,在超宽带基础上实现双陷波功能。文献[11]中由一对叶子状组成的单极子天线超宽带功能,将四个天线单元正交放置组成四端口超宽带天线。文献[12]在辐射贴片上蚀刻 C 形槽,实现了双端口超宽带天线的单陷波功能。文献[13]将八边形作为辐射贴片实现超宽带功能,组成四端口超宽带天线。基于对以上文献的阅读,发现对于多端口超宽带天线存在着陷波数目较少的问题。

为了实现弥补以上文献中多端口超宽带天线存在的陷波数较少的问题。本文提出了一种具有五陷波特性的 UWB-MIMO 天线。本文采用削顶葫芦型贴片作为辐射结构,通过在辐射贴片上蚀刻两个帽子型槽和一个倒置的圆底烧瓶型槽,并在接地板上挖去一对缺口类 C 型槽以及在馈线两边加入一对 C 型谐振器的方式实现五陷波特性。为了提高天线隔离度,将四个单极子天线正交放置,并在介质板上下两面分别引入带槽十字枝节和带槽圆形贴片。仿真与实测结果表明,该天线引入了五个陷波,隔离度等性能也符合要求。

## 2. 天线设计和分析

如图 1 所示, 本文设计的天线模型由四个削顶椭圆形和圆形组成的葫芦型单极子天线, 搭配接地面和解耦结构构成, 工作带宽为 3.06~10.6 GHz。天线馈电方式为共面波导馈电。馈电端口阻抗为  $50 \Omega$ , 馈线宽度为 2.2 mm。图 1 中矩形接地面的顶角各截去一个  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的小正方形, 可以有效拓宽高频处带宽。



**Figure 1.** Antenna structure diagram. (a) Front; (b) Back  
**图 1.** 天线结构图。(a) 正面; (b) 背面

天线基板使用 FR4, 基板厚度为 1.6 mm, 介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.02。ANSYS HFSS 因其有限元法(FEM)求解器, 被应用于电小天线的仿真设计中。在完成天线模型三维建模后, 对天线部分设置理想导体边界条件(Perfect E), 并对绘制的空气盒子设置辐射边界条件(Radiation)。为了获得更贴近实际的仿真效果, 引入 SMA 连接器, 并设置集总端口激励, 求解设置中选择宽带模式并设置好工作带宽, 选择插值扫频。

天线的模型设计和尺寸优化均在 ANSYS HFSS 平台上进行, 其参数值见表 1。

**Table 1.** Size parameters of ultra-wideband antennas

**表 1.** 超宽带天线尺寸参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm	参数	数值/mm
a	52.00	w7	2.01	b7	1.50
b	15.60	w8	1.50	b8	3.50
c	12.64	w9	3.70	b9	5.00
d	10.90	w10	1.00	b10	1.30
e	10.00	w11	4.80	b11	1.20
f	20°	w12	2.30	s1	1.00
g	0.60	w13	1.80	s2	5.00
R1	4.50	w14	5.60	s3	0.50
R2	8.50	b1	5.76	s4	0.30
R3	1.40	b2	4.77	s5	0.20
w1	2.20	b3	6.00	s6	0.40
w2	1.50	b2	4.77	s7	0.50
w3	2.00	b3	6.00	s8	0.30
w4	7.30	b4	4.50	s9	0.20
w5	3.00	b5	3.80	s10	4.60
w6	2.40	b6	3.00	s11	0.40
s12	1.50				

为了实现 WIMAX、部分 WLAN 和 X 波段上行和下行频率等五个频段信号的窄带陷波, 在辐射贴片上蚀刻两个帽子型槽、一个圆底烧瓶型槽和在馈线两侧引入 C 型寄生贴片以及接地面上蚀刻了一对缺口类 C 型槽。考虑到谐振结构的长度与谐振频率的关系。为了实现在低频处的谐振, 在椭圆型谐振器的开口处添加两个短的枝节组成了帽子型谐振器, 增加了谐振器的长度, 实现了谐振器长度与所需中心频率的匹配。同样适用于圆底烧瓶型谐振器和缺口类 C 型谐振器, 并且还需要考虑到所设计天线的尺寸限制, 以及陷波结构间的干扰, 需要调整结构的位置及关键参数来实现理想陷波特性和

图 2 为加入五种陷波结构前后的  $S_{11}$  参数对比结果图。从图中可知, 添加陷波结构后, 天线产生了 3.33~3.77 GHz、4.84~4.98 GHz、5.56~6.02 GHz、7.26~7.74 GHz 和 7.99~8.46 GHz 这五个陷波频段, 同时拓展了低频处的带宽。

陷波结构的总长度大约为所需频段中心频率对应波长的二分之一, 天线会在该频段内出现阻抗失配, 进而产生陷波, 一般由公式(1)估算得出陷波结构的总长度。

$$L = \frac{c}{f_{notch} \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (1)$$

