

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105000

一种紧凑型三陷波 UWB-MIMO 天线的设计*

高明明 王纪禹 南敬昌 韩欣欣

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125000)

摘要:提出了一种紧凑型的三陷波超宽带多输入多输出(ultra wideband multiple-input multiple, UWB-MIMO)天线,将半圆形与正六边形结合作为辐射贴片,接地板引入带“梳子”缝隙状 T 型枝节来实现较高的隔离度,天线尺寸为 36 mm×18 mm×1.6 mm。通过在辐射贴片上刻蚀倒“Ω”形槽,在馈线上刻蚀类“U”形槽以及贴片旁引入类“U”形枝节的方式实现 WiMAX (3.3~3.6 GHz)、WLAN 部分频段(5.725~5.825 GHz)和 X 波段下行频率(7.25~7.75 GHz)3 个频段的陷波。仿真与实测结果均表明,该 UWB-MIMO 天线的工作带宽为 1.9~10.6 GHz,相对带宽达到 139%,3 个陷波频段为 2.9~3.7 GHz、5.6~6.0 GHz 和 7.05~7.76 GHz,且隔离度大于 20 dB,包络相关系数 ECC<0.003,说明天线在各方面特性良好,可以满足 UWB-MIMO 天线的要求。

关键词: UWB-MIMO; 三陷波; “梳子”缝隙状 T 形枝节; 倒“Ω”形槽; 类“U”形枝节

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 a compact triple-notch UWB-MIMO antenna

Gao Mingming Wang Jiyu Nan Jingchang Han Xinxin

(School of Electronics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125000, China)

Abstract: In this paper, a compact triple-notch ultra-wideband multiple-input multiple (UWB-MIMO) antenna is proposed, which combines a semicircle and a regular hexagon as a radiating patch, and a grounding plate is introduced into the belt. “Comb” slot-like T-shaped branches to achieve higher isolation, the antenna size is 36 mm×18 mm×1.6 mm. WiMAX (3.3~3.6 GHz) and WLAN parts are realized by etching the inverted “Ω”-shaped groove on the radiation patch, etching the “U”-shaped groove on the feeder and introducing the “U”-shaped branch next to the patch. Frequency band (5.725~5.825 GHz) and X-band downlink frequency (7.25~7.75 GHz) are notched in three frequency bands. Both simulation and actual measurement results show that the working bandwidth of the UWB-MIMO antenna is 1.9~10.6 GHz, the relative bandwidth reaches 139%, and the three notch frequency bands are 2.9~3.7 GHz, 5.6~6.0 GHz and 7.05~7.76 GHz, the degree of isolation is greater than 20 dB, and the envelope correlation coefficient ECC is less than 0.003, indicating that the antenna has good characteristics in all aspects and can meet the requirements of UWB-MIMO antennas.

Keywords: UWB-MIMO; triple notch; “comb” slot-shaped T-shaped branch; inverted “Ω”-shaped groove; “U”-like branch

0 引言

MIMO 技术是现代移动通信技术领域内最重要的技术之一,这种技术具有很高的频谱利用率和数据传输速

率,其潜力和发展前景不可限量。而现有的 UWB 系统的辐射功率相对较低,在实现远距离传输上有一定的难度,所以将 UWB 技术与 MIMO 技术结合,充分发挥 MIMO 技术的抗多径衰落优势,同时完成多条信道的收发传输,借助这种方式就可以在维持原有天线辐射功率的基础上,

收稿日期: 2021-12-09 Received Date: 2021-12-09

* 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61701211)、国家自然科学基金(61971210)、基于硬件加速的三维重建体育展示平台(Z201100005820010)、基于压缩感知的图像传输与重构技术研究(21-2067)项目资助

大幅度延长 UWB 系统的传输距离。便携式、小型化设备的发展,为小空间内能够提供低耦合、分集性能优异的紧凑型 UWB-MIMO 天线带来了良好的发展前景。频谱资源的日渐紧张,将频段使用率最大化是极其重要的,由于超宽带系统覆盖频段非常宽,容易与频率范围内已有的 WiMAX(3.3~3.6 GHz)、C 波段(3.7~4.2 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)^[1-3]等窄带频段形成干扰,为了提高通信质量,使天线更好的应用于军事、无线局域网或是智能城市等领域中,带有陷波特性的 UWB-MIMO 天线成为了研究热点^[4-5]。

