引用格式：胡瑶, 王永顺, 闫宁宁, 等. 基于 CSRR 去耦合结构的八单元紧凑型宽带 MIMO 天线 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(3): 321-332.
HU Y, WANG Y S, YAN N N, et al. Compact eight-element wideband MIMO antenna based on CSRR- decoupling technique[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(3): 321-332.

基于 CSRR 去耦合结构的八单元紧凑型宽带 MIMO 天线

胡　瑶[1, 2*]，王永顺[1]，闫宁宁[3]，张利军[1, 4]，范军强[5]

（1. 兰州交通大学电子与信息工程学院，兰州 730070；2. 兰州交通大学机电工程学院，兰州 730070；3. 天津大学微电子学院，天津 300072；
4. 甘肃工业职业技术学院，天水 741025；5. 甘肃睿阳科技有限公司，天水 741000）

摘要：针对 5G 无线通信系统中多输入多输出（MIMO）天线单元间互耦效应导致系统性能下降的问题，提出了一种面向 Wi-Fi 应用场景的改进型并联组合 CSRR 去耦合结构的八单元 MIMO 天线。该天线基于互补开口谐振环（CSRR）去耦技术，实现了紧凑型结构、宽频带特性与优异隔离性能的协同优化。实测结果表明：天线−10 dB 阻抗带宽为 19%，在 5.50～6.66 GHz 工作频段内，端口 1 与端口 2、端口 8 之间的隔离度分别优于 16.7 dB 和 13.7 dB；天线系统辐射效率为 50%～86%，峰值增益为 3.28 dBi，包络相关系数低于 0.1，分集增益优于 9.91 dB，各项指标均满足 5G 移动终端应用需求。通过分析 CSRR 几何构型与空间排布对系统性能的影响，揭示了并联组合 CSRR 结构通过谐振阻带效应、表面波抑制和近场电场重构三重协同机制，显著提升了天线单元间的隔离度。研究结果为高性能 MIMO 天线的去耦设计提供了理论依据和技术路径。

关键词：多输入多输出天线；Wi-Fi；互补开口谐振环；宽带；隔离
中图分类号：TN82　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12178/1001-0548.2025055

Compact eight-element wideband MIMO antenna based on CSRR- decoupling technique

HU Yao[1, 2*], WANG Yongshun[1], YAN Ningning[3], ZHANG Lijun[1, 4], and FAN Junqiang[5]

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Gansu Industy Polytechnic College, Tianshui 741025, China;
5. Gansu Ruiyang Technology Co., Ltd., Tianshui 741000, China)

Abstract: To address the degradation of system performance caused by mutual coupling among antenna elements in multi-input multi-output (MIMO) systems for 5G wireless communications, an eight-element MIMO antenna based improved parallel-combined CSRR decoupling structure design tailored for WiFi applications is proposed. The mutual coupling effect among the MIMO antenna units in a 5G wireless communication system leads to a degradation of the system performance. To address this issue, an improved parallel combined CSRR (complementary split-ring resonator) decoupling structure for an eight-element MIMO antenna design tailored for WiFi application scenarios is proposed. The antenna employs a decoupling technique based on CSRRs, achieving an optimal balance among compact structure, wideband operation, and high isolation performance. Experimental results demonstrate that the antenna achieves a −10 dB impedance bandwidth of 19%, with isolation levels of S_{21} > 16.7 dB and S_{81} > 13.7 dB within the 5.50 GHz to 6.66 GHz operating band; and the antenna system achieves a radiation efficiency of 50% to 86%, a peak gain of 3.28 dBi, an envelope correlation coefficient (ECC) below 0.1, and a diversity gain exceeding 9.91 dB, meeting the requirements for 5G mobile terminal applications. By analyzing the impact of CSRR geometric configurations and spatial arrangements on system performance, this study reveals that the parallel-combined of CSRR structure enhances the isolation through a triple synergistic mechanism comprising resonance band-stop effect, suppression of surface waves, and near-field electric field reconstruction. The research findings provide theoretical insights and technical pathways for the decoupling design of high-performance MIMO antennas.

收稿日期：2025−03−13
基金项目：甘肃省科技计划项目（23JRRA1704）；甘肃省重点研发计划（22YF7GE202）；甘肃省科技计划（18JR3RA104）
作者简介：胡瑶，博士生，主要从事 MIMO 天线设计、天线理论与技术方面的研究。
*通信作者 E-mail: hy@mail.lzjtu.cn

Key words: multiple input multiple output antenna; Wi-Fi; complementary split-ring resonator; wide bandwidth; isolation

随着现代无线通信技术的飞速发展，单输入单输出天线已经难以满足高速率、高密度数据传输、低延迟以及连接海量终端的需求。多输入多输出（multi-input multi-output, MIMO）天线系统凭借其能够显著提升信道容量、增强数据传输速率和可靠性等优势，成为微波和信息系统领域研究与应用的焦点，是 5G 通信中最关键的技术之一[1]。然而，为了满足高速率和大容量的传输需求，天线单元数量不断增加，终端设备和基站对天线的可用空间愈发紧凑。在此背景下，天线单元间不可避免地存在较强的相互耦合。这种互耦产生的干扰成为了制约通信系统性能提升的关键因素[2]，导致辐射方向图失真、增益降低以及信道相关性增加[3]，影响系统的数据吞吐量和整体通信质量[4]。

为解决 MIMO 天线的互耦抑制问题，提升不同端口之间的收发独立性，国内外学者提出了大量互耦抑制的方法与技术[5]。根据其工作原理，这些解耦方法大致可分为两类：1）通过引入幅度相等但相位不同的额外耦合路径来抵消原来的耦合路径，如中和线（NLs）[6-8]、寄生元件 (PE)[9] 和解耦网络[10-11] 等结构；2）通过抑制或阻碍天线元件之间的电场耦合或者表面电流流动，实现解耦效果，常用方法包括超材料[12-13]、电磁带隙结构（EBG）[14-16] 或缺陷地平面（DGS）[17-18]。其中，互补开口谐振环（complementary split ring resonator, CSRR）结构作为一种电磁带隙结构，为后续抑制天线之间的耦合奠定了基础，且已发展出多种创新结构。文献 [19-20] 分别提出了两款采用 CSRR 这种具有单负介电常数去耦结构的 MIMO 天线，这两款天线在加载 CSRR 结构后，天线地板表面波发生的耦合得到了抑制并且天线本身的工作特性基本没有受到影响。文献 [21] 提出的四端口 MIMO 天线，通过在接地板刻蚀单一 CSRR 结构，在 2.4 GHz 频段实现了 22 dB 的隔离度提升，但工作带宽窄（相对带宽约为 3%）。随着 5G 通信的发展，研究者们尝试通过多环耦合拓展带宽，如文献 [22] 提出的双频 CSRR 结构，在 3.28～3.62 GHz 频段以及 4.78～5.04 GHz 频段内隔离度均达 17 dB 以上；文献 [23] 应用 CSRR 单元抑制流过 UWB MIMO/分集天线接地平面的电流干扰，实现了从 3～12 GHz 的整个超宽带内互耦低于−15 dB 的水平。文献 [24] 将 CSRR 应用于毫米波 MIMO 天线，通过阵列化设计在 26～49 GHz 实现了低耦合。虽然以上提出的基于 CSRR 结构的互耦抑制技术在一定程度上提高了 MIMO 系统的隔离性能，但大多面临带宽与隔离度的权衡矛盾、空间利用率低下、方向图失真等问题。因此，探寻高效、紧凑且适用于小型宽带 MIMO 天线的去耦合技术仍是当前天线技术领域的重要研究方向。

