

应用 SRR/CSRR 去耦的毫米波 MIMO 天线 *

南敬昌 苏东蕊 高明 明 王艺扉

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105)

摘要:根据目前无线通信系统的发展趋势,为了大幅度地提高通信效率,针对 Ka 波段,设计了一款基于开口谐振环和互补开口谐振环的低耦合多输入多输出天线。天线整体尺寸为 40 mm×25 mm×1.2 mm。首先,该天线正面由带有空心圆的椭圆形辐射贴片、梯形微带馈线及开口谐振环组成,保证天线工作在 Ka 波段(26~40 GHz)。其次,该天线背面为刻蚀互补开口谐振环结构的矩形接地板,可以有效地达到去耦的目的,从而实现低耦合的效果。仿真与实测结果表明:工作带宽为 26~40 GHz(相对带宽达到 50%),回波损耗小于 -10 dB,耦合度均小于 -26 dB,包络相关系数小于 0.001,辐射方向图良好,增益稳定,辐射效率较高。由此,所设计的天线不仅结构简单、尺寸紧凑、频率覆盖范围广,且各项性能占优,可广泛应用于 5G 毫米波相关领域。综上,应用 SRR/CSRR 的技术使毫米波 MIMO 天线的互耦度得到了降低,验证了 SRR/CSRR 技术作为一种新型去耦技术的可行性和有效性。

关键词:SRR;CSRR;高隔离;毫米波;MIMO

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

Millimeter-wave MIMO antenna applying SRR/CSRR decoupling

Nan Jingchang Su Dongrui Gao Mingming Wang Yifei

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: According to the current development trend of wireless communication systems, in order to significantly improve the efficiency of communications, a low coupling multiple-input multiple-output antenna based on split ring resonator and complementary split ring resonator is designed for Ka-band. The overall dimensions of the antenna are 40 mm×25 mm×1.2 mm. First, the front side of the antenna consists of an elliptical radiating patch with a hollow circle, trapezoidal microstrip feedline and split ring resonator, to ensure that the antenna operates in the Ka-band(26~40 GHz). Second, on the back is a rectangular ground plate with a complementary split ring resonator, which can effectively achieve the purpose of decoupling. Thus realizing the effect of low coupling. Simulated and measured results show that, operating bandwidth of 26~40 GHz(the relative bandwidth of 50%), return loss less than -10 dB, coupling less than -26 dB, envelope correlation coefficient is less than 0.001, good radiation directional map, stable gain, high radiation efficiency. As a result, the designed antenna not only has a simple structure, compact size and wide frequency coverage, but also has superior performance. it can be widely used in 5G millimeter-wave related areas. In summary, the application of SRR/CSRR has led to the reduction of the mutual coupling of millimeter-wave MIMO antenna, the feasibility and effectiveness of the SRR/CSRR technique as a novel decoupling technique are verified.

Keywords:SRR; CSRR; high isolation; millimeter wave; MIMO

0 引言

随着无线技术的发展,人类社会全面进入了信息化时代。第四代(4G)技术已经被用于满足高数据速率的要求,但是其不满足于不断增加的用户数量的需求。这种需求促使无线技术转向第五代(5G)无线通信和毫米波(millimeter-wave)频谱^[1]。由于当前频谱已经过度拥堵,因此提出在毫米波频段范围内的多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)天线来提高数据速率和增大系统的容量^[2-4]。

尽管大部分毫米波频谱(30~300 GHz)相对未使用,但相对较低的频段优先用于通信,因此,许多学者设计出低耦合的 MIMO 天线^[5]。文献[6]采用缺陷地结构(defected ground structure, DGS)去耦,使得 MIMO 天线间的相关性降低。文献[7]用加载“T”形去耦枝节,来满足隔离度小于-15 dB 要求。文献[8]采用电磁带隙(electromagnetic band gap, EBG)结构,来解除耦合问题。虽然上述 MIMO 天线性能良好,但是去耦设计方法并不适合在高频部分。

对于此现象,提出了一种应用 SRR/CSRR 去耦的毫米波 MIMO 天线。通过将椭圆形辐射贴片空心化后,与梯形微带馈线相连,并加载开口谐振环(split-ring resonator, SRR)结构,使天线工作在 Ka 波段^[9]。在接地板正中间刻蚀一个互补开口谐振环(complementary split-ring resonator, CSRR)结构,用于去耦结构设计^[10]。天线整体尺寸为 40 mm×25 mm×1.2 mm,匹配带宽 26~40 GHz,隔离度小于-26 dB。