近年来,相继提出了很多解决 UWB-MIMO 天线单元之间耦合和抑制多波段干扰的技术。文献[6]将挖有“U”形槽的天线单元相互垂直放置,并增加窄槽来降低天线单元间的互耦;文献[7]在辐射贴片中嵌入“C”形短节,在馈线旁插入“U”形寄生带,来抑制 WiMAX 频段(3.3~3.8 GHz)和 WLAN 频段(5.1~5.8 GHz)干扰,同时将天线单元 90°摆放实现隔离度大于 20 dB;文献[8]通过在介质基板底层和顶层添加 H 型枝节,使天线在工作频带内隔离度大于 21 dB。总体而言,UWB-MIMO 天线想要在尺寸上达到紧凑型的同时,实现低耦合、多陷波性能依然是一个具有挑战性的工作^[9-16]。

文中提出了一种紧凑型三陷波 UWB-MIMO 天线。辐射贴片采用半圆形与正六边形结合,实现较宽的带宽;在接地板引入带“梳子”缝隙状的 T 形枝节,实现天线较高隔离度;通过在贴片上刻蚀倒“Ω”形槽,在馈线上刻蚀类“U”形槽,以及在贴片右侧引入类“U”形枝节,实现了对 WiMAX(3.3~3.6 GHz)、部分 WLAN(5.725~5.825 GHz)和 X 波段下行频率(7.25~7.75 GHz)3 个频段的陷波特性的。最后设计的天线尺寸为 36 mm×18 mm×1.6 mm,结构非常紧凑且在整个 1.9~10.6 GHz 工作带宽内,该 MIMO 天线的隔离度大于 20 dB,包络相关系数 ECC(envelope correlation coefficient, ECC)低于 0.003。实际测试结果与仿真结果大致吻合,表明该天线具有良好的增益和辐射性能,能够应用在无线超宽带通信系统中。

1 天线的设计

1.1 天线结构

文中所设计的天线结构如图 1 所示,天线印制在介电常数为 4.4 的 FR4 板子上,该介质基板损耗角正切值为 0.02,天线尺寸为 36 mm×18 mm×1.6 mm。其中,该天线的辐射贴片由半径为 4.4 mm 的半圆形与半径为 4 mm 的正六边形组合而成,半圆形圆心与正六边形中心相距 0.7 mm,增加的正六边形有效降低了低频处的截止频率。

同时,采用长度为 5.7 mm,宽度为 1.2 mm 的 50 Ω 微带馈线。接地平面下底边高度为 4.5 mm,宽度与天线总宽度一致为 36 mm;T 型枝节上顶边高度为 3.6 mm,宽度为 18 mm,两天线单元相对放置实现 UWB 特性。

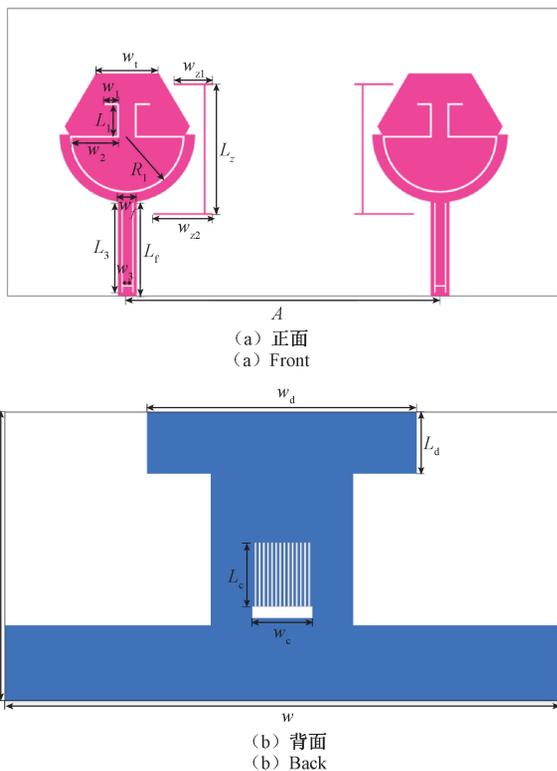


图 1 天线结构图

Fig. 1 Antenna structure diagram

仿真优化后的结构参数如表 1 所示。

表 1 UWB-MIMO 天线尺寸

Table 1 UWB-MIMO antenna size

参数	数值/mm	参数	数值/mm
L	36.00	W_1	1.00
W	18.00	W_2	3.00
R_1	3.65	W_3	0.64
L_1	2.50	W_c	4.40
L_3	5.49	W_d	18.00
L_c	4.70	W_f	1.20
L_d	3.60	W_1	4.00
L_f	5.70	W_{z1}	2.50
L_g	4.50	W_{z2}	4.00
L_z	8.60	A	20.30