在移动终端 Wi-Fi 应用中，MIMO 天线凭借结构紧凑、集成度高以及端口独立性强等优势，已成为主流的收发天线设计方案。其中，微带印刷天线因其低剖面、低成本且易于与电路集成等优势，被广泛应用于 MIMO 天线设计中。现有研究已取得了一定进展，如文献 [25] 提出了一种基于共用辐射单元的双极化双端口 MIMO 天线，利用寄生元件结构在 Wi-Fi 2.4 GHz 频段实现了优于 15 dB 的端口隔离度。文献 [26] 设计的高增益宽带偶极子阵列天线由 4 个天线单元和功率分配网络组成，在整个工作频带内实现了稳定定向辐射及低副瓣特性。文献 [27] 所提出的兼容 2.45 GHz 和 5 GHz 的双频偶极子天线也为 Wi-Fi 系统多频段天线设计提供了有益参考。然而，目前大多数 Wi-Fi MIMO 天线仍面临剖面高度高、工作带宽受限等不足，如棒状天线和传统偶极子天线等，限制了其在便携式设备中的推广应用。

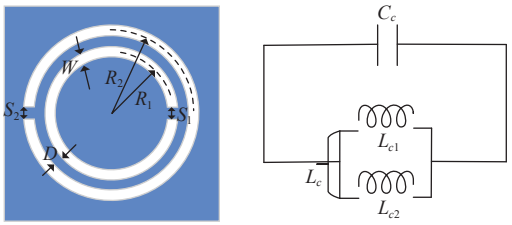
综上所述，本文围绕 WiFi 天线小型化、宽带化、低耦合的设计需求，运用天线的辐射机理和 CSRR 去耦合技术，提出了一种改进型并联组合 CSRR 去耦合结构的八单元紧凑型宽带 MIMO 天线。

1 CSRR 去耦结构分析

1.1 CSRR 结构特性分析

开口谐振环 （split ring resonator, SRR）是一种具有特殊电磁特性的谐振结构，其结构由两个半径不相等、缝隙相等的同心反向开口圆环组成[28]。该结构可以在外部时变磁场的激励下可产生磁谐振响应，形成具有负磁导率特性的磁单负材料（magnetically negative material, MNG），进而产生电磁禁带效应。

CSRR 是 SRR 的互补形式，通过在接地板上刻蚀掉 SRR 的双环结构形成。CSRR 具体结构与等效电路如图 1 所示。



a. CSRR结构图　　b. 等效LC谐振电路

图 1　CSRR 结构与等效 LC 谐振电路

CSRR 结构通常由两个同心反向开口的环形槽组成，如图 1a 所示。根据电磁场巴比涅原理，满足互补条件的问题可以看作是一个对偶问题，其场分布满足对偶关系。相应的，CSRR 在电流激励下，依据电磁感应定律，其环形结构将产生感应电动势，并在开口间隙与电感元件间形成电势梯度。当 CSRR 受外部电场作用时，其表现出电偶极子特性[24]，通过 CSRR 内部电荷重新分布改变介质对电场的响应特性，从而形成电谐振响应并产生负介电常数。CSRR 可以看作是一类典型的电单负材料（epsilon-negative, ENG）。这种电磁特性可有效调控电磁波传播路径，从而改变天线的谐振特性。CSRR 结构可等效为 LC 并联谐振电路，其等效模型如图 1b 所示。在目标频段内，并联 CSRR 结构通过并联 LC 谐振特性，产生阻带效应并重构电场分布，从而有效抑制表面波传播与近场耦合，最终实现去耦性能。

在图 1a 所示结构中，CSRR 结构周长 L 为：

$$L=\frac{\lambda}{2}=\frac{c}{f_n\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \tag{1}$$

式中，c 为光速 (3×10^8 m/s)；ε_{er} 是 FR-4 介质基板的相对介电常数 (4.4)；ε_{eff} 是介质基板的有效介电常数，$\varepsilon_{\text{eff}}=\dfrac{\varepsilon_{\text{er}}+1}{2}$；$f_n$ 为 CSRR 谐振频率；n=1,2,3,⋯ 代表不同的谐振模式。如图 1b 所示的等效 LC 谐振电路中，等效电容 C_c 主要由 CSRR 开口间隙和环间耦合决定，等效电感 L_c 由环的周长和电流路径长度决定，与 CSRR 的几何尺寸有关。L_{c1}、L_{c2} 代表等效后每个环线圈的电感：

$$L_{c1}=\mu_0\mu_r\frac{L_1}{2\pi}\ln\left(\frac{L_1}{2S_1}\right) \tag{2}$$

$$L_{c2}=\mu_0\mu_r\frac{L_2}{2\pi}\ln\left(\frac{L_2}{2S_2}\right) \tag{3}$$

式中，μ_0 是真空磁导率（$4\pi\times10^{-7}$ H/m）；μ_r 是 FR-4 介质基板的相对磁导率（约为 1）；L_1、L_2 为 CSRR 外环和内环的周长，可用式 (1) 分别代入谐振频率计算，也可利用圆形环半径计算（$L_1=2\pi R_1$，$L_2=2\pi R_2$）；S_1、S_2 是 CSRR 两个开口环的缝隙宽度。将式 (2) 和式 (3) 得到的结果代入式 (4)，即可得到 CSRR 等效总电感 L_c。CSRR 环的串联总电容 C_c 由式 (5) 确定，其中，W 代表 CSRR 环的宽度，D 代表两个环之间的环间距，ε_0 表示真空介电常数（8.854×10^{-12} F/m）。最终，CSRR 的谐振频率 f_c 由等效电感和电容决定，其解析式如式 (6) 所示。

$$L_c=\frac{L_{c1}L_{c2}}{L_{c1}+L_{c2}} \tag{4}$$

$$C_c=\varepsilon_0\varepsilon_{\text{eff}}\frac{W}{D}\frac{S_1+S_2}{2} \tag{5}$$

$$f_c=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_cC_c}} \tag{6}$$

1.2　并联 CSRR 结构的协同工作机制

单个 CSRR 结构通过单一谐振点形成阻带，适用于窄带 MIMO 天线单元间的互耦抑制。然而，本文提出的基于并联组合 CSRR 的宽带去耦合结构，通过优化 CSRR 开口位置与数量，实现了在目标频段内的有效去耦，其具体结构如图 2 所示。



图 2　并联 CSRR 结构示意图

本文提出的并联组合 CSRR 结构由 3 个互补开口谐振环通过特定空间排布构成，其区别于传统单个 CSRR 结构的本质特征在于：1）多谐振点耦合，通过优化 CSRR 结构的数量与开口方位角，可激发双谐振模式，形成宽带特性；2）电流路径调控，相较于单 CSRR 的单一电流回路，并联结构通过环形单元间的互感耦合，可形成交叉耦合网络，有效延长表面电流路径。

该并联组合 CSRR 结构的协同去耦机制主要包括以下 3 个方面：1）谐振阻带效应，并联组合 CSRR 具备并联 LC 谐振特性，在目标频段呈现高阻抗特

性。当天线单元间的耦合电流频率与 CSRR 谐振频率匹配时，并联 CSRR 结构能够反射或吸收耦合能量，并通过多环耦合产生的复合有效阻带，显著降低耦合强度；2）表面波传播抑制，MIMO 天线工作时，单元间产生的耦合电流会通过接地板表面传播。在接地板刻蚀 CSRR 结构后，破坏了接地板表面电流的连续性，形成了局部电磁带隙（EBG），有效阻碍了表面波的传播通道；3）电场重构效应，通过调整 CSRR 结构的开口位置和数量，改变了接地板表面的电场分布。当电场作用于 CSRR 时，其等效电容效应会积累电荷，形成局部的电场梯度，从而进一步抑制天线单元间的近场耦合。

2 基于 CSRR 的 8×8 MIMO 天线设计

本文在尺寸受限的 MIMO 天线地平面上嵌入 CSRR 这种电单负材料来提高天线的隔离度。所提出的 8×8 MIMO 天线的几何结构如图 3 所示。该天线构建在尺寸为 60×60×0.8 mm³，相对介电常数为 4.4，相对磁导率为 1，损耗正切为 0.02 的 FR-4 衬底上。介质基板的顶层为 8 个矩形环状的金属贴片天线，每个天线端口采用同轴端口探针直接馈电，馈电探针连接同轴电缆内导体与天线辐射单元，同轴电缆外导体与地板相连达到共地的效果。印刷在介质基板底层的是接地平面，尺寸为 50×50 mm²。接地层上刻蚀了 CSRR 结构，用于改善天线的阻抗匹配带宽并提高天线单元间的隔离度。CSRR 由两个同心定位开口圆环组成，半径分别为 R_1 和 R_2，构成对耦合场有效的谐振回路。为了清晰的展示天线几何结构和关键尺寸，本文选择天线二维模型 1/4 视角结构图进行展示，如图 4 所示。所提出的天线在电磁仿真软件 HFSS 中进行了建模、仿真和优化。优化后的具体尺寸参数如表 1 所示。