式中:  $c$  为光速;  $f_{notch}$  为陷波中心频率;  $\epsilon_r$  为介质基板相对介电常数。通过对谐振器结构的长度、宽度来调节谐振频率中心。

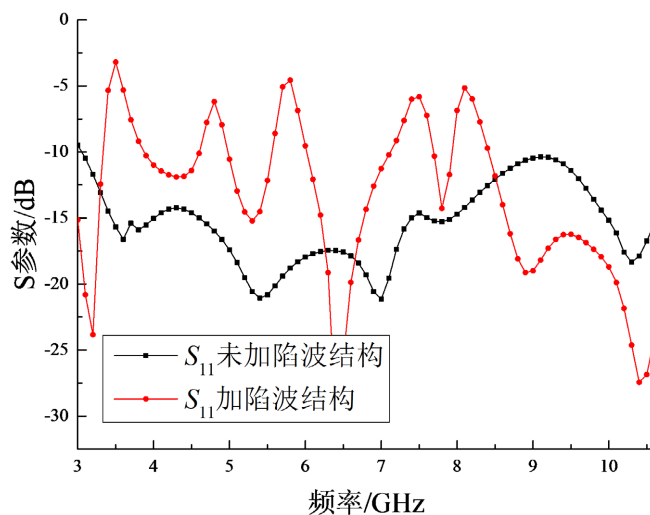


Figure 2. Simulated S-parameters  $S_{11}$  parameters

图 2.  $S_{11}$  参数仿真值

图 3 所示为加入解耦结构前后的  $S_{12}$  和  $S_{13}$  曲线仿真对比图。看图可知, 添加解耦结构后,  $S_{12}$  在 4~6 GHz 及 9~10.6 GHz 内有较大幅度的降低,  $S_{13}$  在 4~6 GHz 及 7.5~9 GHz 内也有效降低了隔离度。  $S_{12}$  和  $S_{13}$  整体上小于 -21 dB, 满足 MIMO 天线对隔离度小于 -15 dB 的规格要求。

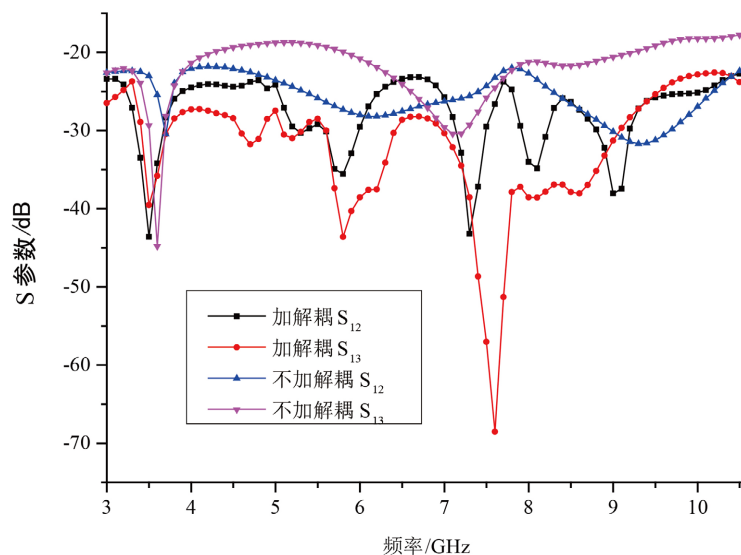


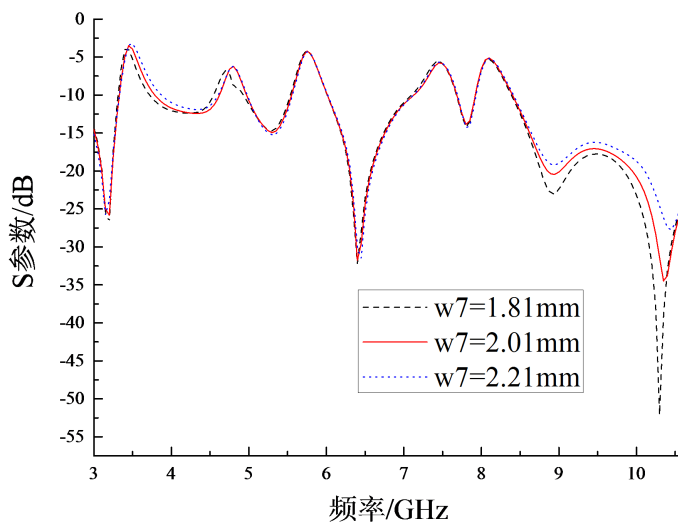
Figure 3. Simulated S-parameters of the antenna with or without the decoupling structure