1.2 天线去耦结构的设计

在保持 UWB-MIMO 天线结构紧凑的基础上,进一步使天线实现低耦合等各项性能较优的效果是具有一定难度的。天线的去耦原理实质上是改变天线表面电流的流经路径,通过对去耦结构的改进,使天线一端的电流尽可

能少的耦合到另一端上,从而提高天线单元间的隔离度^[17-21]。为了实现上述目标,文中在不改变天线尺寸前提下,提出了一种简单的带“梳子”缝隙状的 T 型枝节作为去耦结构,有效提高天线单元间的隔离度。图 2(a)、(b)、(c)为天线接地板设计演变过程。

首先在接地板上引入一个 T 型枝节,从原理上分析,该枝节可以充当一个反射器,削弱天线单元之间的电流强度,起到分散电流作用,以满足 UWB-MIMO 的要求;然后在 T 型枝节上刻蚀一个矩形缝隙初步降低耦合,刻蚀的缝隙可以作为一种慢波结构,使信号的波长减小的同时,增加了天线单元间的有效电长度;在此基础上对已有的矩形缝隙结构继续刻蚀 14 个细小矩形缝隙,形成“梳子”状,使有效电长度进一步增大,实现了工作频带内更好的去耦效果。

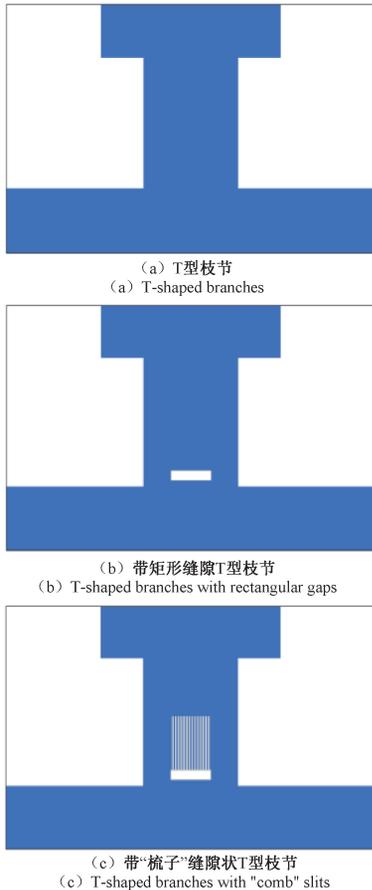


图 2 天线接地板演变过程

Fig. 2 Evolution of antenna ground plane

接地板添加 T 型枝节、添加带矩形缝隙的 T 型枝节和添加带“梳子”状缝隙的 T 型枝节所对应的 S_{12} 参数仿真结果如图 3 所示。从图中可以看出,在接地板添加 T 型枝节时,虽然隔离度已经满足 UWB-MIMO 天线隔离度小于 -15 dB 要求,但是在 $1.3 \sim 2.5$ GHz 内天线单元互耦

依然很强烈;通过将 T 型枝节刻蚀矩形缝隙,隔离度稍有提高;继续将 T 型枝节调整为带“梳子”缝隙状,使整个工作带宽范围内天线的 S_{12} 均小于 -20 dB,达到高隔离度 UWB-MIMO 天线的要求。

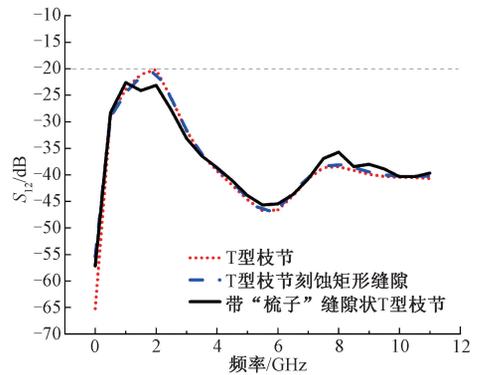


图 3 不同接地板结构对 S_{12} 的影响

Fig. 3 The influence of different ground plate structures on S_{12}

1.3 “梳子”缝隙状 T 型枝节的设计

不同个数的小矩形对天线单元之间电流流经路径有不同的影响,从而改变着单元间的耦合度。“梳子”状缝隙是一个水平放置的矩形与 14 个高度为 4.7 mm、宽度为 0.1 mm 的小矩形组合而成。图 4 是对细小矩形的个数 n 进行仿真分析,由图可知,当 $n < 14$ 时, S_{12} 均大于 -20 dB;当 $n > 14$ 时, S_{12} 同样大于 -20 dB,只有 $n = 14$ 时天线单元间隔度最好,达到 -22 dB。隔离度的降低证明了当 T 型枝节带有 14 个“梳子”缝隙时,可以将原本流向另一个端口的电流更多的引入到地板上,并且还可以作为辐射枝节产生更多的辐射,从而大大降低天线两单元间的耦合度。

