

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104337

紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究*

高明明^{1,2} 宋 杨¹ 南敬昌¹ 李春晨¹

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105; 2. 大连海事大学信息科学技术学院 大连 116086)

摘 要:针对当前超宽带多输入多输出(UWB-MIMO)天线存在尺寸大、隔离度低等缺陷,设计了一款紧凑型 UWB-MIMO 天线,天线尺寸仅有 41 mm×25 mm×1.6 mm。通过扳手形微带馈线扩宽天线的带宽,在天线的接地平面上引入锯齿形和梳状电磁带隙结构以获得较高的隔离度;加载 C 形枝节形成陷波以抑制 X 波段的下行频段对超宽带系统的干扰。实验结果表明,所设计的 UWB-MIMO 天线的阻抗带宽为 3.1~12.0 GHz,陷波频带为 7.0~7.9 GHz;在整个工作带宽内,隔离度大于 20 dB。设计的 UWB-MIMO 天线具有良好的辐射特性、稳定的增益和较低的包络相关系数($ECC<0.006$),适用于 UWB-MIMO 系统应用。

关键词:超宽带;MIMO 天线;陷波;EBG 去耦结构;隔离度

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

Research of a compact UWB-MIMO antenna with X band-rejected

Gao Mingming^{1,2} Song Yang¹ Nan Jingchang¹ Li Chunchen¹

(1. School of Electrics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116086, China)

Abstract: In order to meet the requirements of miniaturization and high isolation MIMO antenna in wireless communication system, a compact UWB multiple-input multiple-output (MIMO) antenna with high isolation between units is proposed. The antenna size is only 41 mm×25 mm×1.6 mm. The compact UWB MIMO antenna using a spanner microstrip line to widen bandwidth, Serrated grounding structure and comb-shaped electromagnetic band gap (EBG) structure on the ground plane of the antenna helps to obtain higher isolation, introducing C-shaped branches on the antenna discards worldwide interoperability for X-Band satellite downlink communication band. The optimization of various parameters proves that the proposed UWB-MIMO antenna satisfies the port reflection coefficient $S_{11}<-10$ dB in the 3.1~12.0 GHz band, and the notch band is 7.0~7.9 GHz, the isolation is greater than 20 dB in the entire working bandwidth. The UWB-MIMO antenna designed in this paper has good radiation characteristics, stable gain and low envelope correlation coefficient ($ECC<0.006$), which is suitable for UWB-MIMO system applications.

Keywords: ultra-wideband; multiple-input multiple-output antenna; band-notched; EBG decoupling structure; isolation

0 引 言

随着无线通信技术的快速发展,超宽带天线(ultra-wideband, UWB)以其高速率、低发射功率、低成本等优点受到极大关注^[1]。超宽带技术能够在室内定位^[2]、雷达^[3-4]、短距离通信等时域系统所划定的工作频段内实现良好的全向辐射特性。由于超宽带技术发射功率低仅适

用于短距离通信,为解决 UWB 通信的弊端,将 UWB 技术和多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统相结合,使用分集技术来增强信道容量并减少多径衰落。通过使用 MIMO 天线来增加系统容量,可以有效利用 UWB 天线的超宽带宽。近年来,有大量文献已经报道了消除 UWB-MIMO 天线之间相互耦合的技术和抑制多波段干扰的技术^[5-15]。文献[5]通过在 I 型接地平面上开十字槽提高天线的隔离度,使天线的隔离度达到了

收稿日期: 2021-05-22 Received Date: 2021-05-22

* 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)、辽宁省特聘教授项目(551806006)资助

20 dB, 天线尺寸为 $48\text{ mm} \times 33\text{ mm}$ 。文献[6]通过加载电磁带隙结构和正交放置的方法使天线的隔离度达到了 25 dB, 天线的尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。文献[7]提出了一种栅栏式去耦结构来提高天线的隔离度, 栅栏型去耦结构主要由许多大小相等的狭缝组成, 相当于一个空间滤波器, 使天线的隔离度达到了 25 dB, 天线的尺寸为 $50\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 。文献[8]通过使用 n 型切口实现高隔离度技术, 在 $n=2$ 时可以在结构复杂性和性能之间实现最佳折中, 隔离度高于 20 dB, 天线尺寸 $25\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 。文献[9]提出了一种共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 的 UWB-MIMO 天线, 通过单元天线的半切结构以及两个单元天线的正交放置, 实现了 18 dB 的隔离度, 天线尺寸为 $50\text{ mm} \times 28\text{ mm}$ 。文献[10]提出了一款新型的结合 UWB-MIMO 和平面电磁带隙 (uniplanar electromagnetic band gap, UC-EBG) 天线的设计。通过使用两个圆形辐射器实现 UWB-MIMO 天线, 使用 4×1 的 UC-EBG 阵列实现 MIMO 之间的解耦, 使天线的隔离度达到了 18 dB, 天线尺寸为 $46\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 。