图 3. 天线带有和不带有解耦结构的  $S$  参数仿真值

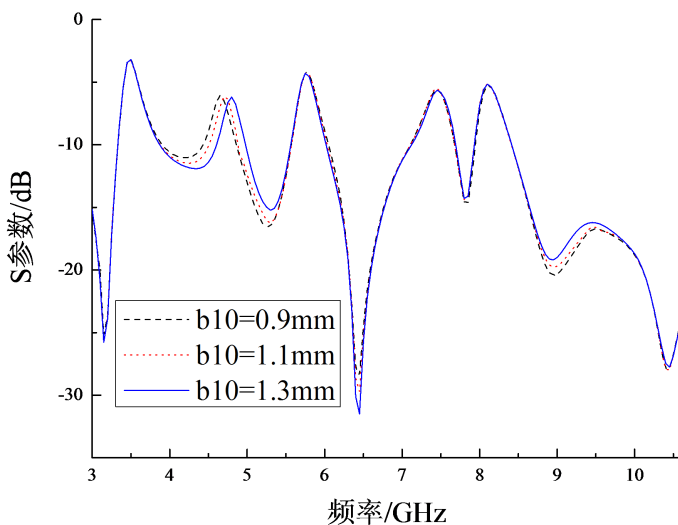
### 3. 陷波特性分析

#### 3.1. 参数讨论

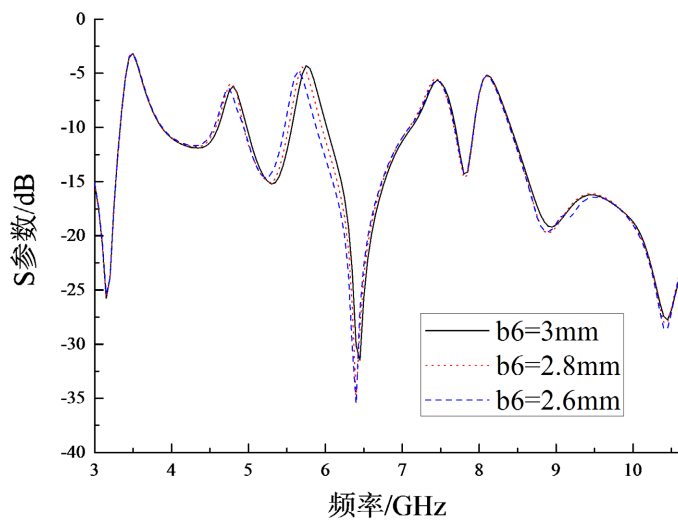
图 4 是各个谐振器关键参数优化的反射系数  $S_{11}$  曲线仿真图, 通过调节参数  $w_7$ 、 $b_{10}$ 、 $b_6$ 、 $s_6$ 、 $w_{11}$  的值, 可以看出对应陷波中心频率的改变, 且对其他陷波的影响较小。



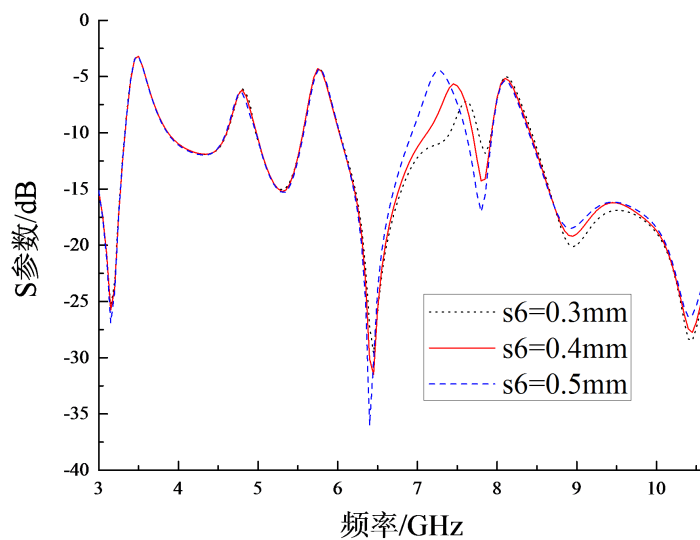
(a) 3.5 GHz



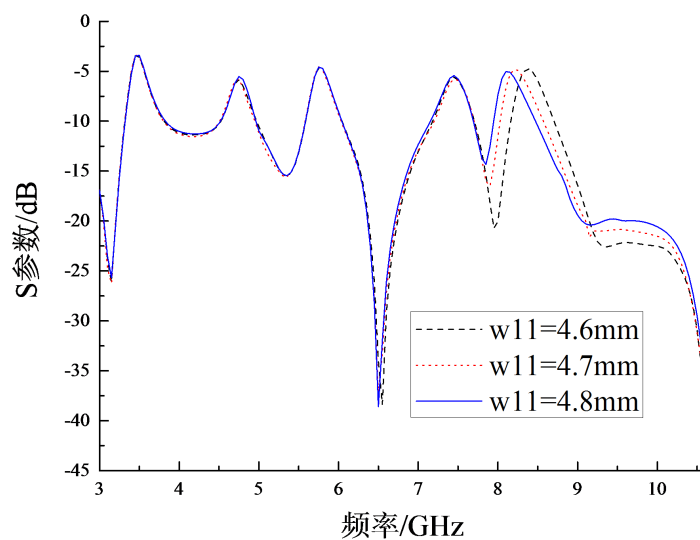
(b) 4.8 GHz



(c) 5.8 GHz



(d) 7.4 GHz



(e) 8.1 GHz

**Figure 4.** Simulation S-parameters  $S_{11}$  diagram of the antenna with the different lengths. (a) 3.5 GHz; (b) 4.8 GHz; (c) 5.8 GHz; (d) 7.4 GHz; (e) 8.1 GHz.