1 MIMO 天线结构设计与分析

1.1 MIMO 天线设计

设计的天线为 40 mm×25 mm,并选用 50 Ω 微带馈线来进行馈电。该天线是印刷在 FR4 介质基板上,其厚度设定为 1.2 mm。天线单元改进过程如图 1 所示。开始,选用椭圆形作为辐射贴片,通过改变天线表面电流的路径来拓宽天线的工作带宽,进而将天线的辐射贴片进行空心处理;接着,将矩形微带馈线变为梯形微带馈线。将单极子对称放置后在中间加载 SRR 结构。此时得到的天线仅为毫米波 MIMO 天线。

天线单元改进过程中 S_{11} 的变化如图 2 所示。由图 2 可知,天线 1 在 Ka 频段中对应的 S_{11} 高于-10 dB,不符合天线的设计。接着对贴片进行空心化处理得到天线 2,空心的实质是改变了电路的流经路径,进而改变了阻抗特性,使 S_{11} 有所降低,但还是存在阻抗失配。为了更好的提高天线的性能,通过改变微带馈线形状,将矩形馈

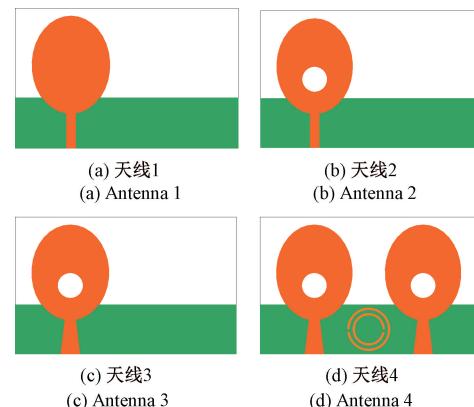


图 1 天线单元改进过程结构

Fig. 1 Antenna element improvement process

线变为梯形馈线,这样得到了单极子天线 3,只是在 28 GHz 及以下存在失配现象。再将其平行放置,形成二单元 MIMO 天线,并在中间添加 SRR 结构,得到天线 4。 S_{11} 在整个工作频段内低于-10 dB。

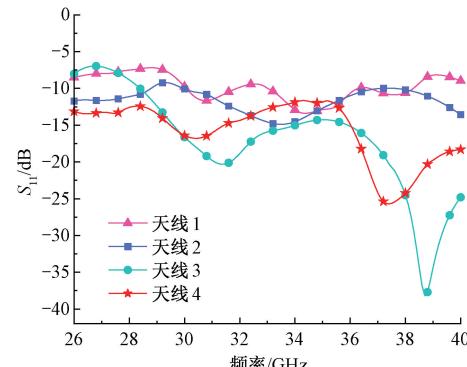


图 2 贴片改进过程中 S_{11} 变化图

Fig. 2 Variation diagram of S_{11} during patch improvement

1) SRR 结构

SRR 的基本结构是由两个半径不相等、缝隙相等的同心反向开口圆环组成^[11]。SRR 结构如图 3(a)所示,红色部分表示辐射贴片。

当有平行于 SRR 所在平面的外部磁场施加时,磁场的动态变化能够诱导金属环内产生感应电流,这一过程伴随着电流在环中循环流动,进而形成显著的等效电感效应。同时,由于电荷在金属环两端的非连续处(缺口)自然累积,形成了一个类似电容器的结构,即等效电容。而电容和电感一起便形成了闭合电路,激发出谐振现象^[12-13]。因此,SRR 可以有效地通过 LC 谐振电路模型来等效表示与理论分析,从而简化了对其特性的研究与理解。其等效 LC 串联谐振电路如图 3(b)所示。

其中, C_0 代表两个环路之间的总电容,可以用式(1)表示为:

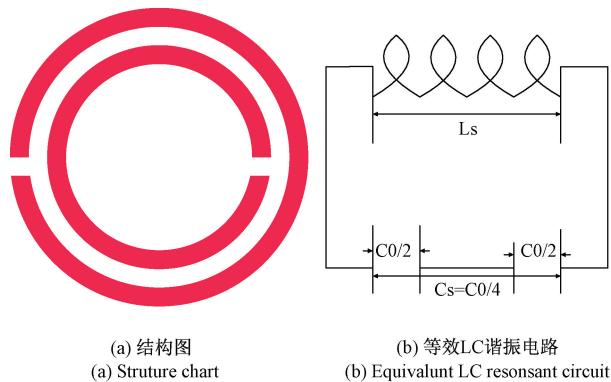


图 3 SRR 结构与等效 LC 谐振电路

Fig. 3 Structure and equivalent LC resonant circuit of SRR

$$C_0 = 2\pi d_m C_{pal} \quad (1)$$

式中: d_m 是两个环之间的平均长度, d_m 的值为 0.75 mm, C_{pal} 是环之间的每单位长度的电容。

SRR 环的串联电容和电感由式(2)可得:

$$C_s = C_0/4 \quad (2)$$

并且具有长度 d 的单个环的电感可以用于估计 L_s 。

SRR 的共振频率由式(3)确定可得:

$$f_0 = \frac{1}{2\phi\sqrt{L_s C_s}} \quad (3)$$

式中: L_s 为 SRR 总电感, C_s 为 SRR 总电容。

1.2 MIMO 天线结构分析

此时的天线仅符合毫米波频段, 并不符合 MIMO 天线低耦合的要求。为了得到较低的耦合, 在接地板上刻蚀 CSRR 结构。MIMO 天线结构图如图 4 所示。

经 HFSS 仿真软件的细致优化后, 天线结构的参数得到了精确的调整, 最终确定的参数如表 1 所示。

表 1 天线结构尺寸

Table 1 The dimensions of antenna structure (mm)

参数	数值	参数	数值
L	40.0	W	25.0
L1	3.6	W1	9.0
R	2.3	a	0.5
R1	2.5	R3	3.5
R2	3.0	R4	4.0

2 去耦结构设计与分析

2.1 去耦结构设计

MIMO 天线虽然满足 Ka 频段带宽要求, 但天线单元间的耦合强度极大。因此需要降低耦合, 天线去耦设计过程如图 5 所示。为了降低耦合, 加强磁响应, 在天线接地板 5 中心位置刻蚀掉一个 SRR 结构, 变成一个 CSRR 结构。

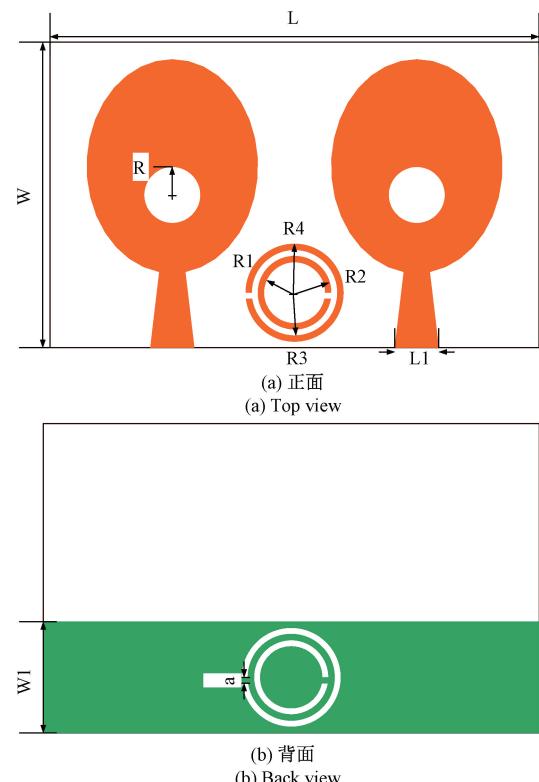


图 4 MIMO 天线结构图

Fig. 4 Geometry of MIMO antenna

结构^[14], 得到天线 6 接地板, 最终得到了低耦合的效果。

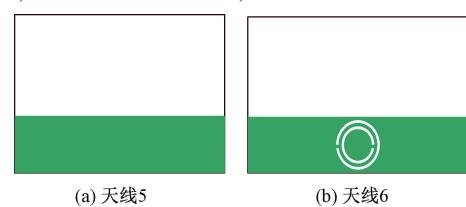


图 5 天线去耦设计示意图

Fig. 5 Antenna decoupling design diagram

天线去耦过程中, 带宽因去耦结构的设计而有所变化, 但 S_{11} 在 Ka 波段内仍符合要求。 S_{21} 的变化却很明显, 如图 6 所示。接地板为矩形时, 两单元之间相关性较强, S_{21} 大部分高于 -15 dB; 设计 CSRR 结构后, 产生谐振, 整体耦合降低, 使天线在 Ka 波段内隔离度小于 -26 dB。