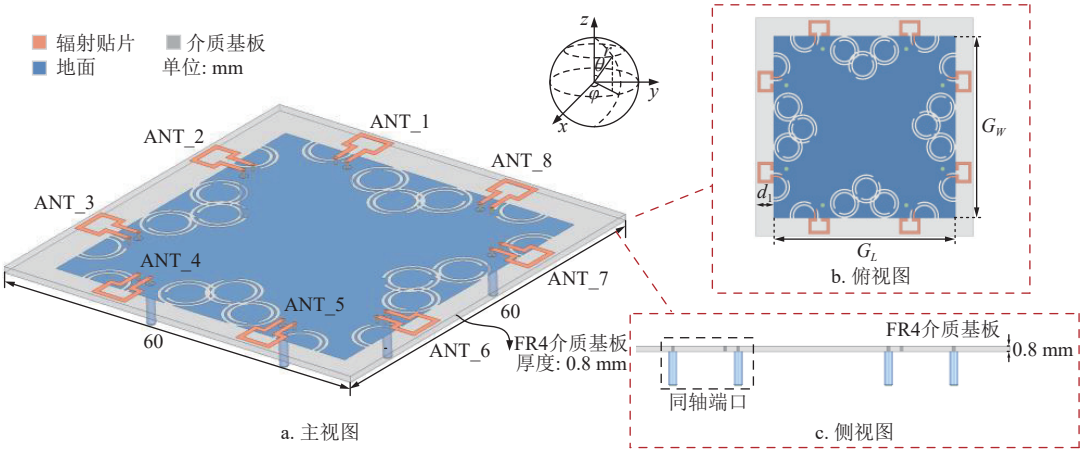


图 3 MIMO 天线几何结构示意图

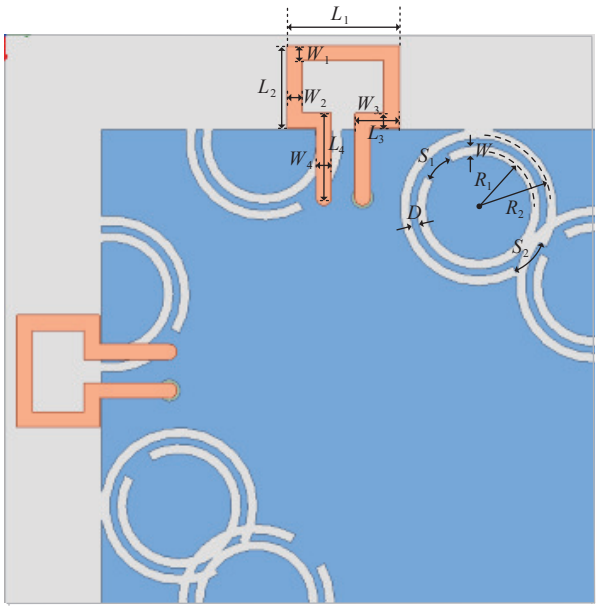


图 4 天线单元和去耦合结构示意图（1/4 视角）

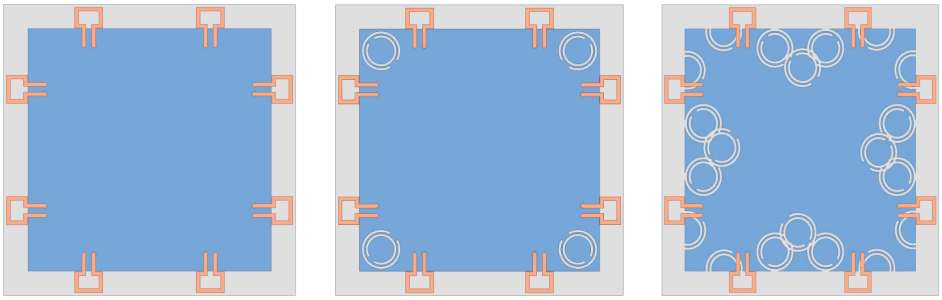
表 1 天线优化后几何结构尺寸参数

参数	值/mm	参数	值/mm
G_W	50	L_4	4.4
G_L	50	W_4	0.8
d_1	5	S_w	0.5
L_1	5.8	R_1	2.1
W_1	0.8	R_2	2.7
L_2	4.7	D	0.1
W_2	0.8	S_1	1.1
L_3	2.3	S_2	1.4
W_3	0.8		

2.1 天线设计过程

为了实现面向 Wi-Fi 的 MIMO 天线小型化、宽带化、低耦合的要求，本文采用“解耦优先，宽带协同”的结构优化方法。所设计的 MIMO 天线

在保证天线紧凑集成的同时，通过 3 次结构迭代演进，有效解决了单元间耦合与阻抗匹配之间的矛盾关系。图 5 展示了天线从模型 1 至模型 3 的演化过程。如图 5a 所示的模型 1，在正方形介质基板的边缘分别布置了 8 个矩形环状金属贴片，实现了 MIMO 天线系统基本的信号收发功能。基于模型 1，如图 5b 所示的模型 2 在接地板的 4 个角、靠近天线端口处分别刻蚀了 4 个同心反向的单个 CSRR 去耦合结构，通过引入额外的电磁耦合，有效抑制了激励天线单元端口附近的耦合电流，改善了天线单元 1 和单元 2 之间的隔离度，并调节了天线的谐振特性。为进一步提升天线性能，如图 5c 所示的模型 3 在模型 2 的基础上，通过优化开口谐振环的开口方位角和数量，引入并联组合 CSRR 去耦合结构。相较于单个 CSRR 的单一电流回路，并联结构通过环形单元间的互感耦合，形成交叉耦合网络，有效延长了表面电流路径。部分耦合电流被限制在并联谐振环内，另一部分耦合电流则因电流路径长度增加而被极大消耗，从而显著降低了端口间的耦合效应。此外，所有天线单元各端口均采用同轴电缆馈电，相比于传统的微带馈电方式，减少了电磁波的耗散和背部馈电对天线性能的影响。天线 3 次结构演变的反射系数（S_{11}）变化如图 6 所示。