**图 4.**  $S_{11}$  参数随尺寸变化的仿真图。(a) 3.5 GHz; (b) 4.8 GHz; (c) 5.8 GHz; (d) 7.4 GHz; (e) 8.1 GHz

### 3.2. 表面电流分布

图 5 展示了五个中心频率处的表面电流分布。从图 5 可知, 第一个陷波中心频率 3.5 GHz 处的表面电流主要集中在辐射贴片上外环帽子型槽的开口处, 第二个陷波中心频率 4.8 GHz 处的表面电流主要分布在接地面上的带缺口的类 C 型槽的开口处, 第三个陷波中心频率 5.8 GHz 处的表面电流主要分布在辐射贴片的内环帽子型槽的开口处, 第四个陷波中心频率 7.4 GHz 处的表面电流主要分布在辐射贴片上圆底烧瓶型槽的开口处, 第五个陷波中心频率 8.1 GHz 处的表面电流主要分布在馈线两侧的一对 C 形谐振器两侧长边处。天线在五个频率点产生谐振, 导致阻抗失配, 使得能量无法辐射出去, 进而产生陷波。

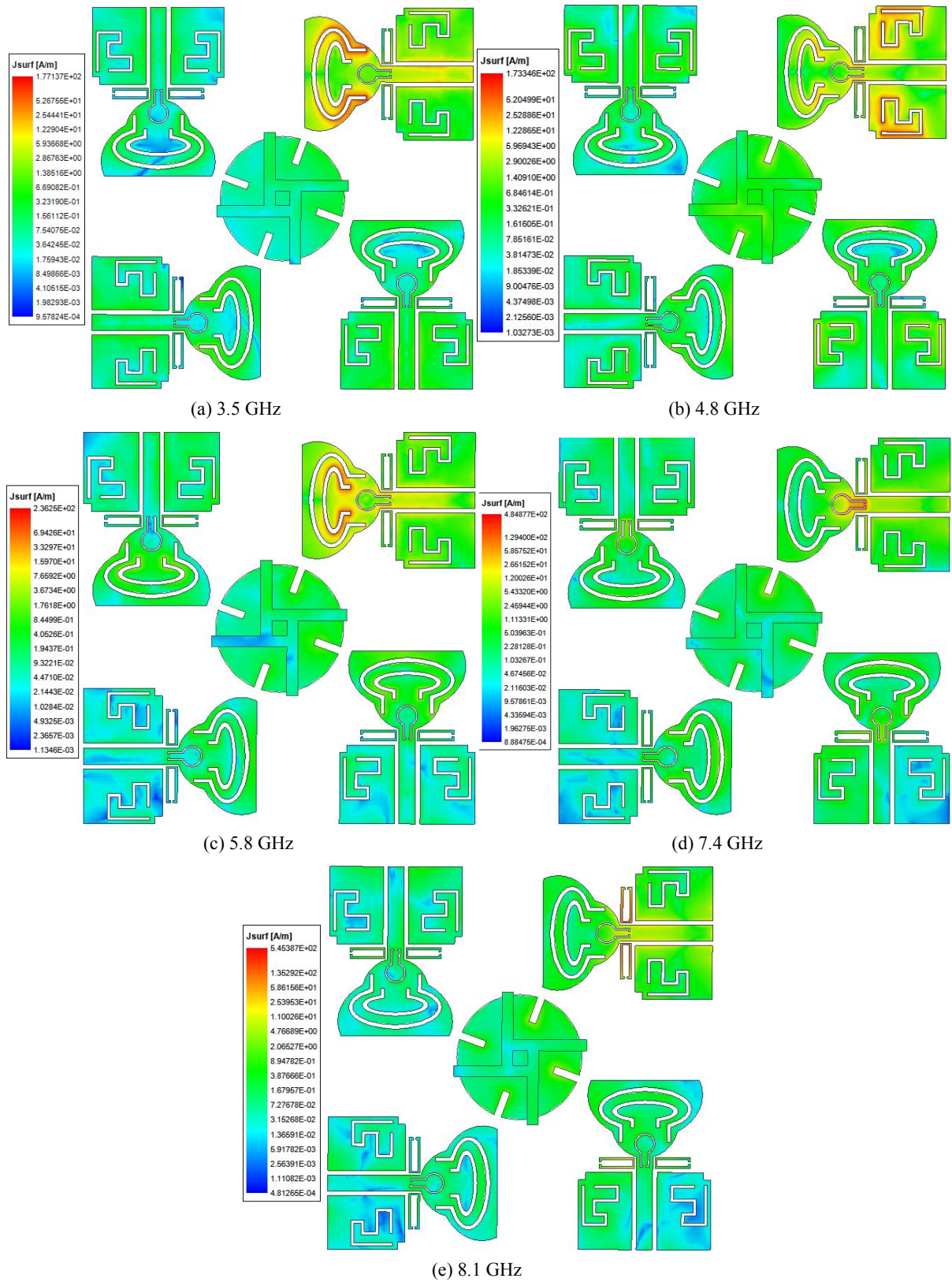


Figure 5. The surface current distribution of the antenna  
 图 5. 天线表面电流分布