2.2 去耦原理分析

1) CSRR 结构

CSRR 作为 SRR 的创新形态^[12], CSRR 与 SRR 的结构互补, 等效电路对偶。在黑色的接地板上, 刻蚀掉白色双环的 SRR 结构, 就可以得到 CSRR 结构图。如图 7(a) 所示。

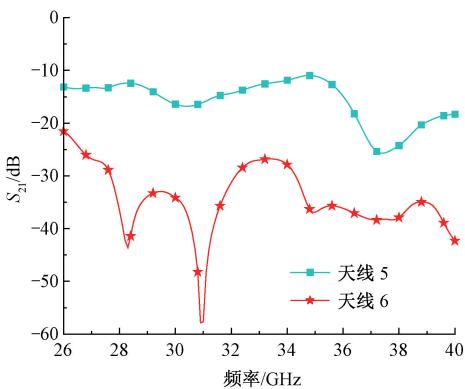
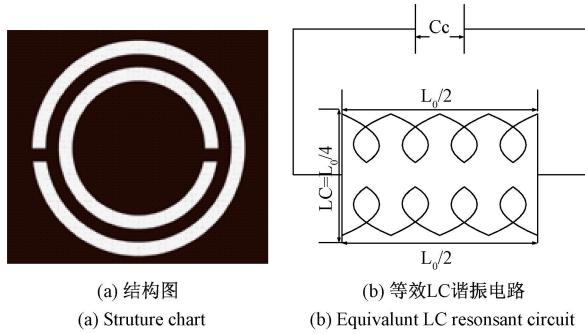
图 6 S₂₁ 变化图Fig. 6 Variation diagram of S₂₁

图 7 CSRR 结构与等效 LC 谐振电路

Fig. 7 Structure and equivalent LC resonant circuit of CSRR

从原理上讲,当电流沿着 CSRR 线圈流动时,CSRR 间隙和电感之间发生电压梯度。CSRR 与电场相互作用的能力改变了谐振频率附近的有效介电常数。当施加外部磁通量时,SRR 可以用作磁偶极子,并且当施加外部电场时,CSRR 可以用作电偶极子。其等效 LC 并联谐振电路如图 7(b)所示。

谐振中心频率和 CSRR 的大小总是相关的^[15]。CSRR 的整个周长可用式(4)表示。

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{f_n \sqrt{\epsilon_{eff}}} n = 1, 2, 3, \dots \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{er} + 1}{2} \quad (4)$$

其中, c 是光速(3×10^8 m/s), ϵ_{er} 是介电常数 4.4, ϵ_{eff} 是等效介电常数, L 是 CSRR 的总长度。CSRR 的谐振频率 f_n 可以被设置以获得传输系数 S_{21} 的谐振频率。为了提高阻带抑制效果,两个开口环的周长应该彼此足够接近。

通过用串联电容代替并联电感,并用并联电感器(式(5))代替串联电容器,可以使用对偶原理将 CSRR 表示为 LC 谐振器。

$$L_0 = 2\pi d_m L_{pal} \quad (5)$$

其中,每单位长度电感由 L_{pal} 表示。CSRR 环的串联电容和电感由式(6)确定。

$$L_c = L_0 / 4 \quad (6)$$

进而得到传输系数 S_{21} 的谐振频率 f_c 由式(7)确定。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (7)$$

式中: L_c 为 CSRR 总电感, C_c 为 CSRR 总电容。

SRR 和 CSRR 的参数满足关系式如式(8)~(9)所示。

$$C_c = 4 \frac{\epsilon}{\mu} L_s \quad (8)$$

$$C_0 = 4 \frac{\epsilon}{\mu} L_0 \quad (9)$$

式中: ϵ 和 μ 分别表示介电常数和磁导率。

为了天线的紧凑型,只采用了单个 CSRR 结构,可以作为一种滤波结构。阻碍两天线单元间的耦合电流,相当于增加了相互之间的距离,进而减少相关性,达到去耦目的^[16]。由图 6 可知,加入 CSRR 结构后在 Ka 频段内实现了隔离度的提升。

在 33 GHz 频率时,图 8 展示了天线系统的电流分布特性。由图 8 可知,左侧天线以及 CSRR 结构上电流显著增强,右侧天线则呈现出较弱的电流强度。说明了 CSRR 结构的引入有效抑制了天线单元间的表面波传播,阻碍了电流流动。因此,天线间的相关性得以降低,验证了 CSRR 结构在降低天线间耦合方面的有效性^[17]。