a. 模型1　　b. 模型2　　c. 模型3

图 5　天线结构演变过程

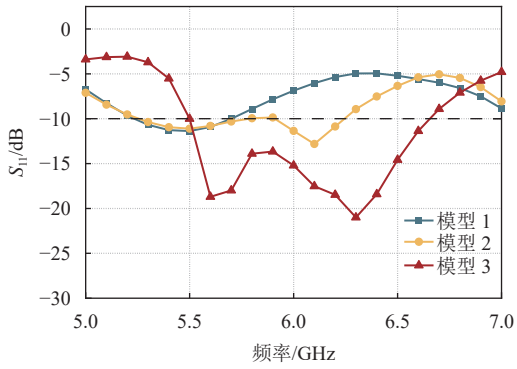


图 6　所提出的 8×8 MIMO 天线改进过程中 S_{11} 变化图

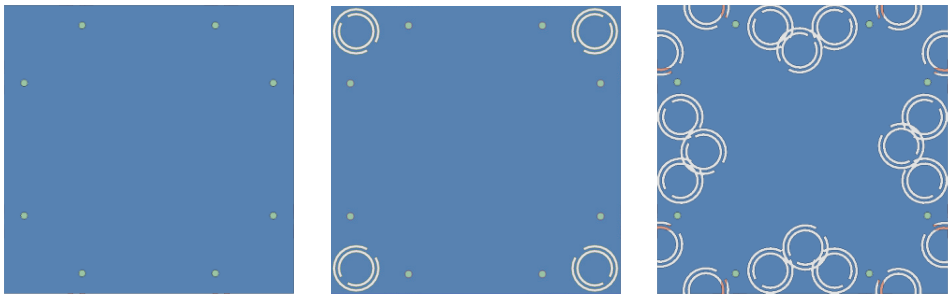
由图 6 可见，模型 1 通过合理布局 8 个矩形环状辐射贴片，在 5.5 GHz 频点处实现谐振，其工作频带为 5.23～5.70 GHz（S_{11}<−10 dB），相对带宽约为 8.6%。为进一步拓展阻抗带宽，模型 2 在接地板 4 个角刻蚀了单个 CSRR 结构。该结构具备 LC 谐振回路的电磁特性，与矩形环状辐射单元相互作用，优化了天线输入阻抗，实现了良好的阻抗匹配。然而，模型 2 在 5.26～5.79 GHz 以及 5.91～6.24 GHz 两个工作频段（S_{11}<−10 dB）工作，不满足本文单频段宽带化设计需求。为了更好地提升天线的性能，模型 3 在模型 2 的基础上，调整了接地板四角 CSRR 结构的开口方位角和位置，并在天线地板水平方向和垂直方向的边缘中间引入并联组合的 CSRR 结构。该并联组合 CSRR 结构与辐射单元形成更强的电磁耦合，从而在更宽频段显著提升了阻抗匹配与辐射效率。通过调整 CSRR 结构的开口方位角和数量，激发出 5.6 GHz 和 6.3 GHz 两个谐振模式，利用多模谐振效应实现了带宽拓展。模型 3 的工作频带扩展为 5.50～6.66 GHz，相对带宽约为 19%，且在整个工作频段内 S_{11} 均低于 −10 dB，满足单频段宽带化的设计要求。

2.2　天线去耦设计过程

本文提出的 MIMO 天线已覆盖了 Wi-Fi 6E 标准中 5 GHz 频段（5.150～5.825 GHz）和 6 GHz 频段（5.925～7.125 GHz）的部分工作频段。同时，由于 8 个天线辐射单元均集成于同一介质基板上，且通过同轴电缆线共享接地平面，天线单元间受到来自地板表面电流的影响，产生了显著的互耦效应，致使天线端口间的隔离度较差，导致系统整体性能降低。

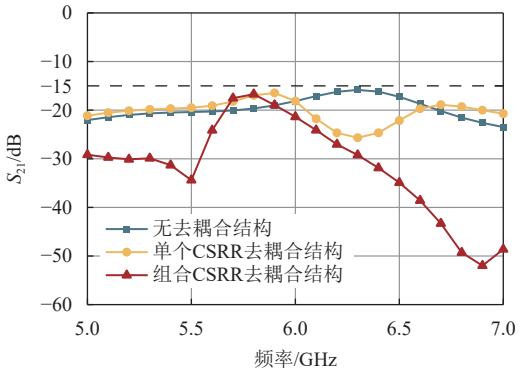
为了抑制单元间耦合，提高端口隔离度，本文

在天线接地板上刻蚀了并联组合 CSRR 去耦合结构，利用其独特的谐振特性，通过调控表面电流分布路径，从而有效抑制天线单元间的互耦效应，提升天线系统的整体性能。去耦合结构的设计演变过程如图 7 所示。本文提出的 MIMO 天线有无去耦合结构的 S_{21}、S_{81} 变化曲线如图 8 所示。

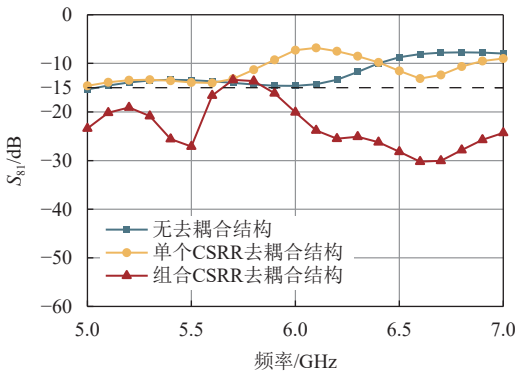


a. 无去耦合结构　b. 单个CSRR去耦合结构　c. 并联CSRR去耦合结构

图 7　所提出的 8×8 MIMO 天线去耦合设计过程示意图



a. S_{21}变化图



b. S_{81}变化图

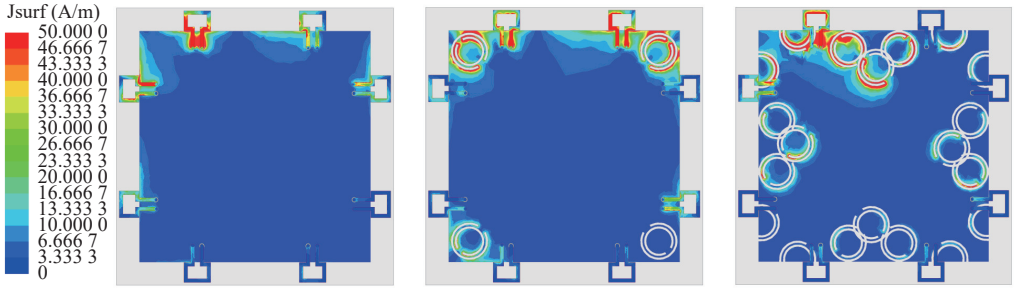
图 8　MIMO 天线有无去耦合结构的 S_{21}、S_{81} 变化图

从图 8a 可以看出，未引入去耦合结构时，天线单元 1 和天线单元 2 之间的传输系数 S_{21} 约为−24.8～−15.8 dB，对应隔离度约为 15.8～24.8 dB。通过在天线接地板的四角刻蚀单个 CSRR 去耦合结构后，产生了明显的谐振效应，从而将端口附近的扰动电流有效地引导至 CSRR 结构内部，使 S_{21} 在整个频段内约为−25.7～−16.5 dB，对应隔离度提高至 16.5～25.7 dB，尤其在 6.3 GHz 频率点，隔离度达 25.7 dB，表明单个 CSRR 结构能在一定程度上抑制单元间的互耦。通过在天线单元 1 和 8 之间进一步引入并联组合 CSRR 去耦合结构，并优化天线单元 1 和 2 之间 CSRR 结构开口角位置和数量后，在 5.0～7.0 GHz 频段内，S_{21} 显著降低至−51.98～−16.70 dB，对应隔离度为 16.70～51.98 dB，最高可达 51.98 dB。这一结果表明，并联组合 CSRR 结构大幅度降低了天线端口之间的信号耦合，显著提升了端口间的隔离度。

从图 8b 可以看出，未引入去耦合结构时，传输系数 S_{81} 高于−15 dB，表明端口 1 与端口 8 之间的互耦较强。引入单个 CSRR 结构后，在 Wi-Fi 6E 的 5 GHz 频段内，S_{81} 与未引入去耦合结构时相比基本没有变化，而在 6 GHz 频段内，S_{81} 在低频段有所升高，高频段有所降低，表明单个 CSRR 结构对单元 1 与单元 8 之间的互耦抑制效果有限。通过在天线单元 1 和 8 之间引入并联组合 CSRR 去耦合结构后，S_{81} 在整个频段内显著降低，尤其在 6.6 GHz 频率点，S_{81} 降低至−30.22 dB，对应隔离度达到 30.22 dB，表明并联组合 CSRR 结构有效抑制了端口 1 和端口 8 之间的互耦。综合分析添加 CSRR 去耦合结构对 S_{21} 和 S_{81} 的影响，说明 CSRR 去耦结构对提升端口隔离度具有显著作用。尤其并联组合 CSRR 结构相比单个结构具有更优的去耦效果，对降低端口互耦、提升 MIMO 天线系统整体性能具有重要意义。