#### 4. 天线实测结果与性能分析

图6为天线实物图。对实物天线的—个端口连接测试电缆, 另外三个端口加上 $50\ \Omega$ 匹配负载, 通过矢量网络分析仪来测试 $S$ 参数。图7(a)中的 $S_{11}$ 实测与仿真曲线的工作带宽为 $3.06\sim 10.6\ \text{GHz}$ , 在通带内有5个陷波频段。图7(b)中的 $S_{12}$ 和 $S_{13}$ 的实测值在其超宽带范围内隔离度 $< -20\ \text{dB}$ 。 $S_{11}$ 曲线的实测和仿真结果有出入, 实测值出现整体的频偏原因可能在于介质板的介电常数偏差, 以及天线加工误差和测量损耗。

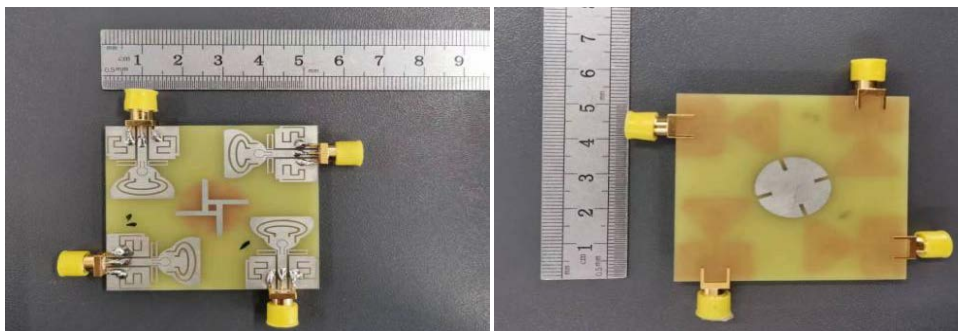
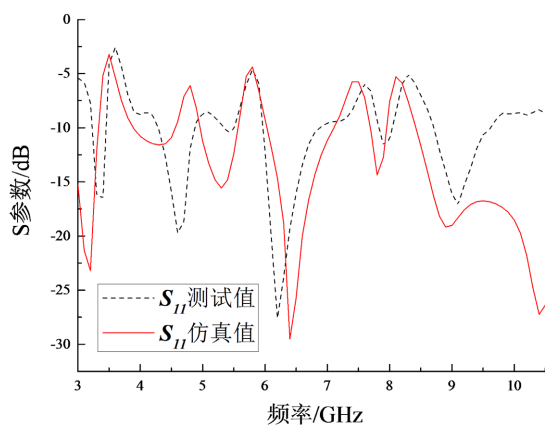
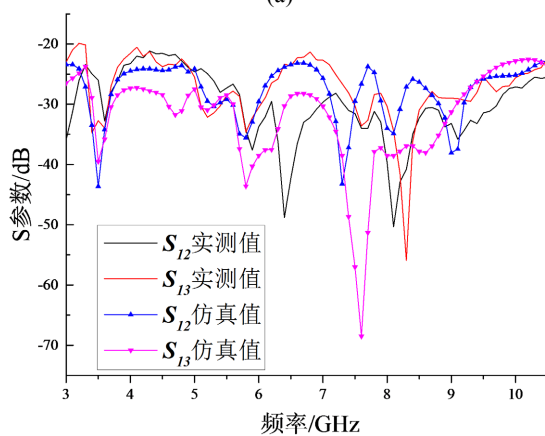


Figure 6. The physical diagram of the proposed antenna

图6. 天线实物



(a)



(b)

Figure 7. Simulated and measured results of S-parameters.