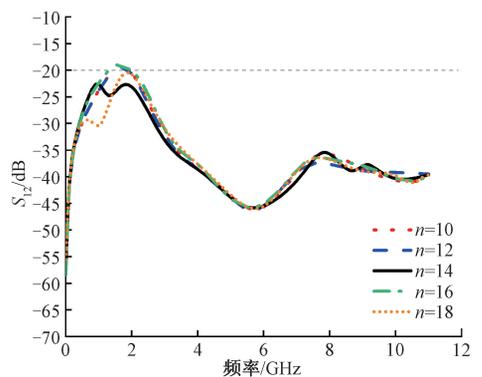


图 4 不同小矩形个数 n 对应的 S_{12} 曲线

Fig. 4 S_{12} of different number of small rectangles n

1.4 天线陷波结构的设计

为了抑制 WiMAX、部分 WLAN 和 X 波段下行频率 3

个频段信号的干扰,在辐射贴片上刻蚀倒“Ω”形槽、在馈线上刻蚀类“U”形槽和在贴片右侧引入类“U”形枝节,并且调整上述3种结构的位置及关键参数来实现陷波特性和。图5为加入3种陷波结构前后的 S_{11} 参数对比结果。结果表明了添加陷波结构后,天线产生了2.9~3.7 GHz、5.6~6.0 GHz和7.05~7.76 GHz 3个陷波频段,并且天线的最低截止频率也得到了相应的降低,虽然高频带宽有所牺牲,但最终带宽依然很宽,为1.9~10.6 GHz。

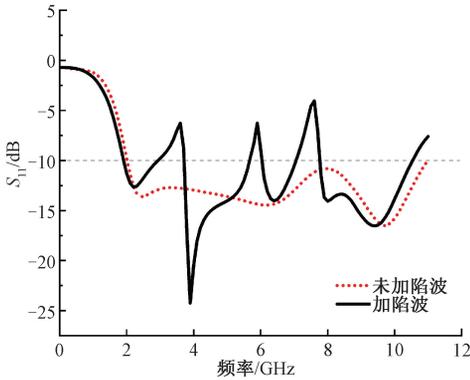


图5 陷波结构对 S_{11} 的影响

Fig. 5 The influence of notch structure on S_{11}

为了进一步验证文中设计的去耦结构和陷波结构的有效性,图6给出了该陷波UWB-MIMO天线在不同频点处的电流分布图。天线在第1个陷波中心频率3.45 GHz处的表面电流主要集中在倒“Ω”形槽曲边周围,其原因是当加入倒“Ω”形槽陷波结构后改变了天线左侧单元表面电流分布,使刻蚀槽两边电流流向相反,进而没有能量向外辐射;第2个陷波中心频率5.25 GHz处的表面电流主要分布在类“U”型枝节上,左侧天线单元上的电流被耦合到类“U”型枝节上,产生与天线相反的电流,形成等大反向的电场方向,矢量叠加后相互抵消;陷波中心频率7.5 GHz处的表面电流主要分布在馈线上的类“U”形槽长边周围,当加入类“U”形槽后,大量电流被阻隔在馈线部分,在槽两边形成等大反向的电流流向,相互抵消产生陷波。天线在3个频点附近有较大的阻抗失配,陷波特性良好。同时,去耦结构的增加有效的阻隔了电流从左侧天线单元向右侧单元的流入,使除陷波频段内电流都主要集中分布在左侧天线单元及去耦结构上。

当引入的陷波结构的总长度大约为所需陷波频段中心频率对应波长的1/2时,阻抗失配天线会在该频段内产生较大的反射系数,产生陷波。陷波频段的中心频率对应陷波结构理论长度 L 可由式(1)计算:

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

式中: c 为光速; f_{notch} 为陷波中心频率; ϵ_r 为介质基板相

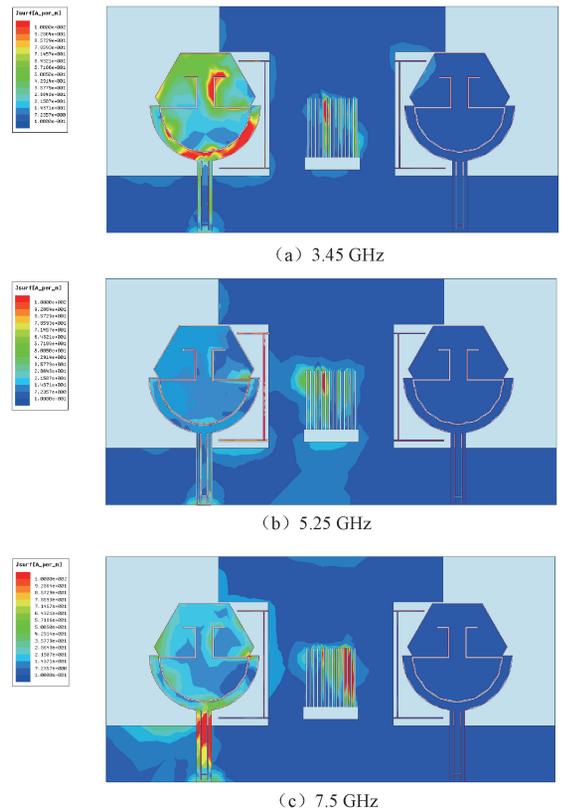


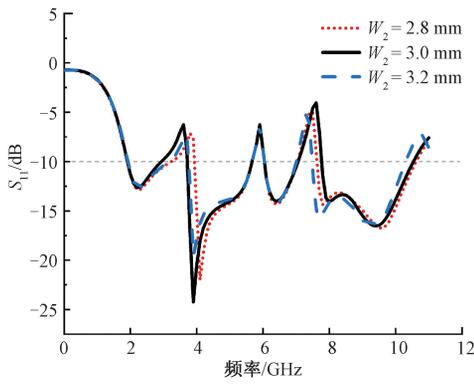
图6 不同陷波频率处电流分布

Fig. 6 Current distribution at different trap frequencies

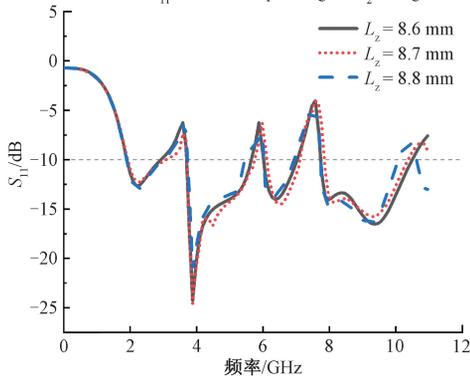
对介电常数。

根据上述公式,对文中3个陷波结构的总长度 $Long_1$ 、 $Long_2$ 、 $Long_3$ 进行估算。由于不同陷波结构的总长度改变时,陷波中心频率会随之改变,进而直接影响陷波频段。所以为了更精确的滤除干扰频段,通过对3种陷波结构中的相关参数进行优化,在改变陷波结构总长度的同时,确定出在使其中一个陷波特性达到最优而对另外两个陷波特性影响最小的参数值,得到的 S 参数变化结果如图7所示。

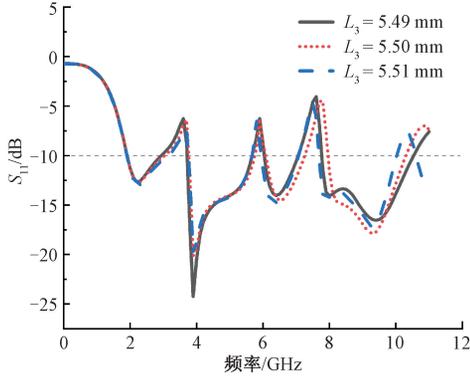
图7(a)调整位于辐射贴片上的WiMAX频段倒“Ω”形槽对应的 W_2 尺寸参数, $W_2 = 3.0$ mm时,第1个陷波频段左移至完全覆盖WiMAX频段,且对另外两个频段影响较小。图7(b)调整辐射贴片旁的部分WLAN频段类“U”型枝节对应的 L_2 尺寸参数, $L_2 = 8.6$ mm时,第2个陷波频段完全覆盖部分WLAN频段,且另外两个陷波频段也完全覆盖。图7(c)调整微带线上的X波段下行频率类“U”型缝隙对应的 L_3 尺寸参数, $L_3 = 5.49$ mm时,第3个陷波频段完全覆盖X波段下行频率,且天线工作频段截止频率不低于10.6 GHz。由此,文中通过改变陷波结构的尺寸,使陷波中心频率发生偏移,实现陷波频率可调。最终实际优化后的陷波结构总长度为 $Long_1 = 24.8$ mm、 $Long_2 = 15.1$ mm、 $Long_3 = 11.64$ mm。



(a) W_2 变化对应的 S_{11} 曲线
(a) S_{11} curve corresponding to W_2 change



(b) L_z 变化对应的 S_{11} 曲线
(b) S_{11} curve corresponding to L_z change



(c) L_3 变化对应的 S_{11} 曲线
(c) S_{11} curve corresponding to L_3 change

图 7 S_{11} 随 W_2 、 L_z 、 L_3 变化的仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of S_{11} changing with W_2 , L_z , L_3