上述的结构中都无法实现具有高隔离度的小型化 UWB-MIMO 天线的要求。为了解决上述问题, 本文提出了一种具有更小尺寸的 UWB-MIMO 天线, 该天线正面采用扳手形状的微带线馈电实现了超宽带的阻抗带宽, 采用锯齿型的去耦结构来提高天线的隔离度, 在天线上加载 C 型枝节实现在卫星 X 波段的下行频段 ($7.25 \sim 7.75\text{ GHz}$) 的陷波功能。天线尺寸紧凑 ($41\text{ mm} \times 25\text{ mm}$), 非常适合集成到便携式通讯设备中。且提出的天线设计结构简单, 易于制造。测试结果表明, 所提出的 UWB-MIMO 天线带宽为 $3.1 \sim 12.0\text{ GHz}$, 天线单元之间的隔离度均高于 20 dB。在工作频带上还具有良好的增益和辐射效率, 且天线包络相关系数 (envelope correlation coefficient, ECC) 低于 0.006。

1 天线设计

最终设计的 UWB-MIMO 天线的几何形状如图 1 所示, 结构尺寸为 $41\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ 。天线采用 FR4 材质作为印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 进行建模并制作实物, 该 PCB 的介电常数和损耗角正切分别为 4.4 和 0.02。天线由介质基板、基板顶部扳手形的矩形辐射贴片和底部的锯齿型接地结构组成。本节中将讨论天线的设计过程, 包括单极子超宽带天线的设计过程、天线的接地锯齿结构、天线的 EBG 结构和天线的陷波结构设计。

1.1 单个超宽带天线

该天线是由 $50\ \Omega$ 扳手形微带线馈电的带有阶梯形凹槽的矩形平面和矩形接地板组成的平面单极子天线。

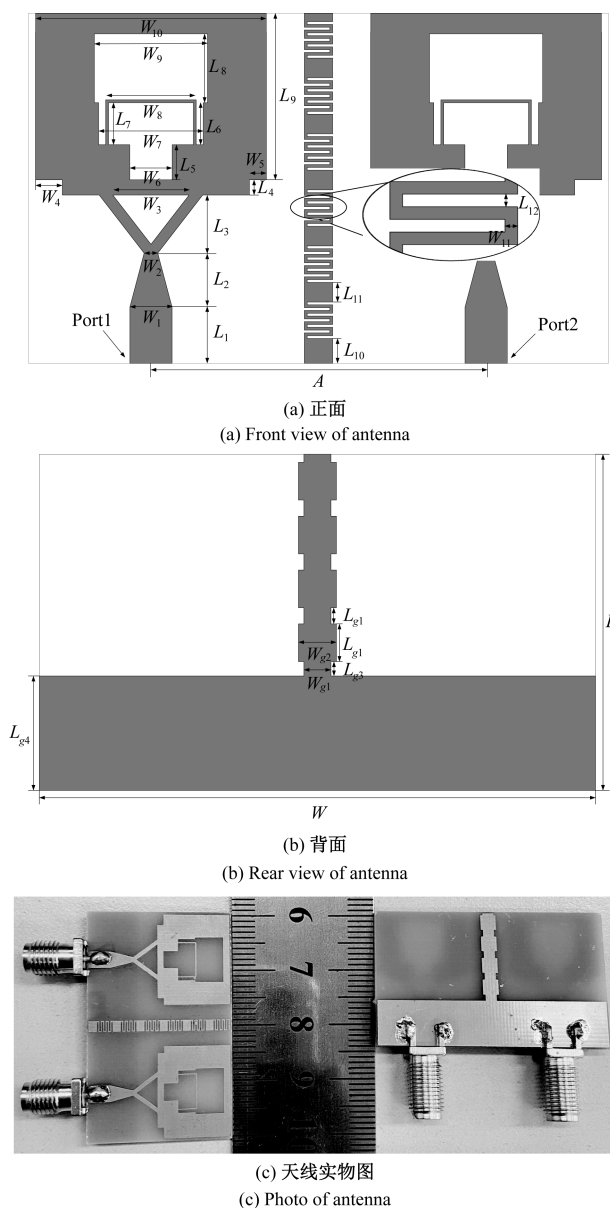
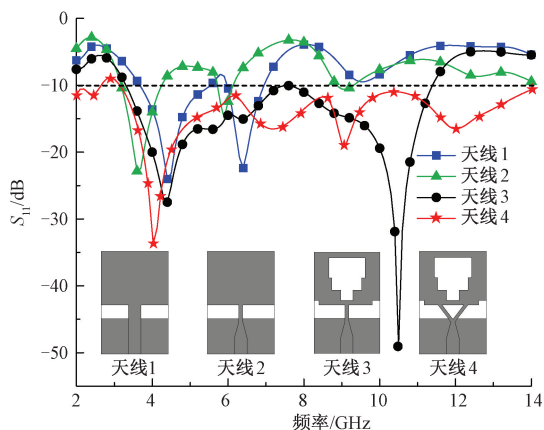