(a)  $S_{11}$ ; (b)  $S_{12}$ ,  $S_{13}$

图7. S参数的仿真与测试值。(a)  $S_{11}$ ; (b)  $S_{12}$ ,  $S_{13}$

对于 MIMO 天线, 分集性能主要参照包络相关系数(envelope correlation coefficient,  $ECC$ )和分集增益 (diversity gain,  $DG$ )来决定。对于四端口 MIMO 天线, 通过式(2) (3)来计算  $ECC$  和  $DG$ 。

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

$$DG = 10\sqrt{1 - |ECC|^2} \quad (3)$$

式中:  $S_{ii}^*$  为  $S_{ii}$  的共轭转置,  $S_{ji}^*$  为  $S_{ji}$  的共轭转置。

观察图 8, 该天线在工作频带中  $ECC$  除了陷波部分, 整体小于 0.006,  $DG$  值大于 9.999 dB, 说明所设计的 MIMO 天线单元接收信号的独立性很强, 展现了良好的 MIMO 性能。

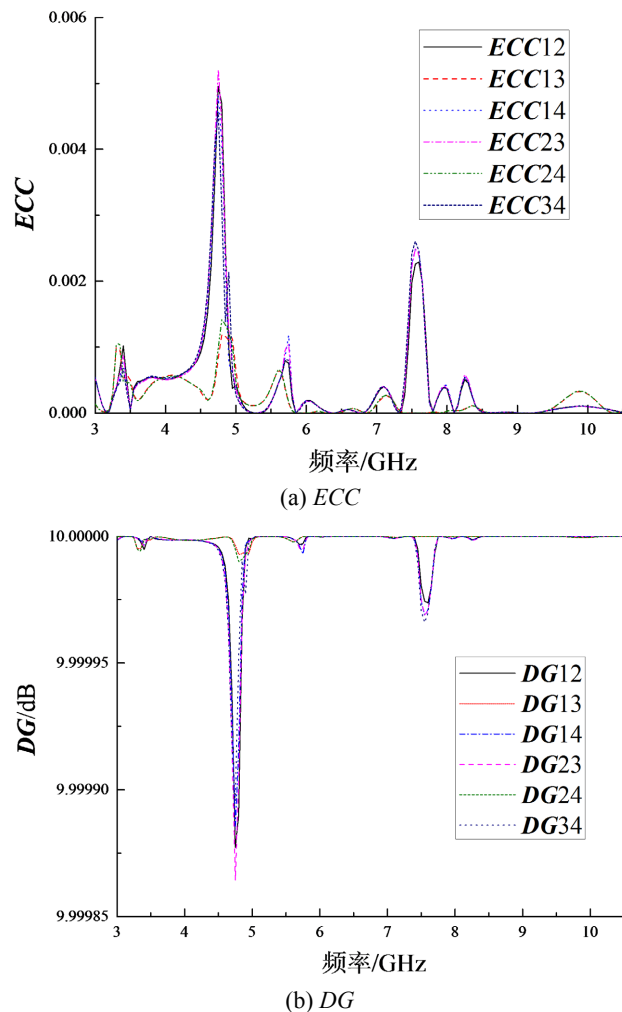
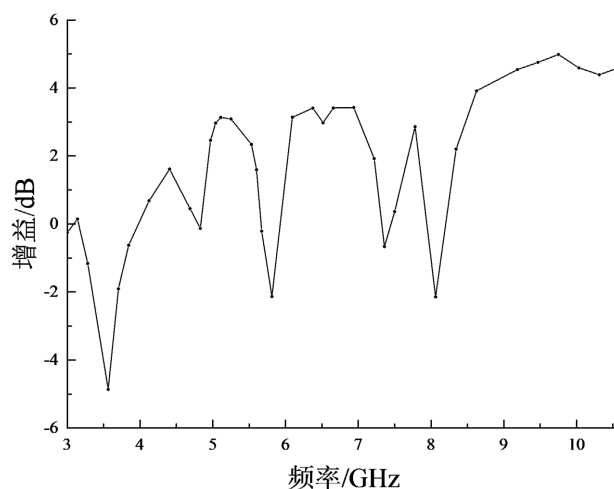


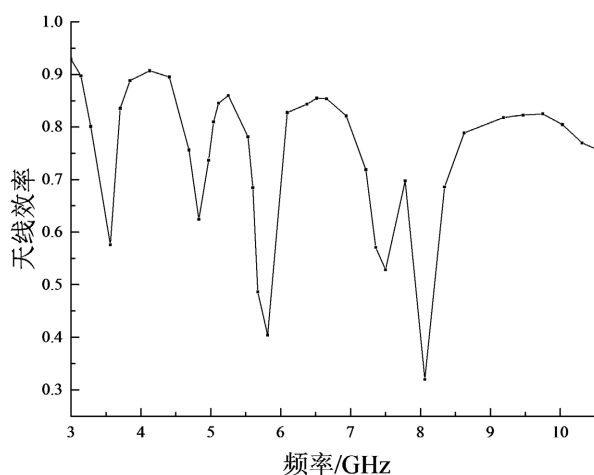
Figure 8. (a)  $ECC$  and (b)  $DG$  of the MIMO antenna  
图 8. MIMO 天线的(a)  $ECC$  和(b)  $DG$