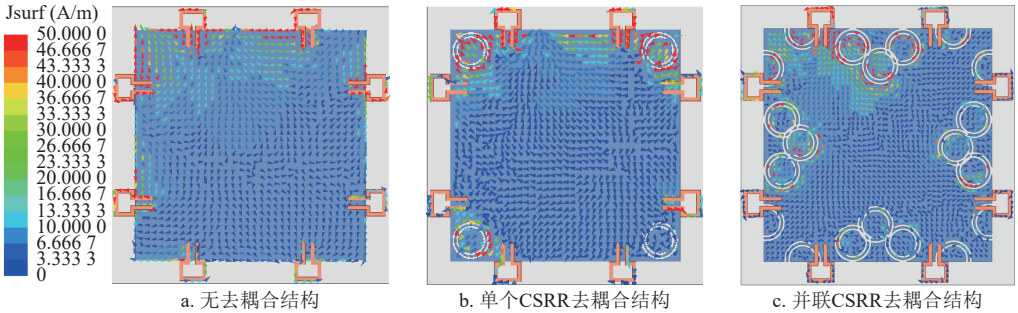
为了更清晰地说明并联组合 CSRR 去耦合结构的有效性，本文对比分析了加载单个 CSRR 结构、未加载 CSRR 结构以及加载并联组合 CSRR 结构的 MIMO 天线系统在 6.0 GHz 频点处的表面电流分布和电流矢量分布，如图 9 和图 10 所示。由图 9a 可见，未加载 CSRR 结构时，当天线端口 1 被激励时，其他端口接 50 Ω 匹配负载，在 6.0 GHz 频点处，端口 1 的耦合电流通过公共地板耦合到相

邻的左端口（端口 2）和右端口（端口 8），导致天线单元 1 与单元 2、单元 1 与单元 8 之间的互耦较强。从图 9b 可以看出，在接地板的四个角分别引入单个 CSRR 结构后，当天线端口 1 被激励时，单个 CSRR 结构的谐振特性会对周围电磁场产生扰动，使其能够吸收或反射部分耦合的电磁能量，使得端口 1 与端口 2 之间的电流流通路径发生变化，流向端口 2 的电流明显减少。然而，端口 1 与端口 8 之间仍存在一定程度的互耦，表明单个 CSRR 的去耦效果有限。从图 9c 可以看出，在接地板水平与垂直方向的边缘中间引入并联组合 CSRR 结构，并优化 4 个角处 CSRR 结构的开口方位角和数量后，当天线端口 1 被激励时，并联 CSRR 结构内发生谐振，从而扩大了对电磁环境的调控范围，不同的 CSRR 通过环形单元间的互感耦合产生复合阻带效应，并有效改变了天线单元表面电流路径，使得电流沿多个 CSRR 环形结构的边缘绕行，从而减少了原本会流向相邻天线单元的电流分量，进而降低了天线单元之间的耦合。结果显示，端口 1 与端口 2、端口 1 与端口 8 之间的耦合强度显著降低，特别是端口 1 与端口 8 之间的隔离度得到明显改善。由图 10a 所示的电流矢量分布可以看出，在未引入去耦结构时，近场能量主要集中分布于相邻天线单元间隙区域，表面电流沿接地板表面在端口 1 至端口 8 方向以及端口 1 至端口 2 方向扩散，形成明显的近场耦合路径。由图 10b 可见，当引入单个 CSRR 结构后，表面电流仍沿接地板表面传播，但在单个 CSRR 环内出现局部强电流聚集区域，表明单个 CSRR 对近场分布具有一定的扰动与吸收作用，但尚未有效阻断原有的近场传播通道，如图 10c 所示，当引入并联 CSRR 结构后，近场能量与表面电流分布发生明显重构，呈现出显著的局域化特征，能量主要被约束在并联 CSRR 环内及其周围区域，从而有效抑制了天线单元之间的近场耦合。



a. 无去耦合结构　　b. 单个CSRR去耦合结构　　c. 并联CSRR去耦合结构

图 9　MIMO 天线有无去耦合结构的电流分布图（6.0 GHz）



a. 无去耦合结构　　b. 单个CSRR去耦合结构　　c. 并联CSRR去耦合结构

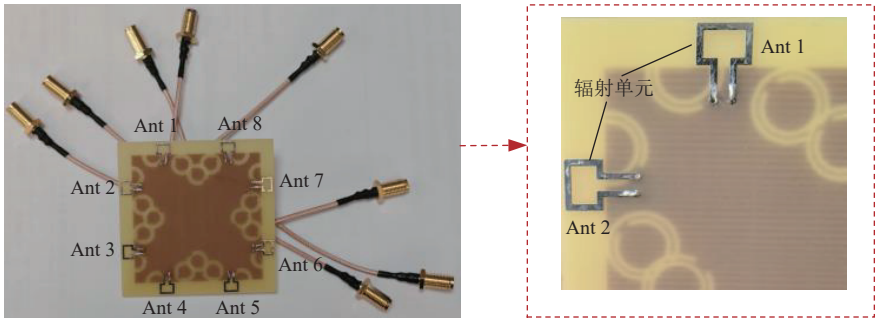
图 10　MIMO 天线有无去耦合结构的电流矢量分布图（6.0 GHz）

上述分析表明，并联组合 CSRR 结构通过谐振阻带效应、电流路径损耗和电场重构化的协同作用，有效抑制了天线单元间的表面波传播和近场耦合，降低了天线单元间的相关性，提高了系统的独立工作性能，为高密度集成 MIMO 天线互耦抑制设计提供了有效解决方案[29]。其机理在于：当天线单元间存在互耦产生的干扰电流时，并联 CSRR 结构的谐振特性会激发感应电流，重构天线端口周围的电磁场分布，并有效改变耦合电流的路径，使得耦合电流不再直接流向相邻的天线单元，而是在 CSRR 结构内部被消耗，从而有效降低了天线单元间的互耦。

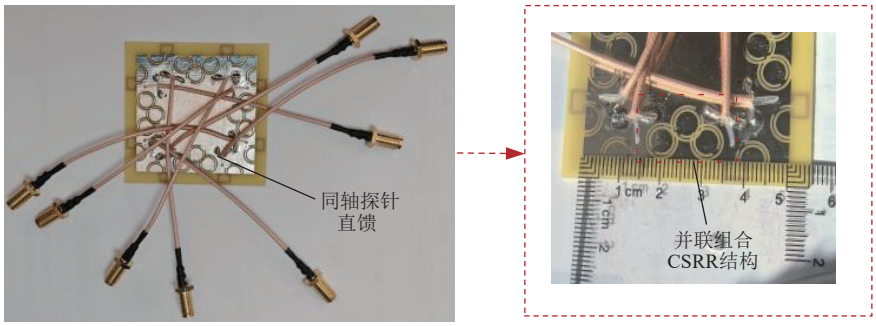
3　实验与仿真结果分析

为验证所设计的 8×8 Wi-Fi MIMO 天线的实际工作性能，根据仿真优化后的尺寸进行了实物加工，其实物如图 11 所示。该天线由介质基板上表面的 8 个矩形环状辐射单元和接地板上水平方向和垂直方向的 4 组并联组合 CSRR 结构组成，其中并

联组合的 CSRR 结构在接地板的水平方向和垂直方向上分布，接地板的 4 个角设置了分散的 CSRR 结构。MIMO 天线单元均采用同轴探针直接馈电，以确保信号传输的稳定性与高效性。



a. 正面视图及介质基板上表面1/4视图



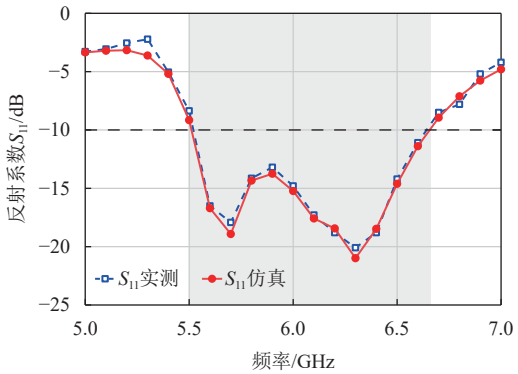
b. 背面视图及接地板刻蚀CSRR结构

图 11　所提出的 8×8 MIMO 天线的实物图

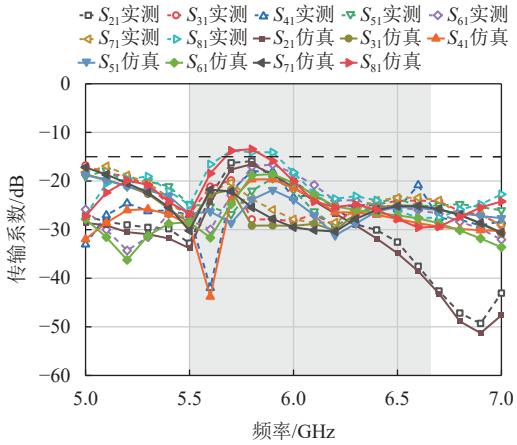
为全面评估该天线的可行性和实际性能，本文对其主要参数进行了仿真和实测对比分析。采用 ZVA67 矢量网络分析仪测试天线的 *S* 参数，并在微波暗室环境下测量其效率、增益及辐射方向图。考虑到天线结构布局具有对称性，本节仅展示了端口 1 被激励时的仿真和实测结果，并进行了对比分析，以验证所设计天线的合理性和实用性。