图 1 UWB-MIMO 天线的几何形状
Fig. 1 Geometry of the proposed UWB-MIMO antenna

通过 HFSS 电磁仿真软件对 4 种天线结构进行建模、仿真、优化, 图 2 所示为 4 种单极子天线结构的回波损耗 S_{11} 图。最终天线的整体尺寸为 $25\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ 。从图 1 可以看出, antenna1 具有双频带特性 ($3.1 \sim 4.2\text{ GHz}$ 和 $5.6 \sim 6.2\text{ GHz}$); 将 antenna1 的矩形微带馈电线改为阶梯形, 得到的 antenna2 在 4.4 和 6.3 GHz 处产生谐振, 天线的带宽得到了扩宽; 通过对 antenna2 的阶梯型馈电线优化为扳手形馈电线, 得到的 antenna3 的带宽扩展到 11.4 GHz, 但在 8 GHz 附近天线的 S 参数小于 10 dB; 最后, 将 antenna3 中的矩形辐射贴片进行下边缘和内部切割处理, 增大了天线表面的电流路径, 使得 antenna4 带宽为 $3.2 \sim 11.4\text{ GHz}$ 。

图2 单个超宽带天线结构演变过程以及 S_{11} Fig. 2 Evolution and S_{11} of a single UWB antenna

1.2 MIMO 天线的去耦结构设计

1) 天线的接地板设计

由于相邻天线元件的间距近,激发的表面波严重影响 MIMO 天线的性能,需要通过去耦结构来减小表面波的影响。有无解耦结构的隔离度对比如图 3 所示,图 3(a)中 Ant_A 在没有使用任何去耦结构时,天线的隔离度约为 10 dB,但这并不满足本文 UWB-MIMO 天线高隔离度的要求。结合图 3(b)与 Ant_A 相比, Ant_B 的隔离度得到了明显的改善。从上述分析可知,通过使用锯齿型接地结构充当反射器来分离辐射器之间的辐射,可以有效降低辐射器之间的耦合,但在 8.8~10.2 GHz 左右的隔离度低于 20 dB。

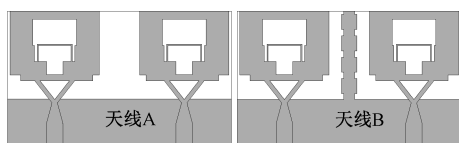
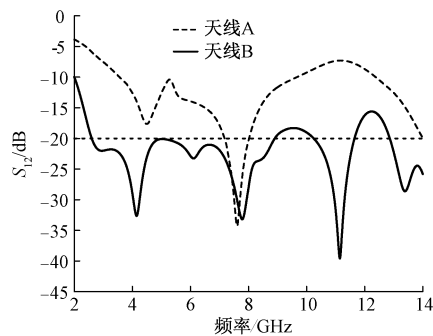
(a) 天线A和B结构对比
(a) Antenna A and B structure comparison(b) 天线A和B隔离度对比
(b) Isolation of Antenna A and B

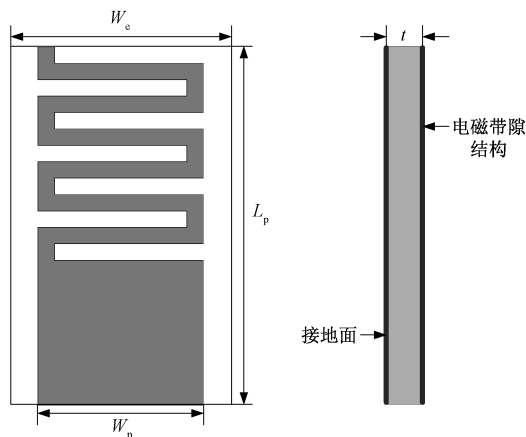
图3 有无解耦结构的隔离度对比

Fig. 3 Comparison of isolation with or without decoupling structure

2) 天线的 EBG 结构设计

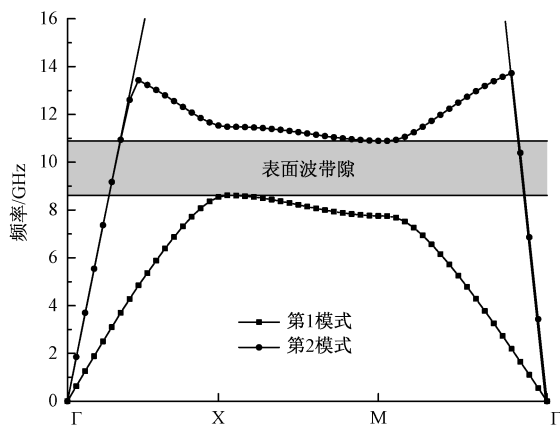
使用微带技术构建的电磁带隙结构是解除耦合问题的有效方法^[16]。图 4(a)所示为设计在 FR4 基板上的新型平面梳状 EBG 的几何形状。单元格的尺寸是 3 mm×4.37 mm。整体 EBG 结构是通过常规的矩形贴片并使用蜿蜒的微带线作为桥梁连接相邻的单元格来获得。该 EBG 结构的工作原理可以等效为 LC 谐振电路,以实现宽带隙特性。电感 L 是由电流流经细微带线产生,电容 C 是由相邻金属单元格贴片间的缝隙耦合产生。将细微带线弯曲会增加电感效应,并对扩大 EBG 结构的相对带宽有着显著效果。EBG 带隙的中心频率 ω_0 可以通过式(1)确定。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$