图 9 为天线增益仿真图, 从图中可看出天线增益在 3.06~10.6 GHz 通带内增益稳定在-5~5 dB, 陷波频段内增益呈现下降趋势, 五个陷波频率中心增益各为-4.86 dB, -0.13 dB, -2.14 dB, -0.67 dB 及-2.14 dB。



**Figure 9.** Gain graph of the proposed antenna  
**图 9.** 天线增益图

天线辐射效率是表征天线稳定工作的重要因素, 由于实验条件限制, 仅对天线效率进行了仿真。如图 10 所示, 除陷波频段外, 在超宽带通信频段内天线的效率达到 80%, 说明天线的增益稳定。



**Figure 10.** Radiation efficiency of the proposed antenna  
**图 10.** 天线辐射效率

$TARC$  (total active reflection coefficient)指总反射功率的平方根与总入射功率的平方根的比值。 $TARC$ 用公式(4)来计算。

$TARC$

$$= \frac{\sqrt{|S_{11} + S_{12}e^{j\theta} + S_{13}e^{j\theta'} + S_{14}e^{j\theta''}|^2 + |S_{21} + S_{22}e^{j\theta} + S_{23}e^{j\theta'} + S_{24}e^{j\theta''}|^2 + |S_{31} + S_{32}e^{j\theta} + S_{33}e^{j\theta'} + S_{34}e^{j\theta''}|^2 + |S_{41} + S_{42}e^{j\theta} + S_{43}e^{j\theta'} + S_{44}e^{j\theta''}|^2}}{2} \quad (4)$$

图 11 展示了天线的  $TARC$  图。通过改变公式中三个信号相位  $\theta$ 、 $\theta'$ 、 $\theta''$ , 来得出图中八种  $TARC$  仿真曲线图。从图中可看出在不同信号相位变化下, 八条曲线较为的收敛, 且都小于 0 dB, 可以说明天线在工作频段内具有高效的性能。

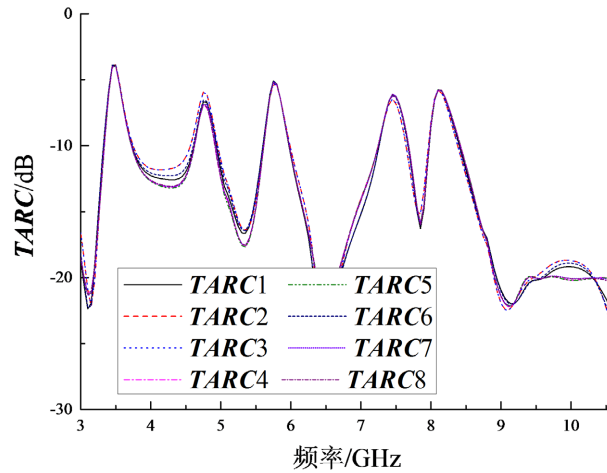


Figure 11. TARC diagram of the proposed antenna  
图 11. 天线 TARC 图

MIMO系统要求最大通道容量, 因此设计时需要MIMO系统各天线单元之间具有较低的相关性。CCL (channel capacity loss)用公式(5) (6) (7) (8)计算。

$$CCL = -\log_2 \det(\psi^R) \tag{5}$$

$$\psi^R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} & \rho_{14} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} & \rho_{24} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} & \rho_{34} \\ \rho_{41} & \rho_{42} & \rho_{43} & \rho_{44} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\rho_{mm} = 1 - \left| \sum_{n=1}^4 S_{mn}^* S_{nm} \right| \tag{7}$$

$$\rho_{mp} = - \left| \sum_{n=1}^4 S_{mn}^* S_{np} \right| \tag{8}$$

式中:  $m, p$  的取值范围为 1, 2, 3 和 4, 依据端口数量而定;  $\psi^R$  为接受天线相关矩阵。

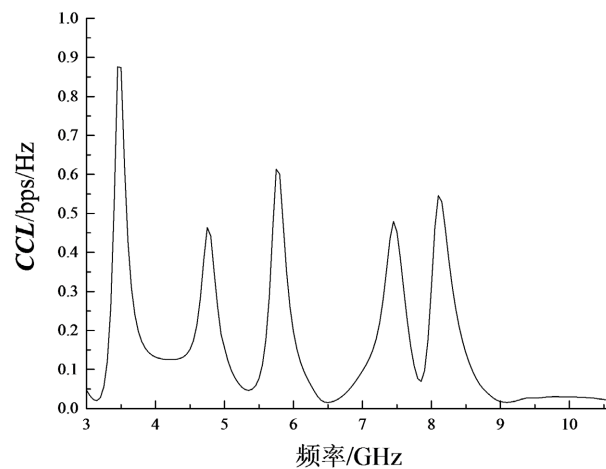


Figure 12. CCL diagram of the proposed antenna  
图 12. 天线 CCL 图

图 12 展示了天线的 CCL 仿真图, 从图中可看出除了陷波频段, 其他部分都  $<0.2 \text{ b}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ , 满足小于  $0.4 \text{ b}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$  的要求, 可看出 MIMO 系统可以通过无线方式稳健的工作。