3.1　*S* 参数

图 12 展示了所提出的 8×8 MIMO 天线系统的 *S* 参数的仿真与实测结果对比。如图 12a 所示，天线端口 1 的反射系数 S_{11} 仿真与实测曲线高度吻合。实测结果表明，天线的−10 dB 阻抗带宽为 5.52～6.64 GHz，相对带宽约 18%，仿真结果得出的−10 dB 阻抗带宽为 5.50～6.66 GHz，相对带宽约为 19%。工作带宽覆盖了 Wi-Fi 6E 标准中的 5 GHz 频段（5.150～5.825 GHz）以及 6 GHz 频段（5.925～7.125 GHz）的部分工作频段，验证了该天线具备良好的宽带特性，能够满足 Wi-Fi 6E 无线通信系统对带宽的要求。图 12b 展示了端口 1 分别与其他端口之间传输系数的仿真与实测结果。结果显示，在工作频段 5.50～6.66 GHz 的内，S_{21} 的测试与仿真结果均低于−16 dB，S_{31} 的测试与仿真结果始终低于−17 dB，S_{41} 和 S_{51} 的测试与仿真结果均低于−18 dB，S_{61} 的测试与仿真结果均低于−16 dB，S_{71} 的测试与仿真结果均低于−17 dB，S_{81} 的测试与仿真结果均低于−14 dB。尽管实测所得的端口 1 与其他各端口的隔离度略低于仿真结果，但总体上趋势一致。测试与仿真结果均表明，所设计的 MIMO 天线具备优良的去耦特性，能够有效抑制单元间互耦，确保各单元端口的独立工作性能。总体而言，该天线的 *S* 参数实测结果与仿真结果基本吻合，但仍存在一定误差。这些误差主要来源于天线加工误差、测试环境的非理想性、同轴电缆的焊接技术以及探针馈电中的反射和能量损耗等。



a. 反射系数

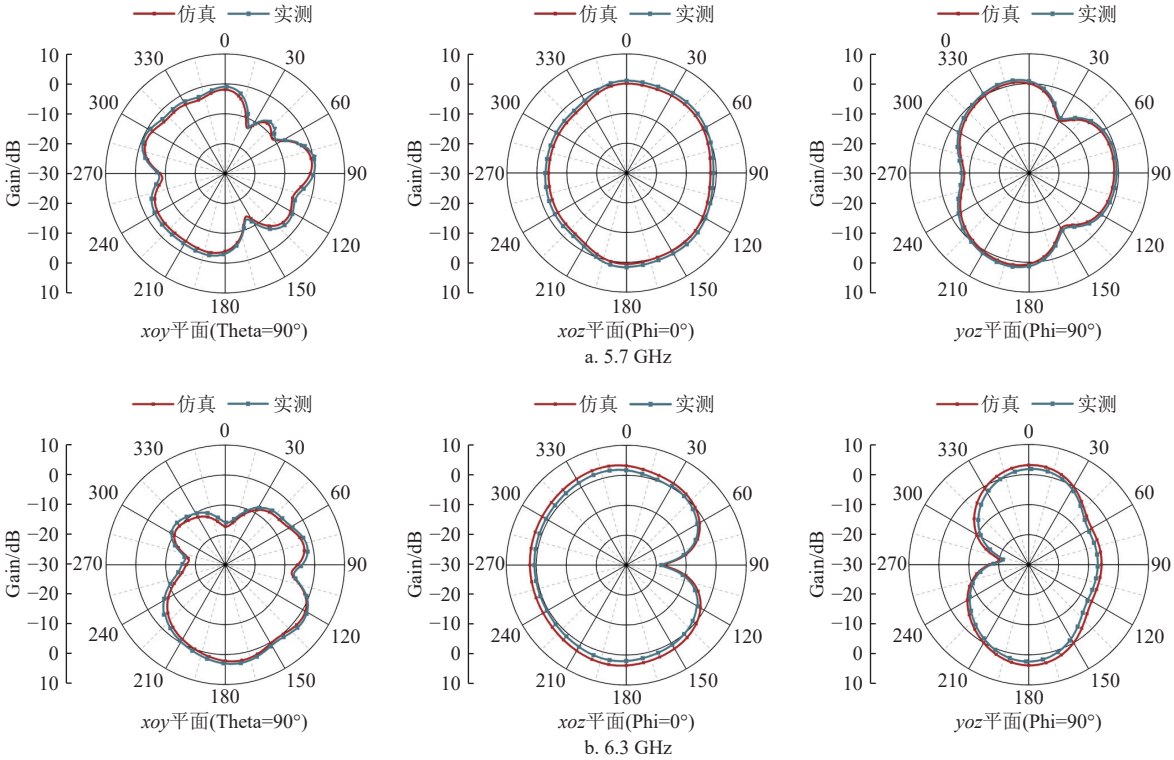


b. 传输系数

图 12　本文 8×8 MIMO 天线系统 *S* 参数仿真与实测结果

3.2　方向图

天线的辐射方向图是表征天线辐射特性的重要参数，用于描述天线在远场条件下，电磁波辐射参量随空间距离角度变化的分布特性，直观反映了天线在不同方向上对电磁波信号的辐射和接收能力。本文利用 HFSS 电磁仿真软件对所设计天线进行了远场辐射特性仿真，并在微波暗室内完成实测，获得天线的实际辐射方向图。考虑到天线结构排列的对称性，本文只分析了天线单元 1 在 5.7 GHz 和 6.3 GHz 两个谐振频率点的辐射特性，并在 *xoy* 平面（theta=90°）、*xoz* 平面（Phi=0°）和 *yoz* 平面（Phi=90°）3 个切面上，绘制了二维仿真和实测辐射方向图，如图 13 所示。从测量与仿真结果可以看出，该 MIMO 天线呈现出近似全向辐射特性，且仿真结果与实测数据具有良好的一致性，表明所提出的天线具有良好的空间辐射特性，能够满足实际应用需求。值得注意的是，在不同谐振频率点，天线的辐射方向图存在一定的差异。这种辐射方向图的畸变现象主要归因于不同谐振模式对辐射场分布的影响，具体而言，随着工作频率的变化，天线表面的电流分布随之改变，导致辐射特性产生相应变化，方向图发生一定程度畸变。这一现象与理论预期相符，进一步验证了仿真模型的有效性与应用可行性。