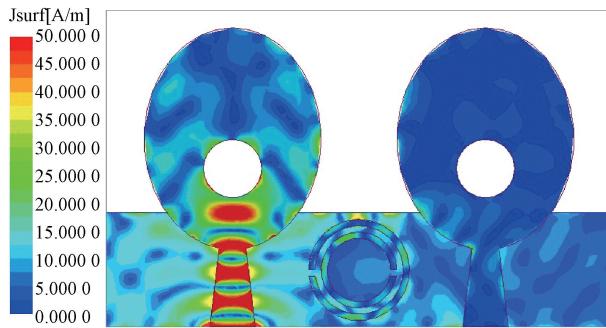


图 8 天线在 33 GHz 处电流分布情况

Fig. 8 Current distribution of the antenna at 33 GHz

3 实测与仿真结果分析

3.1 S 参数

毫米波 MIMO 天线实物如图 9 所示。对实物进行测试,得出 S 参数的实测结果,与 HFSS 仿真结果进行了对比分析,如图 10 所示。从图 10 中可以看出两次结果并不完全一样,原因可能是天线在焊接 SMA 接头时,有阻焊材料的掺入。引起一些误差,但整体上基本相似,对该天线的实际应用没有影响。

3.2 辐射方向图

天线辐射方向图是用来展示天线在不同方向上对电

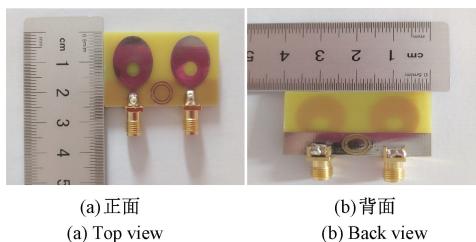


图 9 天线实物图

Fig. 9 Physical diagram of the antenna

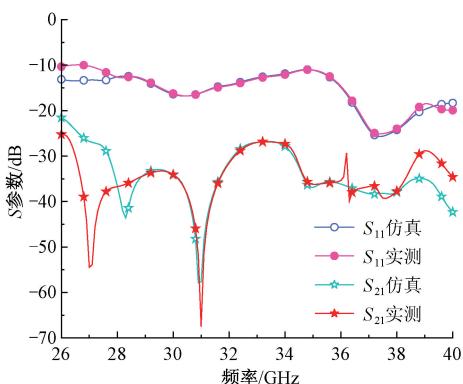


图 10 S 参数仿真与实测结果

Fig. 10 The simulation and measurement results of S-parameter

磁信号的接收和发送的效能,还描绘了距离天线特定范围内的辐射场。通常分为 E 面和 H 面。天线在 30 GHz、34 GHz、38 GHz 处的 E 面、H 面方向图如图 11 所示。从