2 实验仿真与测量

2.1 S 参数

S 参数是反映天线性能的重要指标之一,天线实物图如图 8 所示。通过使用矢量网络分析仪,对该天线实物进行 S 参数的测试。

S_{11} 和 S_{12} 的仿真与实测结果如图 9 所示。由图可以看出,天线在为 1.9~10.6 GHz 内 $S_{11} < -10$ dB,并且工作带宽范围内 $S_{12} < -20$ dB。天线在 2.9~3.7 GHz、5.6~

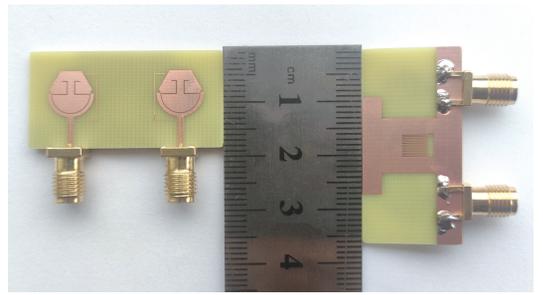


图 8 天线实物图

Fig. 8 Physical image of antenna

6.0 GHz 和 7.05~7.76 GHz 内有效抑制 WiMAX 频段、部分 WLAN 频段和 X 波段下行频率的干扰,具有良好的陷波特性。

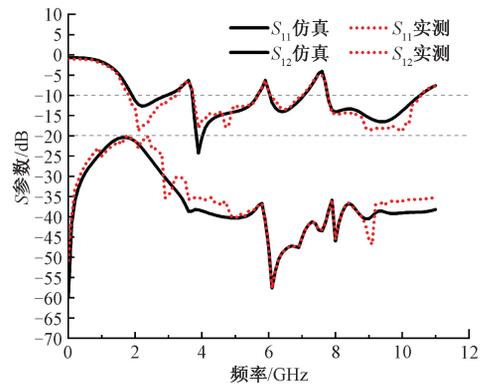


图 9 S 参数仿真与实测

Fig. 9 S-parameter simulation and actual measurement

2.2 辐射特性

图 10 展示了天线在 3.0、5.1 和 9.0 GHz 频率处的远场 E 面、H 面仿真和实测方向图。从图可以看出:仿真和实测中天线在频率较低时辐射特性都是良好的,但在频率较高时会有畸变产生,主要是所用板材为 FR4 所带来的影响。频率升高,FR4 的介电常数会降低,使天线表面的电损耗增大,进而降低天线的辐射效率,但仍然可以看出 E 面近似“8”,H 面近似圆形,表明该天线具有一定的辐射特性。

2.3 分集性能

对于 MIMO 天线,包络相关系数(ECC)用于说明 MIMO 天线单元间的相关性。理想的 ECC 应该等于 0,但不相关分集天线的实际极限是 $ECC < 0.5$ 。对于两端口 MIMO 天线,通过式(2)来计算 ECC。