a. 5.7 GHz

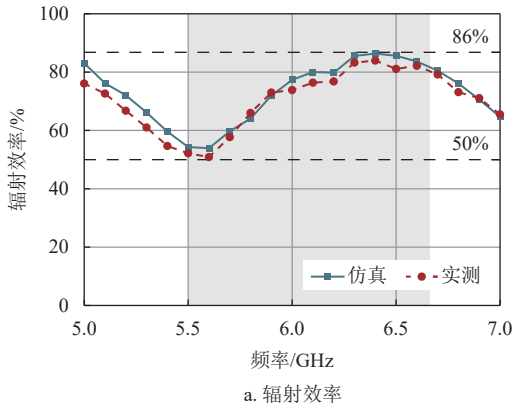
b. 6.3 GHz

图 13　所提出的 8×8 MIMO 天线系统仿真和实测二维辐射方向图

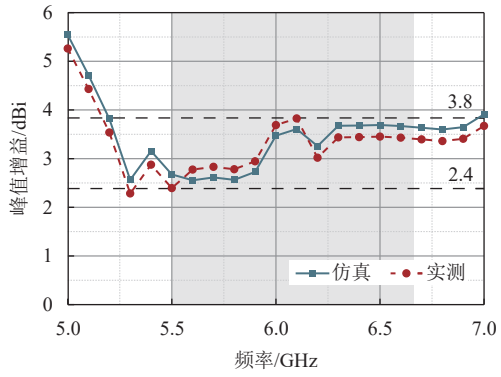
3.3　辐射效率与增益

为进一步评估所设计 8×8 MIMO 天线系统的远场辐射性能，本文对天线单元 1 的辐射效率与峰值增益进行了仿真与实测对比分析，测试结果如图 14 所示。图 14a 给出了天线单元 1 在 5.50～6.66 GHz 工作频段内的辐射效率仿真与实测结果。天线单元的仿真辐射效率范围为 52%～86%，实测辐射效率范围为 50%～85%。在 6.3 GHz 谐振点处，实测辐射效率达到 85%，表现出优异的辐射能力。结果表明，天线在工作频段内具有较高的能量转换效率，满足 MIMO 天线系统对能量转换效率的设计要求。图 14b 展示了端口 1 激励下的峰值

增益仿真与实测曲线。在 5.50～6.66 GHz 的工作频段内，天线的峰值增益范围为 2.4～3.8 dBi。这一增益水平满足 Wi-Fi 天线 2～5 dBi 的常规要求，表明天线在实际应用中能够提供足够的信号覆盖能力。仿真与实测结果存在微小差异，主要源于天线实物加工过程中的机械公差、测试环境中的系统噪声以及同轴电缆焊接引入的损耗。



a. 辐射效率



b. 峰值增益

图 14 本文所提出的 8×8 MIMO 天线系统仿真和实测辐射效率及峰值增益

3.4 包络相关系数（ECC）与分集增益（DG）

包络相关系数（envelope correlation coefficient, ECC）是评估 MIMO 天线系统性能的关键参数之一，用于表征天线单元间的隔离度和空间相关性[30]。较低的 ECC 值意味着天线单元间的相关性较弱，系统的空间分集性较强，能够有效降低多径衰落对通信信道的影响，从而增强系统的抗干扰能力。理想情况下，ECC 值为 0 表示天线完全独立，但在实际应用中，通常要求 ECC 值小于 0.5 即可满足性能需求。ECC 值既可以通过远场辐射方向图进行计算，也可以通过天线的 S 参数近似计算[31]：

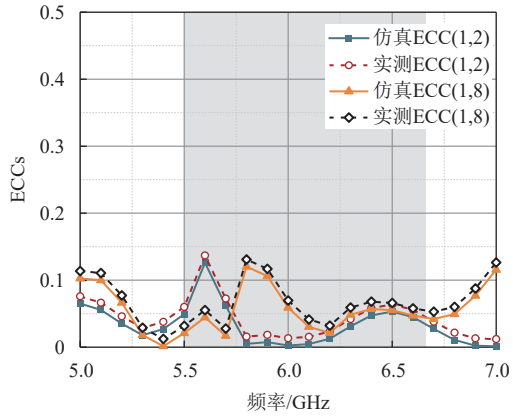
$$\mathrm{ECC}(i,j)=\frac{\left|S_{ii}^{*}S_{ij}+S_{ji}^{*}S_{jj}\right|}{\left(1-\left(|S_{ii}|^{2}+|S_{ji}|^{2}\right)\right)\left(1-\left(|S_{jj}|^{2}+|S_{ij}|^{2}\right)\right)} \tag{7}$$

式中，S_{ii}、S_{jj} 表示天线单元 i 和天线单元 j 的反射系数；S_{ij} 和 S_{ji} 表示天线单元 i 和 j 之间的传输参数；S_{ii}^{*}、S_{ji}^{*}表示 S_{ii}、S_{ji} 的共轭复数。

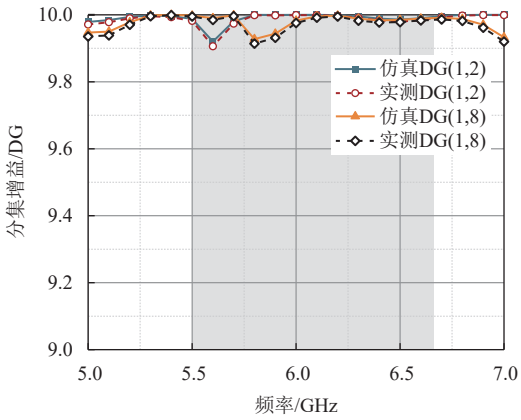
分集增益（diversity gain, DG）是评估 MIMO 天线系统分集性能的另一个重要指标。通常情况下，移动终端 MIMO 天线的分集增益接近 10 dB 时，表明 MIMO 天线系统在多径衰落环境中具有较强的信道可靠性和抗干扰能力。DG 可根据包络相关系数（ECC）计算：

$$\mathrm{DG}(i,j)=10\sqrt{1-\mathrm{ECC}(i,j)^{2}} \tag{8}$$

由于天线结构排列的对称性，本文仅对天线单元 1 与天线单元 2、天线单元 1 与天线单元 8 之间的包络相关系数（ECCs）和分集增益（DG）进行了仿真和测量，如图 15 所示。从图 15a 可以看出，天线在 5.50～5.66 GHz 工作频段内，ECC 始终小于 0.13，表明天线单元间空间相关性较低，系统具备良好的多径分集能力。从图 15b 可以看出，在 5.50～5.66 GHz 工作频段中，DG 值均优于 9.91 dB，说明该天线系统在复杂无线传播环境中，能够有效减轻多径衰落，保证通信链路的稳定性和可靠性。



a. 包络相关系数(ECCs)



b. 分集增益(DG)

图 15 本文所提出的 8×8 MIMO 天线系统仿真和实测的包络相关系数（ECCs）及分集增益（DG）

3.5　性能比较

针对抑制 MIMO 天线单元间的共地耦合问题，根据现有中和线（NL）、电磁带隙结构（EBG）、缺陷地结构（DGS）、开口谐振环以及传统 CSRR 结构等去耦合方式，表 2 选取了部分参考文献中的 MIMO 移动终端天线与本文提出的天线进行了对比。可以看出，本文提出的基于并联 CSRR 去耦合结构的 MIMO 天线系统在 60×60×0.8 mm^3 的紧凑尺寸下，同时实现了较宽的工作频带、良好的隔离度、高辐射效率和低相关性，综合性能良好，能够满足 5G 移动终端对 MIMO 天线系统的小型化、高效率和低耦合的设计需求。

表 2　MIMO 移动终端天线性能比较

文献	天线尺寸/mm^3	去耦合方式	工作频段/GHz	隔离度/dB	天线辐射效率/%	ECC
[8]	120×60×0.8	NL	0.74～0.96	>11	50	<0.40
[15]	56×60×1.2	EBG	2.50～2.60	>26	—	—
[21]	60×60×1.6	CSRR	2.41～2.49	>22	—	<0.50
[32]	26×26×0.8	DGS	5.61～5.90	>18.2	76	<0.02
[33]	40×40×1.6	CSRR	1.70～2.10/ 2.25～2.64	>11	—	<0.10
[34]	90×90×1.6	SRR	2.20～6.28	>14	—	<0.25
本文	60×60×0.8	并联组合CSRR	5.50～6.66	>14	86	<0.13

4　结束语

本文针对 5G 移动通信系统中 MIMO 天线单元间互耦问题，提出了一种基于改进型并联组合 CSRR 去耦合结构的小型化八单元 MIMO 宽带天线，满足了 5G 和 Wi-Fi 6E 应用场景下对高隔离度和宽带性能的需求。研究结论如下。