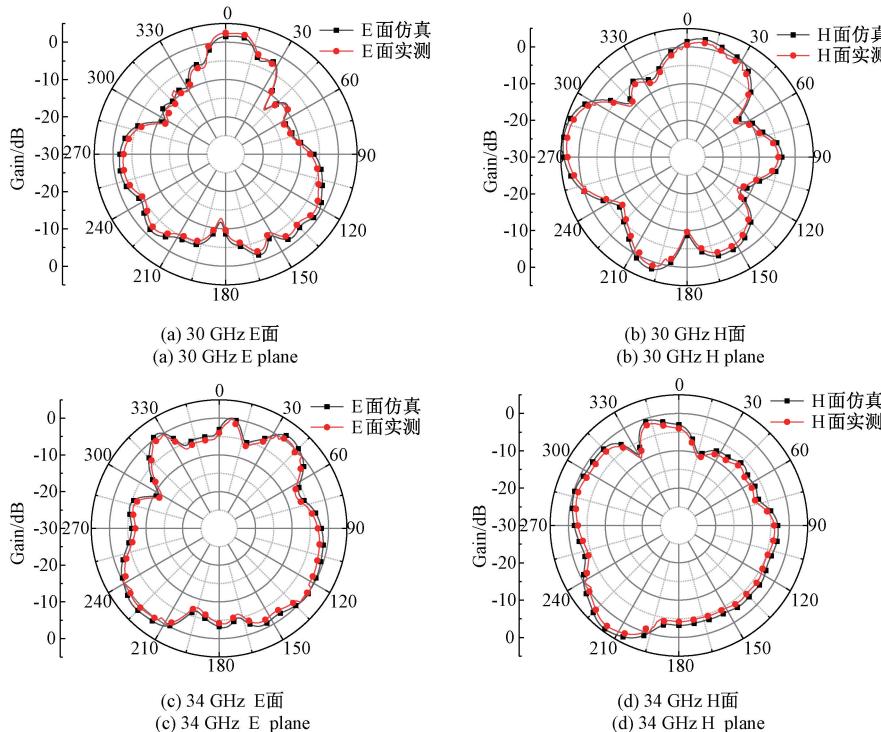


图 11 可以看出,随频率的升高,方向图产生畸变,这也是毫米波天线中不利的一面。

3.3 包络相关系数(ECC)

包络相关系数(ECC)是表示 MIMO 系统隔离度的一个关键参数。为了体现 MIMO 天线的良好性能,需要降低两天线间的相关性。理想情况下,ECC 值为 0,但由于各种因素的干扰,规定 ECC 值小于 0.5 即可。MIMO 天线的 ECC 值可以通过由仿真与实测获取的 S 参数值代入式(10)计算得到:

$$ECC =$$

$$\frac{|S_{11}^*S_{12} + S_{21}^*S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (10)$$

式中: S_{11}^* 为 S_{11} 的共轭值; S_{21}^* 为 S_{21} 的共轭值^[18]。

MIMO 天线的 ECC 如图 12 所示,从图中可知,天线的包络相关系数(ECC)小于 0.001,在规定的范围之内。

3.4 增益与辐射效率

天线的增益和辐射效率是判断天线性能优良的重要参数。图 13 为天线的增益和辐射效率图,从中得知,在 Ka 频段内天线增益稳定,但谐振处有上升趋势,分别上升至 9 dBi 左右。而辐射效率与增益的变化趋势一致,在 Ka 波段内的辐射效率为 75% 左右。

3.5 性能对比

设计的天线与其他的天线进行比较,如表 2 所示。根据天线的介质基板,与文献[11,19-22]相比,天线工作在 Ka 频段内,同时选用性价比更高的 FR4 材料作为介

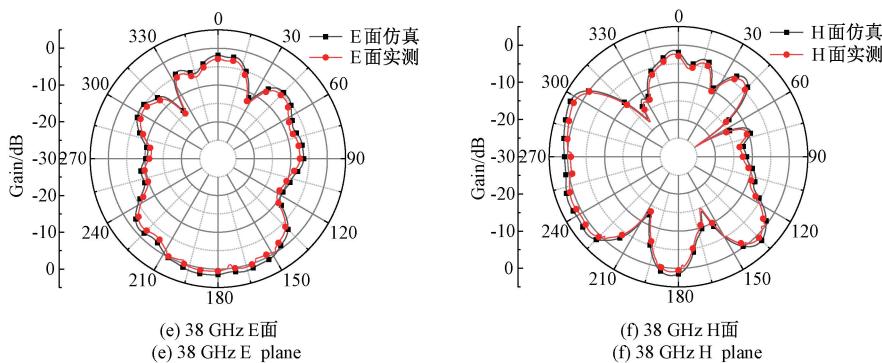


图 11 天线辐射方向图

Fig. 11 Radiation patterns of the antenna

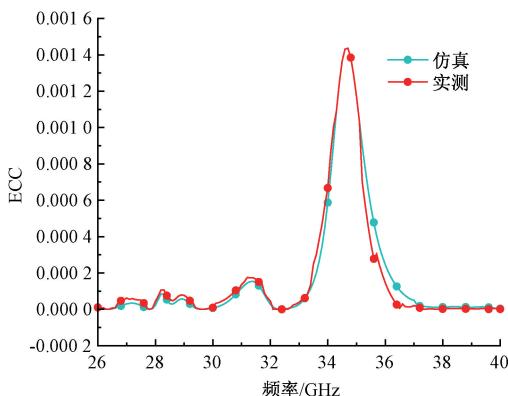


图 12 ECC 仿真与实测结果

Fig. 12 The simulation and measurement results of ECC

质基板；根据现有去耦方法，与文献[6,14,23-24]设置缺陷地结构、电磁带隙以及谐振环等相比，采用CSRR结构去耦，得到的天线不仅工作在Ka频段内，还有更低的耦合系数。