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

观察图 11,该天线在工作频带中 ECC 整体小于

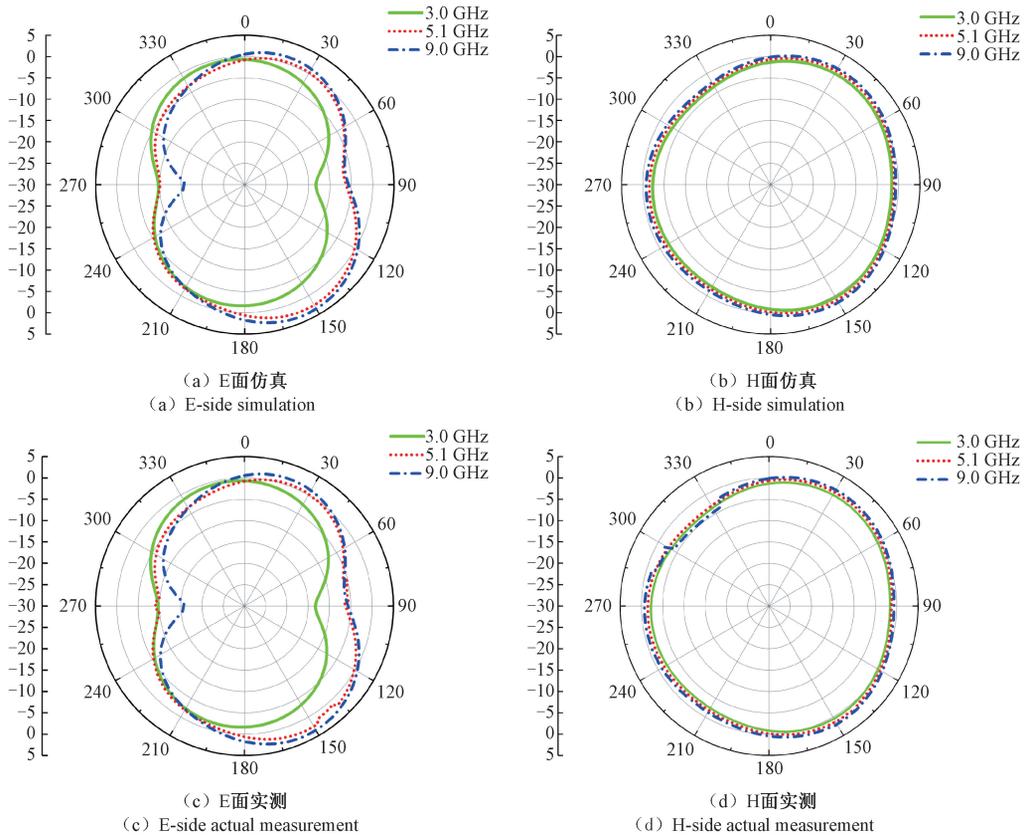


图 10 天线远场方向图

Fig. 10 Antenna far-field pattern

0.003,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。

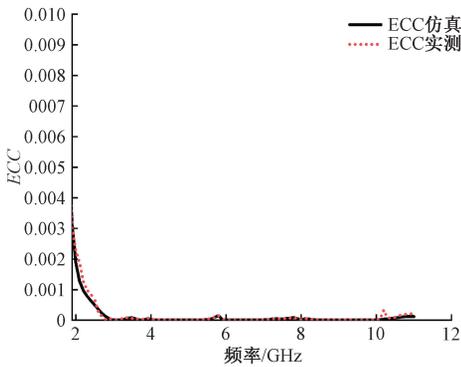


图 11 MIMO 天线的包络相关系数

Fig. 11 Envelope correlation coefficient of MIMO antenna

表 2 为文中所设计的紧凑型三陷波 UWB-MIMO 天线与已发表文献中天线的对比,从表 2 中看出,与单陷波文献相比,隔离度虽然稍有不足,但文中天线在 UWB 频段内滤除干扰频段数量更多。与多陷波文献相比,虽然陷波数量上接近,但是滤除的干扰频段更加完整,且在尺寸的紧凑化及 ECC 参数上都具有突出的优势。

表 2 文献对比

Table 2 Literature comparison

文献	带宽/GHz	陷波频带/GHz	隔离度/dB	尺寸/mm	ECC
[1]	2.20~10.80	3.30~3.80	30	38.0×25.0	<0.003
[3]	2.70~10.90	5.10~5.90	25	50.0×45.0	<0.08
[7]	2.40~10.60	3.30~3.80 5.10~5.80	20	73.0×73.0	<0.0015
[9]	3.10~10.60	3.70~4.20 5.15~5.35	15	60.0×35.0	<0.01
[10]	3.10~10.60	4.59~6.00 8.92~9.90 3.25~3.75	12	47.0×25.7	<0.001
[12]	2.30~13.75	5.08~5.90 7.06~7.95	22	39.0×39.0	<0.02
[20]	UWB	WLAN X-band 3.81~4.16	25	36.0×18.0	<0.004
[21]	3.70~10.64	5.22~5.84 7.84~8.44 2.90~3.70	16.1	37.5×81.5	<0.0084
本文	1.90~10.60	5.60~6.00 7.05~7.76	20	36.0×18.0	<0.003

3 结 论

文中设计了一种紧凑型三陷波 UWB-MIMO 天线, 天线尺寸为 $36\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$, 实现了 $1.9 \sim 10.6\text{ GHz}$ 的工作带宽, 相对带宽达到 139%, 在 $2.9 \sim 3.7\text{ GHz}$ 、 $5.6 \sim 6.0\text{ GHz}$ 和 $7.05 \sim 7.76\text{ GHz}$ 频段具有陷波特性和有效抑制了 WiMAX 频段、部分 WLAN 频段和 X 波段下行频率的干扰。在地板引入带“梳子”缝隙状 T 型枝节, 降低了天线单元间的互耦, 使天线隔离度大于 20 dB。根据仿真和实测结果分析, 天线具有良好的辐射特性和分集性能, $\text{ECC} < 0.003$, 完全能够应用在无线超宽带通信系统中。