(a) UC-EBG结构的几何形状

(a) Geometry of proposed UC-EBG structure



(b) UC-EBG结构色散图

(b) Dispersion diagram of unit cell of proposed UC-EBG structure

图4 电磁带隙结构特性

Fig. 4 Characteristics of electromagnetic band gap structure

图 4(b)所示 EBG 结构色散曲线通过使用 HFSS 软件的本征模式求解器结合参数扫描,利用主从边界条件对周期性单元结构进行建模求解得到。可以观察到,第 1

模式和第 2 模式之间产生了 8.6~10.8 GHz 的阻带,在该阻带中电磁波无法进行传播,其中 Γ 、 X 、 M 为简约布里渊区的对称点。图 4(b) 中两条黑色倾斜斜线表示光在自由空间的速度。图 5 所示为该天线在 6 和 9 GHz 的表面电流分布。从图 5(a) 可以看出,在 6 GHz 处大量的电流耦合在天线的锯齿形背板上,从图 5(b) 可以看出,在 9 GHz 处大量的电流耦合在天线的 EBG 结构和锯齿形背板上。

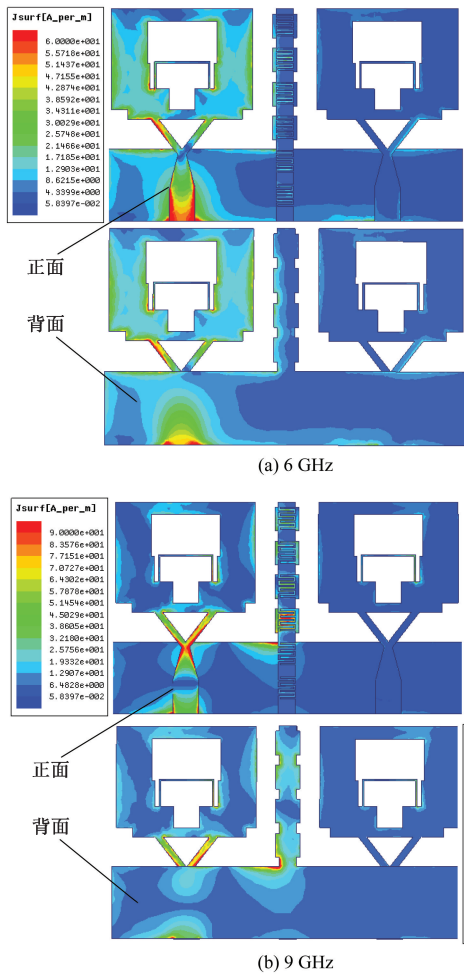


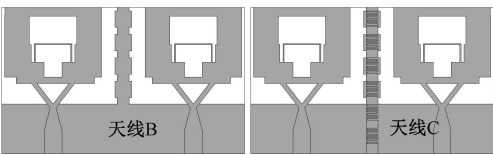
图 5 天线表面电流分布

Fig. 5 Surface current distributions of the proposed antenna

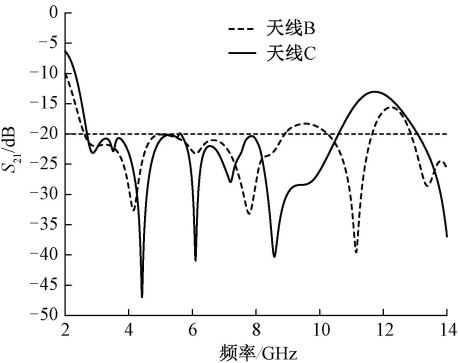
图 6 所示为添加 EBG 结构前后的天线的 S_{21} 的对比,从图 6 可以明显看出,锯齿形接地结构减少了 2.7~10.6 GHz 频段的相互耦合,EBG 结构可以在 8.6~10.5 GHz 处实现更好的去耦效果。

1.3 天线的陷波结构设计

为了抑制 X 波段下行频段的干扰,实现 UWB-MIMO 天线的陷波特性,在天线辐射器上引入 C 形枝节,通过调整陷波结构的尺寸及其位置来确定要抑制的频率范围。图 7 所示为添加陷波结构前后的输入回波损耗 S_{11} 对比



(a) 天线B和C结构对比
(a) Antenna B and C structure comparison



(b) 天线B和C隔离度对比
(b) Isolation of Antenna B and C

图 6 不同的接地板结构对 S_{21} 的影响

Fig. 6 Influence of different ground plate structures on S_{21}

结果。从图中可以看出,引入陷波结构后天线产生了 6.9~7.9 GHz 的陷波频段,有效抑制了 7.25~7.75 GHz 卫星 X 波段下行频段的干扰。通过观察天线的表面电流分布可以进一步了解陷波产生原理以及陷波结构与陷波频段的对应关系。