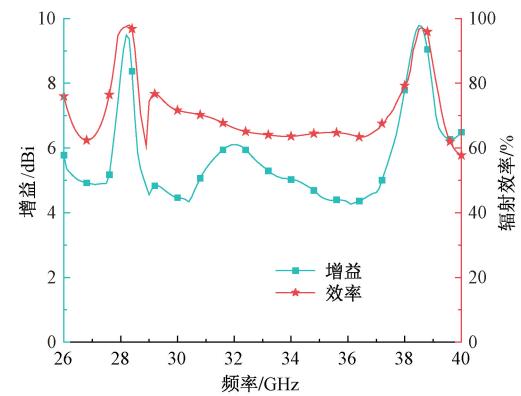


图 13 天线的增益与辐射效率

Fig. 13 Gain and radiation efficiency of antenna

合和更小的包络相关系数。一系列相比之下,此天线设计方法新颖独特,去耦效果显著,为毫米波 MIMO 天线的设计提供了一种参考方案。

表 2 天线性能参数对比

Table 2 Comparison of antenna performance parameters

文献	板材	尺寸/mm	工作带宽/GHz	隔离度/dB	ECC	方法
[11]	Rogers RO 4003	15×15×0.3	26~40	-30	0.001	SRR
[19]	Rogers RO 4003	47×25.25×0.3	24~32	-15	0.1	CSRR
[20]	Rogers RT 5880	30×35×0.787	27.5~28.5	-40	0.0003	DGS
[21]	Rogers RT 5880	12×25.4×0.8	26.5~38.2	-15	0.03	DGS/CSRR
[22]	Rogers RT 5880	28.3×28.3×0.508	26.5~30.4	-40	0.0001	DGS/CSRR
[23]	FR4	47×38×0.8	2~11	-25	0.003	EBG
[24]	FR4	20×34×1	2.46~13.98	-21	0.003	SRR
[14]	FR4	30×30×1.6	2.8~18	-18	0.02	CSRR
[6]	FR4	18×22×1	2.75~10.64	-22	0.015	DGS
[本文]	FR4	40×25×1.2	26~40	-26	0.001	SRR/CSRR

4 结 论

本文提出了一款应用 SRR/CSRR 去耦的毫米波

MIMO 天线。由带有空心的椭圆辐射贴片、梯形馈线和 SRR 结构组成,实现了毫米波中的 Ka 频段;CSRR 结构的设计,降低天线单元间的耦合度。最终,设计的天线尺寸为 $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$,工作在 Ka 频段,耦合小于

-26 dB，包络相关系数极小，增益比较稳定，辐射效率良好。一系列结果证实了 SRR/CSRR 技术在去耦方面的有效性。因此，可以将此技术广泛应用于 5G 毫米波领域中。

参考文献

- [1] IMRAN M K, SARMADULLAH K, HASSAN S K, et al. A compact mm wave MIMO antenna for future wireless networks[J]. Electronics, 2022, 11(15):2450.

[2] 李凯佳,杜成珠,郑炜晴,等.一种新型六边形宽带毫米波 MIMO 天线[J].上海电力大学学报,2021,37(1):89-93.

LI K J, DU CH ZH, ZHENG W Q, et al. A new hexagon wideband millimeter wave MIMO antenna[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(1):89-93.

[3] 邵斌,郑国莘.39.5 GHz 室内走廊环境毫米波 MIMO 信道特性研究[J].电子测量技术,2019,42(18):1-7.

SHAO B, ZHENG G SH. Investigation of 39.5 GHz mm-wave MIMO channel characterization for a corridor environment [J]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(18):1-7.

[4] CHEN Z, SONG W, WANG W. Wideband millimeter-wave MIMO antenna with a loaded dielectric cover for high-gain broadside radiation [J]. Electronics, 2023, 12(21):4384.

[5] KUMAR A D, KALLOLU N N, VIVEK S, et al. UWB-MIMO DGS loaded patch antenna with low profile for millimeter-wave applications [J]. Journal of Electrical Engineering, 2022,73(1):28-35.

[6] 南敬昌,韩欣欣,高明,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.

NAN J CH, HAN X X, GAO M M, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antenna based on DGS [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(5):89-95.

[7] 高明,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.

GAO M M, WANG J Y, NAN J CH, et al. Design of a compact triple-notch UWB-MIMO antenna[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6):144-151.

[8] 高明,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, SONG Y, NAN J CH, et al. Research of a compact UWB-MIMO antenna[J]. Journal of Electronic

CUPL E, LI J, WU H D, et al. Design of Ku band millimeter-wave slot antenna based on substrate-integrated wave guide[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(3):12-16.