参考文献

- [1] AZARM B, NOURINIA J, GHOBADI C, et al. A compact WiMAX band-notched UWB MIMO antenna with high isolation [J]. *Radioengineering*, 2018, 27(4): 983-989.
- [2] KUNDU S. Balloon - shaped CPW fed printed UWB antenna with dual frequency notch to eliminate WiMAX and WLAN interferences [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(7): 1744-1750.
- [3] BEEGUM S F, MISHRA S K. Compact WLAN band-notched printed ultrawideband MIMO antenna with polarization diversity [J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2016, 61: 149-159.
- [4] KHAN A A, JAMALUDDIN M H, AQEEL S, et al. Dual-band MIMO dielectric resonator antenna for WiMAX/WLAN applications [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(1): 113-120.
- [5] KHAN M I, KHATTAK M I, WITJAKSONO G, et al. Experimental investigation of a planar antenna with band rejection features for ultra-wide band (UWB) wireless networks [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, 2019(1): 1-11.
- [6] REN J, MI D, YIN Y Z. Compact ultrawideband MIMO antenna with WLAN/UWB bands coverage [J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2014, 50: 121-129.
- [7] ELTRASS A S, ELBORAE N A. New design of UWB-MIMO antenna with enhanced isolation and dual-band rejection for WiMAX and WLAN systems [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 13(5): 683-691.
- [8] 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.
- [9] DEVANA V N K R, RAO A M. An Octagonal shaped MIMO UWB antenna with dual band notched characteristics [C]. *Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks*. Springer, Cham, 2019: 599-606.
- [10] SATAM V, NEMA S. Dual notched, high gain diversity antenna for wide band applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(5): 1222-1226.
- [11] LEE C H, WU J H, HSU C I G, et al. Balanced band-notched UWB filtering circular patch antenna with common-mode suppression [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2812-2815.
- [12] WANG L, DU Z, YANG H, et al. Compact UWB MIMO antenna with high isolation using fence-type decoupling structure [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(8): 1641-1645.
- [13] IBRAHIM A A, MACHAC J, SHUBAIR R M. Compact UWB MIMO antenna with pattern diversity and band rejection characteristics [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(6): 1460-1464.
- [14] RAHEJA D K, KANAUIA B K, KUMAR S. Compact four-port MIMO antenna on slotted - edge substrate with dual-band rejection characteristics [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(7): e21756.
- [15] WU L, XIA Y, CAO X, et al. A miniaturized UWB-MIMO antenna with quadruple band-notched characteristics [J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, 10(8): 948-955.
- [16] KHAN M S, CAPOBIANCO A D, IFTIKHAR A, et al. Ultra-compact dual-polarised UWB MIMO antenna with meandered feeding lines [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(7): 997-1002.
- [17] LUO S, WANG D, CHEN Y, et al. A compact dual-port UWB-MIMO antenna with quadruple band-notched characteristics [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2021, 136: 153770.
- [18] ZHAO X, RIAZ S, GENG S. A reconfigurable MIMO/UWB MIMO antenna for cognitive radio applications [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 46739-46747.
- [19] 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.
- [20] 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.

ZOU Y K, LIU H B, WANG B CH. Design of a miniaturized triple-notch ultra-wideband MIMO antenna [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2021(19):1-3.

- [21] SOHI A K, KAUR A. Triple band-stop characteristics from an aperture coupled modified Pythagorean tree fractal-based UWB-MIMO antenna integrated with complementary hexagonal spiral defected ground structure [J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications, 2021, 137:153805.

作者简介



高明明, 分别在 2003 年、2009 年和 2015 年于辽宁工程技术大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为智能射频技术、功放设计、建模和线性化技术。

E-mail: gaomingming2080@163.com

Gao Mingming received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Liaoning Technical University in 2003, 2009 and 2015, respectively. Now she is an associate professor in Liaoning Technical University. Her main research interests include intelligent RF technology, PA design modeling and linearization techniques.



王纪禹 (通信作者), 2020 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带天线、陷波多输入多输出天线等。

E-mail: 798360187@qq.com

Wang Jiyu (Corresponding author) received a B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2020 and is currently a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include ultra-wideband antennas, notch multi-input multi-output antennas.



南敬昌, 分别在 1993 年于辽宁工程技术大学获得学士学位及硕士学位, 2007 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等。

E-mail: nanjc886@sina.com

Nan Jingchang received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Liaoning Technical University in 1993 and 2003, Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2007, respectively. Now he is a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and devices, multimedia information coding, communication system simulation.



韩欣欣, 2020 年于辽宁科技学院获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带天线、多输入多输出天线等。

E-mail: 820611563@qq.com

Han Xinxin received a B. Sc. degree from Liaoning Institute of Science and Technology in 2020 and is currently a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include ultra-wideband antennas, multiple-input multiple-output antennas.