本文与其他文献天线在尺寸、陷波个数及隔离度等方面的对比如表 2 所示, 可以看出本文的陷波数较多, 结构相对紧凑, ECC 等参数上有相对优势。

**Table 2.** Comparison of the literature

**表 2.** 文献对比

文献	天线尺寸/mm <sup>2</sup>	端口数	陷波数	隔离度/dB	ECC	DG/dB
[14]	38 × 26	2	3	<-22.6	<0.01	/
[15]	34 × 34	4	3	<-15	<0.05	/
[16]	50 × 50	4	3	<-30	<0.00021	9.9
[17]	25 × 33	2	0	<-17	<0.002	/
[18]	60 × 60	4	1	<-21	<0.001	/
本文	52 × 52	4	5	<-20	<0.006	9.99

## 5. 结论

提出了一种尺寸为 52 mm × 52 mm × 1.6 mm, 具有五陷波特性的四端口超宽带天线。基于多端口天线陷波数量不足的情况下, 进行了四端口五陷波超宽带天线的设计。为了实现五个陷波, 将两个帽子型槽和一个圆底烧瓶型槽蚀刻在辐射贴片上, 接地面上挖去一对缺口类 C 型槽, 同时在馈线两侧放置一对 C 型谐振器。通过实物制作与测试, 该天线在通信频段内实现了五个陷波。虽实测结果相较仿真值存在偏差, 但隔离度等性能符合要求。从实测结果中可看出, 设计的天线依然有优化空间, 可以试用介质损耗角正切较低的罗杰斯介质板来设计四端口五陷波超宽带天线, 并需要在仿真时考虑到介电常数的加工误差。

## 基金项目

国家自然科学基金(11564005)。

## 参考文献

- [1] 南敬昌, 刘银玲, 高明明, 等. 小型化分形结构 UWB 天线的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 18-25.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 蔡际周, 官伯然. 一种新型小尺寸三陷波超宽带天线设计[J]. 电子科技, 2018, 31(3): 10-12+16.
- [5] 邹艳葵, 刘海波, 王斌驰. 一种小型化三陷波超宽带 MIMO 天线的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021(19): 1-3.
- [6] 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.
- [7] 李艳玲, 陈新伟, 苏晋荣. 具有三陷波特性的超宽带高隔离度紧凑型 UWB-MIMO 天线[J]. 测试技术学报, 2022, 36(1): 23-28.
- [8] 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.
- [9] Wu, A., Zhao, M.Y., Zhang, P.Q., et al. (2022) A Compact Four-Port MIMO Antenna for UWB Applications. *Sensors*, 22, Article No. 5788. <https://doi.org/10.3390/s22155788>

- 
- [10] Kumar, P., Ali, T., Pai, M., *et al.* (2022) A Compact Highly Isolated Two- and Four-Port Ultra-Wideband Multiple Input and Multiple Output Antenna with Wireless LAN and X-Band Notch Characteristics Based on Defected Ground Structure. *Communication Systems*, **35**, e5331. <https://doi.org/10.1002/dac.5331>
- [11] Garg, R.K., Singhal, S., Nair, M.V.D., *et al.* (2022) A Double-Leaf-Shaped Four-Port MIMO Antenna for Ultra-Wideband Applications. *RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, **32**, e23349. <https://doi.org/10.1002/mmce.23349>
- [12] 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.
- [13] Palanisamy, P. and Subramani, M. (2019) Novel Double-Side EBG Based Mutual Coupling Reduction for Compact Quad Port UWB MIMO Antenna, *Electronics and Communications*, **109**, 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.06.010>
- [14] 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/OL]. *电波科学学报*: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1185.TN.20230104.1638.002.html>, 2023-03-18.
- [15] Chen, Z.J., Zhou, W.S. and Hong, J.S. (2021) A Miniaturized MIMO Antenna with Triple Band-Notched Characteristics for UWB Applications. *IEEE Access*, **9**, 63646-63655. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074511>
- [16] Rania, R.E., Anwer, S.A.E. and Shaza, M.E. (2022) Quad-Port MIMO Filtenna with High Isolation Employing BPF with High Out-of-Band Rejection. *IEEE Access*, **10**, 3814-3824. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134865>
- [17] 荀一峰, 韩丽萍. 小型化超宽带多输入多输出天线的设计[J/OL]. *山西大学学报(自然科学版)*: 1-6. <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2021188>, 2023-03-18.
- [18] Abbas, A., Hussain, N., Suffian, M.A., *et al.* (2022) Isolation and Gain Improvement of a Rectangular Notch UWB-MIMO Antenna. *Sensors*, **22**, Article No. 1460. <https://doi.org/10.3390/s22041460>