[10] WANG F, DUAN Z, WANG X, et al. High isolation millimeter-wave wideband MIMO antenna for 5G communication[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019: 1-12.

[11] VERMA U, SINGH M P, GHOSH S. Dual band millimeter wave MIMO antenna loaded with SRRs for 5G applications [C]. 2022 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS). IEEE, 2022.

[12] 南敬昌,韩欣欣,高明,等.一种 K 波段小型化 MIMO 天线设计[J].电子元件与材料,2022,41(10):1085-1092.

NAN J CH, HAN X X, GAO M M, et al. Design of a K-band miniaturized MIMO antenna [J]. Electronic Components and Materials, 2022,41(10):1085-1092.

[13] 杨靖.基于双面多开口谐振环结构的太赫兹波微带天线设计[D].武汉:武汉理工大学,2019.

YANG J. Design of THz-wave microstrip antenna based-on dual-surfaced multiple split-ring resonators [D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2019.

[14] KESHRI P K, SAHU S K, CHANDEL R. CSRR-loaded compact quad port MIMO diversity antenna for UWB applications [J]. IETE Journal of Research, 2023, 69(10): 6709-6719.

[15] NURHAYATI N, ZULKIFLI F Y, SETIJADI E, et al. Bandwidth, gain improvement and notched-band frequency of SWB wave coplanar vivaldi antenna using CSRR[J]. IEEE Access, 2024.

[16] MUHAMMAD B, IFFAT S N, NIAMAT H, et al. High-isolation MIMO antenna for 5G millimeter-wave communication Systems [J]. Electronics, 2022, 11(6): 962.

[17] 杜忠红.具有高隔离度的超宽带 MIMO 天线的研究与设计[D].西安:西安理工大学,2020.

DU ZH H. Research and design of ultra-wideband MIMO antenna with high isolation[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2020.

[18] 南敬昌,潘俊汝,高明,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.
- [19] MISHRA P, SINGH M P, GHOSH S. A compact dual band millimeter-wave CSRR loaded MIMO antenna array system for 5G applications [C]. 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON). IEEE, 2022.
- [20] BILAI M, NAQVI S I, HUSSAIN N, et al. High-isolation MIMO antenna for 5G millimeter-wave communication systems [J]. Electronics, 2022, 11(6): 962.
- [21] VENKATESWARA RAO M, MADHAV B T P, KRISHNA J, et al. CSRR-loaded T-shaped MIMO antenna for 5G cellular networks and vehicular communications [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(8): e21799.
- [22] GHOSH S, BAGHEL G S, SWATI M V. Design of a highly-isolated, high-gain, compact 4-port MIMO antenna loaded with CSRR and DGS for millimeter wave 5G communications [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2023, 169: 154721.
- [23] KAPURE V R, RATHOD S S. A two element EBG-inspired UWB MIMO antenna with triple band notched characteristics and high isolation [J]. Sādhāna, 2023, 48(1): 7.
- [24] SEDIQ, H T. Miniaturized MIMO antenna design based on octagonal-shaped SRR metamaterial for UWB applications [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2023, 172: 154946.

作者简介



南敬昌,在 1993 年、2003 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、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 circuitries and devices, and communication system simulation.



苏东蕊(通信作者),2022 年于辽宁科技大学获得学士学位,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、多输入多输出天线、毫米波天线等。
E-mail: 1752366094@qq.com

Su Dongrui (Corresponding author) received a B. Sc. degree from Liaoning Institute of Science and Technology in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include ultra-wideband antennas, multiple-input, multiple-output antennas and Millimeter-wave antennas.



高明明,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。
E-mail: gaomingming2080@163.com

Gao Mingming received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Liaoning Technical University in Liaoning Technical University in 2003, 2009 and 2015, respectively. Now she is an associate professor in Liaoning Technical University. Her main research interest includes intelligent RF technology.



王艺扉,在 2019 年于辽宁科技学院获 得学士学位,2022 年于辽宁工程技术大学 获得硕士学位,现为辽宁工程技术大学讲师,主要研究方向为可重构超宽带天线和多 频天线等。
E-mail: 1052932573@qq.com

Wang Yifei received his B. Sc. degree from Liaoning Institute of Science and Technology in 2019, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022, respectively. Now he is a teacher in Liaoning Technical University. His main research interests include reconfigurable ultra-wideband antennas and multi-frequency antennas.