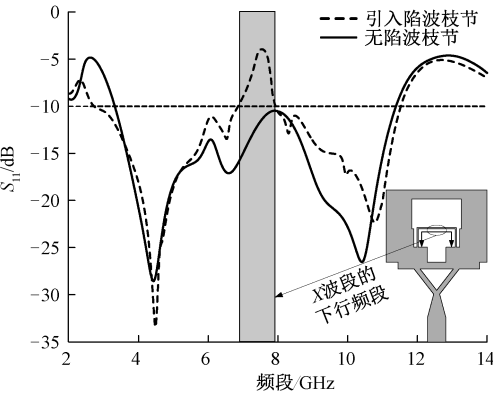


图 7 天线陷波结构对 S_{11} 的影响

Fig. 7 The influence of antenna notch structure on S_{11}

图 8 所示为激励端口 1 在 3.8、7.5 和 11 GHz 时获得的表面电流分布。其中,图 8(b) 辐射贴片上所加载的 C 形枝节改变了辐射贴片的电流分布,使表面电流集中分布在 C 形枝节附近,天线在该频率下不能有效地辐射,从而产生陷波。而在 3.8 和 10 GHz 频率处,表面电流均匀分布在天线的接地层、辐射器和馈线上,表明天线在整个通带频段上具有良好的 UWB 性能。从以上分析可知 C 形枝节在陷波的形成中起着重要作用。

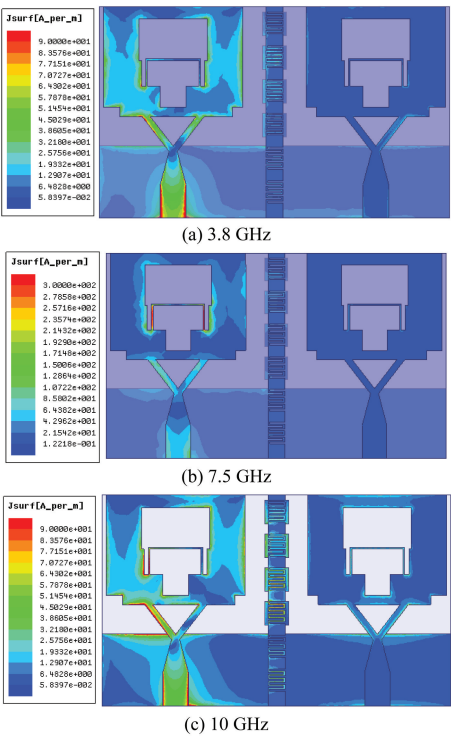


图 8 天线表面电流分布

Fig. 8 The current distribution in antenna surface

为了进一步了解 C 形枝节对陷波特性的影响,选择一个关键参数进行讨论。采用控制变量法研究 L_7 对 S_{11} 的影响,将 L_7 从 3.0 mm 增加到 3.6 mm,如图 9 所示,可以看出,陷波频段变化比较明显,中心频率从 7.0 GHz 移动到 7.5 GHz,说明 C 形枝节主要影响陷波的中心频率。陷波的中心频率 f_{notch} 可由经验式(2)表示。

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

$$L = 2 \times L_7 + W_8 \quad (3)$$

式中: c 为光速; $L=L_7 \times 2 + W_8$ 为 C 形枝节的总长度; ε_r 为相对介电常数。

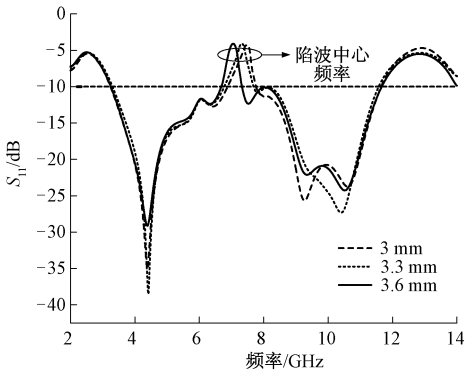


图 9 L_7 对 S_{11} 的影响

Fig. 9 Effect of L_7 on S_{11}

通过电磁仿真软件 HFSS 对所设计的天线尺寸进行仿真优化。最终,UWB-MIMO 天线的最优尺寸如表 1 所示。

表 1 天线的几何尺寸
Table 1 Antenna geometry

参数	数值/mm	参数	数值/mm	参数	数值/mm
L	25.0	L_{10}	1.77	W_3	5.40
L_p	4.37	L_{11}	1.40	W_4	1.90
L_1	4.00	L_{12}	0.20	W_5	1.20
L_2	3.86	L_{g1}	1.20	W_6	3.00
L_3	4.14	L_{g2}	2.80	W_7	7.40
L_4	1.10	L_{g3}	1.10	W_9	6.40
L_5	2.50	L_{g4}	8.50	W_{10}	16.3
L_6	3.00	W	41.0	W_{11}	0.20
L_7	3.00	W_p	2.00	W_e	3.00
L_8	4.90	W_1	3.00	A	23.7
L_9	11.9	W_2	1.00	t	1.6