1）所设计的 MIMO 天线整体尺寸为 60×60×0.8 mm^3，采用 8 个矩形环状辐射单元与刻蚀于接地板的并联组合 CSRR 去耦结构相结合，实现了小型化与宽带性能的平衡。通过对天线结构演变、去耦机制研究以及关键参数的系统优化，验证了并联组合 CSRR 结构在有效抑制单元间耦合、提升天线整体性能方面的显著作用。

2）所提天线在 5.50～6.66 GHz 频段内实现了宽带阻抗匹配，具备良好的解耦性能。端口隔离度大于 13.7 dB，辐射效率最高达 86%，峰值增益达 3.28 dBi，包络相关系数（ECC）小于 0.1，满足 5G MIMO 天线系统高性能的设计要求。

3）并联组合 CSRR 去耦结构相比单个 CSRR 设计，在端口隔离和表面波抑制方面表现更为优越。通过引入并联组合 CSRR 去耦合结构后，传输系数 S_{21} 显著降低至−51.98～−16.7 dB，隔离度最高可达 51.98 dB。并联组合 CSRR 结构在接地板多区域均匀分布，进一步增强了电磁带隙（EBG）特性，抑制了表面波的传播路径，降低了天线单元间的电磁干扰，改善了方向图性能与空间分集特性。

4）并联组合 CSRR 结构可激发多模谐振，进一步提升天线的宽带阻抗匹配能力，实现了 5.50～6.66 GHz 的宽带去耦。并联组合 CSRR 结构具有更高的设计灵活性，可根据不同频段和应用需求，灵活调整谐振环的数量、尺寸和排布方式，适用于 5G、Wi-Fi 6E 及未来 6G 等宽频大容量通信系统的多端口天线设计。

参 考 文 献

[1] ALI A, JAVED A, ZAHID M Z, et al. A dual-band MIMO antenna with novel decoupling structure for 5G mobile/WiFi devices[C]//Proceedings of the International Conference on Communication Technologies. New York: IEEE, 2023: 146-150.

[2] OUYANG J, YANG F, WANG Z M. Reducing mutual coupling of closely spaced microstrip MIMO antennas for WLAN application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 310-313.

[3] 肖海林, 欧阳缮, 聂在平, 等. 天线互耦对室内 MIMO 无线信道容量的影响[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(4): 493-495.
XIAO H L, OUYANG S, NIE Z P, et al. Effect of mutual coupling on the capacity of indoor MIMO wireless channels[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(4): 493-495.

[4] SUI J W, CHENG Y F, FANG X H, et al. A dual-band decoupling technique for MIMO antenna systems using composite capacitor circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(1): 116-120.

[5] JAYARAMAN G, SINGH I, KUMAR C D. Compact four-port monopole MIMO antenna loaded with CSRR for multiband applications[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Microwave, Antenna and Communication. Dehradun: IEEE, 2024: 1-6.

[6] BAN Y L, CHEN Z X, CHEN Z, et al. Decoupled hepta-band antenna array for WWAN/LTE smartphone applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 999-1002.

[7] LI M, JIANG L J, YEUNG K L. A general and systematic

method to design neutralization lines for isolation enhancement in MIMO antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6242-6253.
[8] CIHANGIR A, FERRERO F, JACQUEMOD G, et al. Neutralized coupling elements for MIMO operation in 4G mobile terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 141-144.
[9] YANG M, ZHOU J Z. A compact pattern diversity MIMO antenna with enhanced bandwidth and high-isolation characteristics for WLAN/5G/WiFi applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(6): 2353-2364.
[10] CHENG Y F, CHENG K M. A novel dual-band decoupling and matching technique for asymmetric antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(5): 2080-2089.
[11] LI M, JIANG L J, YEUNG K L. Novel and efficient parasitic decoupling network for closely coupled antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 3574-3585.
[12] LIU F, GUO J Y, ZHAO L Y, et al. Dual-band metasurface-based decoupling method for two closely packed dual-band antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(1): 552-557.
[13] GUO C Z, ZHAI H Q, LIU S B. A new dual-band microstrip antenna array with high isolation by waveguided metamaterial structure[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(5): 1365-1370.
[14] MUKTI P H, SARBANDI F H, PAULITSCH H, et al. Mutual coupling reduction of aperture-coupled antenna array using UC-EBG superstrate[C]//Proceedings of the 13th European Conference on Antennas and Propagation. New York: IEEE, 2019: 1-5.
[15] JIANG T, JIAO T Q, LI Y S. Array mutual coupling reduction using L-loading E-shaped electromagnetic band gap structures[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2016, 2016: 6731014.
[16] PETKOVA D B, TSEKOV T S, PETKOV P Z. Application of electromagnetic bandgap structures for mutual coupling reduction in microstrip antenna arrays[C]//Proceedings of the 58th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies. New York: IEEE, 2023: 73-76.
[17] VENKATESWARA R 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): 1-14.
[18] SHAO Z J, MA L N, GU C Z, et al. Decoupling of wideband closely-spaced patch antennas for MIMO applications[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. New York: IEEE, 2023: 1457-1458.
[19] BAIT-SUWAILAM M M, SIDDIQUI O F, RAMAHI O M. Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 876-878.
[20] HABASHI A, NOURINIA J, GHOBADI C. Mutual coupling reduction between very closely spaced patch antennas using low-profile folded split-ring resonators (FSRRs)[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 862-865.
[21] RAMACHANDRAN A, VALIYAVEETTIL P S, PEZHOLIL M, et al. A four-port MIMO antenna using concentric square-ring patches loaded with CSRR for high isolation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 1196-1199.
[22] SUN Y F, PAN T, WANG Q, et al. A dual-band compact four-port mimo antenna based on ebg and csrr for sub-6 Ghz applications[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2022, 105: 17-25.
[23] KHAN M S, CAPOBIANCO A D, ASIF S M, et al. A compact CSRR-enabled UWB diversity antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16: 808-812.
[24] 南敬昌, 苏东蕊, 高明明, 等. 应用 SRR/CSRR 去耦的毫米波 MIMO 天线[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 195-202.
NAN J C, SU D R, GAO M M, et al. Millimeter-wave MIMO antenna applying SRR/CSRR decoupling[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 195-202.
[25] MORADIKORDALIVAND A, LEOW C Y, RAHMAN T A, et al. Wideband MIMO antenna system with dual polarization for WiFi and LTE applications[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2016, 8(3): 643-650.
[26] 孔伟锋, 刘亚男. 一种基于 WiFi 6E 的高增益偶极子阵列天线[J]. 无线通信技术, 2021, 30(4): 48-51.
KONG W F, LIU Y N. A high-gain dipole array antenna based on WiFi 6E[J]. Wireless Communication Technology, 2021, 30(4): 48-51.
[27] NGAMJANYAPORN P, KAKHONG T. A dual band dipole antenna for WiFi applications[C]//Proceedings of the 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON). [S.l.]: IEEE, 2019: 1-4.
[28] VERMA U, SINGH M P, GHOSH S. Dual band millimeter wave MIMO antenna loaded with SRRs for 5G applications[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium. New York: IEEE, 2022: 1-3.
[29] BILAL M, NAQVI S I, HUSSAIN N, et al. High-isolation MIMO antenna for 5G millimeter-wave communication systems[J]. Electronics, 2022, 11(6): 962.
[30] VAUGHAN R G, ANDERSEN J B. Antenna diversity in mobile communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1987, 36(4): 149-172.
[31] AMBIKA A, THARINI C. Semicircle CSRR with circular slot array structures for high level mutual coupling reduction in mimo antenna[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2019, 87: 23-32.
[32] PANDIT S, MOHAN A, RAY P, et al. Compact four-element MIMO antenna using DGS for WLAN applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(2): 289-295.
[33] SARKAR D, SAURAV K, SRIVASTAVA K V. A compact four element CSRR-loaded antenna for dual band pattern diversity MIMO applications[C]//Proceedings of the 46th European Microwave Conference. New York: IEEE, 2016: 1315-1318.
[34] ANITHA R, VINESH P V, PRAKASH K C, et al. A compact quad element slotted ground wideband antenna for MIMO applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(10): 4550-4553.

责任编辑 叶 芳