为了进一步验证本文设计的 UWB-MIMO 天线性能,对天线进行实物制作并测量。UWB-MIMO 天线最终加工出来的 PCB 实际效果如图 1 所示。通过使用矢量网络分析仪,测量了天线的反射系数,隔离度,天线馈电端焊接 SMA-K 型连接器,天线与测试系统之间采用高频同轴电缆连接。此外,天线的方向图在微波暗室中测得。

2 实验仿真与测量

2.1 S 参数

图 10 所示为 UWB-MIMO 天线实测和仿真的 S 参数,可以看出,实测和仿真的 S_{11} 参数基本一致,而 S_{21} 在 10.6 GHz 之后存在较大误差,通过进一步误差分析得到误差主要是焊接 SMA 连接器所产生。测量结果表明,天线具有 3.1~12.0 GHz 的阻抗带宽 ($S_{11} < -10$ dB),满足了 UWB 应用的带宽要求,陷波频段为 7.0~7.9 GHz,可以抑制卫星 X 波段的下行频段对该超宽带天线的干扰。此外,在 2.8~13 GHz 的隔离度高于 20 dB,优于文献[5-7,9-10,12,14]的天线。

2.2 辐射特性

图 11 所示为 UWB-MIMO 天线在不同频率下 E 面和 H 面上测得的二维辐射方向图。由图 11 可知,在低频频率 4 GHz、中频频率 7 GHz 和高频 10 GHz 时的辐射特性图是全方位的,在给定的频率下的方向图是稳定的。

图 12 所示是天线的峰值增益和辐射效率图,可以看出,在除陷波频带外的整个频带上,测得的增益在 2.0~7.0 dBi 范围内,在陷波频带内降至 0 dBi,天线的辐射效率随增益具有相同的变化趋势。除陷波频段外,所有 UWB 频段的效率均保持在 80%以上。

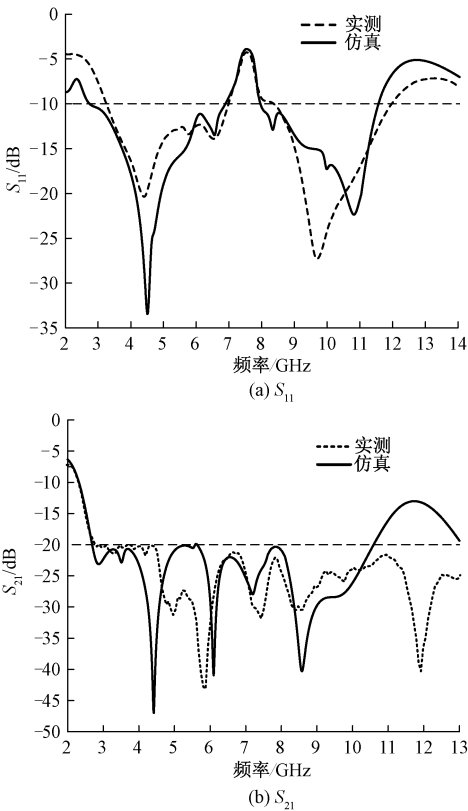


图 10 天线仿真和测量的 S 参数

Fig. 10 S parameters of antenna simulation and measurement

2.3 分集性能

包络相关系数 ECC 是一个重要的 MIMO 性能参数,它决定了天线元件之间的分集程度。在理想环境下, ECC 的值为 0,但在实际设计加工时,达不到理想值。为了在 MIMO 天线元件之间实现更高的分集, MIMO 天线元件必须满足 $ECC < 0.5$ 的标准^[17]。对于两端口 MIMO 天线,可以使用式(4)来计算 ECC ,式(5)计算 DG 。

$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)}$$
 (4)

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

天线的 ECC 和 DG 如图 13 所示。可以看出,除了陷波频带以外,整个通带带宽范围内的 ECC 都非常小 (< 0.002)。尽管 ECC 受这些陷波结构的影响,但在整个阻抗带宽上都小于 0.006,所获得的 ECC 值较低,满足 $ECC < 0.5$ 的标准。此外,天线的 DG 在整个阻抗带宽上都大于 9.96 dB。结果表明,所提出的天线具有较小的 ECC 和较大的 DG 。因此,所提出的天线系统在整个工作频带上显示出良好的 MIMO 性能。

表 2 为参考文献[5-13]与本文提出的天线性能的比较。首先天线的尺寸均小于文献[5-7,9-12,14],略大于

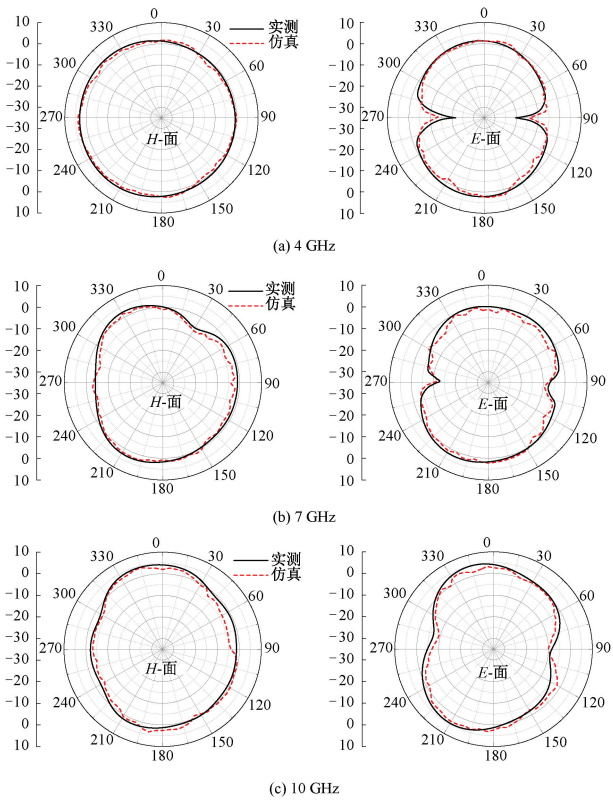


图 11 天线方向图

Fig. 11 The antenna radiation pattern

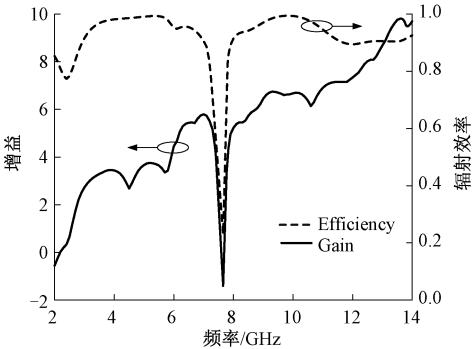


图 12 天线的增益与辐射效率

Fig. 12 Gain and radiation efficiency of antenna

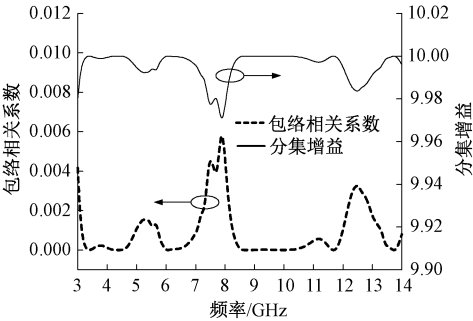


图 13 天线的 ECC 和 DG

Fig. 13 Antenna envelope correlation coefficient and diversity gain

文献[8,13],但比文献[8,13]具有更宽的带宽,更高的增益和更高的效率;天线的隔离度均高于文献[5-6,8-13],略低于文献[7],但比文献[7]具有更小的尺寸,更宽的带宽以及更高的增益和效率;其中天线的带宽尺寸比(bandwidth dimension ratio,BDR)可以明确的表明天线的紧凑性和宽频带特性^[18]。本文的 BDR 高于文献[6-7,

9-12,14],低于文献[5,8,13],但是比文献[5,8,13]具有更高的隔离度,更高的增益和更高的效率。总而言之,在天线性能相当的情况下,本文的尺寸在同类型中具有更紧凑的尺寸;在尺寸相当时,本文天线具有更高的性能。

表 2 本文设计天线与文献中天线对比
Table 2 Comparison of antennas in references and this paper

文献	天线尺寸	带宽/GHz	带宽比	相对带宽	带宽尺寸比	隔离度/dB	包络相关系数	增益	效率
文献[5]	48 mm×33 mm	2.0~13.7	6.85	149	2116	20	<0.15	1.1~4.3	NA
文献[6]	40 mm×40 mm	3.1~11.0	3.54	112	635	20	<0.004	3.1~5.9	NA
文献[7]	50 mm×35 mm	3.0~11.0	3.67	114	651	25	<0.004	3.0~6.0	>80
文献[8]	25 mm×32 mm	3.1~10.6	3.42	109	1580	20	<0.005	NA	>70
文献[9]	50 mm×28 mm	2.8~11.5	4.11	122	869	18	<0.12	NA	NA
文献[10]	46 mm×28 mm	3.6~17.6	4.89	132	706	18	<0.018	1.4~4.0	>78
文献[11]	40 mm×40 mm	3.1~10.6	3.42	109	619	20	<0.02	NA	NA
文献[12]	42 mm×26 mm	3.1~11.5	3.71	115	991	19	<0.01	1.2~2.91	>78
文献[13]	19 mm×30 mm	3.1~10.6	3.42	109	1758	18	<0.13	1.2~2.91	>70
文献[14]	48 mm×48 mm	2.5~12.0	4.8	131	818	15	<0.005	3~7	NA
本文	41 mm×25 mm	2.7~11.5	4.23	124	1396	20,部分 25	<0.006	2~9	>85

3 结 论

本文提出了一种新颖的具有高隔离度的紧凑型 UWB-MIMO 天线。设计的天线可实现 3.1~12 GHz 的阻抗带宽,在 7.0~7.9 GHz 频段具有陷波特性和抑制卫星 X 波段的下行波段的干扰。通过在接地平面中使用锯齿型接地结构和梳状 EBG 结构使天线在通带内具有高于 20 dB 的隔离度。该天线不仅价格低廉、体积小,同时具有良好的辐射特性,稳定的增益和非常低的 ECC,可广泛应用于无线通信系统中。

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.
NAN J CH, LIU Y L, GAO M M, et al. Research on a miniaturized fractal UWB antenna [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 18-25.

[2] 杨秀梓,王敬东,刘亚飞,等. UWB/惯性技术组合优化的室内定位技术研究[J]. 电子测量技术,2019, 42(15): 132-138.
YANG X Z, WANG J D, LIU Y F, et al. Research on indoor positioning technology optimized by UWB/inertial technology combination [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(15): 132-138.

[3] 张彦婷,林文斌,唐晋生.用于探地雷达的超宽带单极子天线设计[J]. 电子测量技术,2019,42(15): 65-68.
ZHANG Y T, LIN W B, TANG J SH. Ultra-wideband monopole antenna design for ground penetrating radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(15): 65-68.

[4] 王小瑞,侯兴松,王生霄.基于 YOLOv3 网络的超宽带雷达生命信号检测[J]. 国外电子测量技术,2019, 38(6): 1-8.
WANG X R, HOU X S, WANG SH X. Research on vital signal detection of UWB radar based on YOLOv3 network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 1-8.

[5] ALTAF A, IQBAL A, SMIDA A, et al. Isolation improvement in UWB-MIMO antenna system using slotted stub[J]. Electronics, 2020, 9(10): 1582.

[6] ALI W A E, IBRAHIM A A. A compact double-sided MIMO antenna with an improved isolation for UWB applications [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2017, 82: 7-13.

[7] 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.

[8] HAQ M A U, KOZIEL S. Ground plane alterations for design

- of high-isolation compact wideband MIMO antenna[J]. IEEE Access, 2018(6): 48978-48983.
- [9] 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.
- [10] DABAS T, GANGWAR D, KANAUIA B K, et al. Mutual coupling reduction between elements of UWB MIMO antenna using small size uniplanar EBG exhibiting multiple stop bands [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 93: 32-38.
- [11] RAJKUMAR S, AMALA A A, SELVAN K T. Isolation improvement of UWB MIMO antenna utilizing molecule fractal structure [J]. Electronics Letters, 2019, 55(10): 576-579.
- [12] BANERJEE J, KARMAKAR A, GHATAK R, et al. Compact CPW-fed UWB MIMO antenna with a novel modified Minkowski fractal defected ground structure (DGS) for high isolation and triple band-notch characteristic[J]. Journal of electromagnetic Waves and Applications, 2017, 31(15): 1550-1565.
- [13] KUMAR A, ANSARI A Q, KANAUIA B K, et al. An ultra-compact two-port UWB-MIMO antenna with dual band-notched characteristics [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2020, 114: 152997.
- [14] GAO P, HE S, WEI X, et al. Compact printed UWB diversity slot antenna with 5.5 GHz band-notched characteristics [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13): 376-379.
- [15] ZHANG S, PEDERSEN G F. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015(15): 166-169.
- [16] FARAHANI H S, VEYSI M, KAMYAB M, et al. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC-EBG superstrate[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9): 57-59.
- [17] ZHAO X, RIAZ S, GENG S. A reconfigurable MIMO/UWB MIMO antenna for cognitive radio applications[J]. IEEE Access, 2019(7): 46739-46747.
- [18] CHEN K R, ROW J S. A compact monopole antenna for super wideband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10): 488-491.

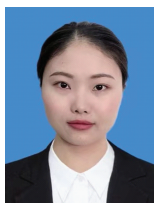
作者简介



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, 主要研究方向为射频电路与系统、射频器件行为模型建模、预失真技术、人工智能等。

E-mail: gaomingming2080@163.com

Gao Mingming received her B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Liaoning Technical University in 2003, 2009 and 2015, respectively. Now she is an associate professor at Liaoning Technical University. Her main research interests include RF circuit and system, RF device behavior modeling, predistortion technology and artificial intelligence, etc.



宋杨, 2018 年于郑州大学获得学士学位, 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和超宽带多输入多输出天线。

Email: 930324871@qq.com

Song Yang received her B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2018. She is currently a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include ultra-wideband antenna and UWB multiple-input multiple-output antenna.



南敬昌, 分别于 1993、2003 年在辽宁工程技术大学获得学士、硕士学位, 在 2007 年获得北京邮电大学的博士学位, 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、多媒体信息编码和通信系统仿真等。

E-mail: nanjc886@sina.com

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



李春晨, 2018 年于郑州大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为射频无源器件设计。

E-mail: 544969704@qq.com

Li Chunchen received his B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interest includes RF passive components design.