

2.4 GHz 超高隔离度双端口圆形贴片天线

韩睿哲, 王浩宇*

东南大学物理学院, 南京 211189, 江苏, 中国

摘要: 2.4 GHz 工业、科学与医疗 (ISM) 频段中可靠的无线通信, 日益依赖能够在多输入多输出 (MIMO) 配置下提供高端口间隔度的天线系统。本文提出一种圆形微带贴片天线, 并将其扩展为面向 2.4 GHz 工作的双端口 MIMO 结构。该天线实现在低损耗基板上, 并通过全波电磁仿真评估其阻抗匹配、辐射性能与 MIMO 分集指标。为提升阵列的端口间隔度, 本文在两个辐射单元之间引入了一种倒 U 形缺陷地结构 (DGS)。优化后的设计在 2.4 GHz 附近取得优异的匹配以及约 -78.7 dB 的超高隔离度, 同时在整个工作频段内保持稳定的增益与辐射方向图。上述结果表明, 所提天线为物联网 (IoT) 及其他短距离无线通信系统中紧凑、高能效且稳健的 2.4 GHz MIMO 前端提供了一种简单而有效的解决方案。

关键词: 2.4 GHz ISM 频段; 圆形微带贴片天线; 缺陷地结构; 高隔离度; MIMO

Ultra-high isolation dual-port circular patch antenna at 2.4 GHz

RuiZhe Han, HaoYu Wang*

School of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China

Abstract: Reliable wireless communication in the 2.4 GHz industrial, scientific, and medical band increasingly relies on antenna systems that can provide high inter-port isolation in multiple-input multiple-output (MIMO) configurations. This paper presents a circular microstrip patch antenna and its extension to a dual-port MIMO configuration designed for 2.4 GHz operation. The antenna is implemented on a low-loss substrate and evaluated using full-wave electromagnetic simulations to assess impedance matching, radiation performance, and MIMO diversity metrics. To enhance inter-port isolation in the array, an inverted U-shaped defected ground structure (DGS) is introduced between the two radiating elements. The optimized design achieves excellent matching around 2.4 GHz and ultra-high isolation of approximately -78.7 dB, while maintaining stable gain and radiation patterns across the operating band. These results indicate that the proposed antenna offers a simple and effective solution for compact, energy-efficient, and robust 2.4 GHz MIMO front ends in internet of things (IoT) and other short-range wireless communication systems.

Keywords: 2.4 GHz ISM band; Circular microstrip patch antenna; Defected ground structure; High isolation; MIMO

一、引言

Copyright © 2026 by author(s) and Ufascience Publisher.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution international License (CC BY 4.0)
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



文章引用: 韩睿哲, 王浩宇. 2.4 GHz 超高隔离度双端口圆形贴片天线[J]. 现代工程与应用, 2026, 4(2): 68-75.
DOI: <https://doi.org/10.61784/mea2022>

工作于 2.4 GHz 工业、科学与医疗 (ISM) 频段的无线通信系统 (包括 Wi-Fi 与物联网平台) 快速增长, 使得对能够支撑可靠多输入多输出 (MIMO) 链路的紧凑型天线系统需求日益迫切。微带贴片天线 (MPA) 因剖面低、易于集成且成本低廉, 在此类设备中获得广泛采用[1]。然而, 当常规单元 MPA 被排布成间距很近的 MIMO 阵列时, 往往面临阻抗带宽有限与端口间隔离度不足的问题, 从而削弱分集性能与整体链路可靠性[2]。

用于贴片分析与设计的基础电磁模型 (如腔模型与主模综合方法) 至今仍是现代优化流程的核心[3]。在此基础上, 近年来众多 MIMO 天线设计要么通过开槽、加载寄生谐振器或短截线来改造辐射单元以重新分布表面电流, 要么通过缺陷地结构 (DGS)、部分接地面或蚀刻图形来改造接地面, 以抑制表面波并降低互耦[4]。

若干代表性设计展示了这些方法在 6 GHz 以下与毫米波频段的应用。NAJIM 等研制了带宽 3.3—6.6 GHz、增益 5.2—7.05 dB 的四单元印刷偶极子 MIMO 天线; WU 等采用圆形短截线对圆形贴片解耦, 隔离度可达 -23.8 dB; SALEEM 等采用开口谐振环 (SRR) 加载实现超宽带工作, 耦合抑制低于 -20 dB; SUBASHINI 等面向 28 GHz 圆形 MIMO; SINGH 等在 6 GHz 以下圆形阵列中报告了约 -16 dB 的隔离度。在多数此类紧凑布局中, 隔离度通常处于 -16 dB 至 -25 dB 区间。要获得更高的隔离度, 往往需要更复杂的解耦电路, 从而增大占用面积或设计复杂度。这凸显出在不牺牲天线尺寸与效率的前提下, 采用简单结构进一步提升隔离度的必要性[5]。

基于上述局限, 本文提出一种面向 2.4 GHz 工作的紧凑型圆形微带 MIMO 天线, 采用 Rogers RT5880 基板 ($\epsilon_r=2.2$, $\tan \delta=0.0009$), 并在两个圆形辐射体之间蚀刻一种简单的倒 U 形 DGS。该 DGS 用于扰动并改变单元间区域接地面电流的路径, 从而削弱主导耦合通路, 同时保持各端口的阻抗特性。本文在 CST Microwave Studio 中采用全波电磁仿真对天线进行分析: 一个端口激励、另一个端口以 50 Ω 负载端接, 以评估匹配、隔离、辐射性能与标准 MIMO 分集指标[6]。

本文的主要贡献可归纳如下。第一, 提出一种双端口圆形贴片结构, 仅在公共接地面上使用单个倒 U 形 DGS 即可获得极高的端口间隔离度, 无需借助中和线、EBG 覆层或集总解耦网络。第二, 所提布局在单元间距很近的条件下仍保持良好的阻抗匹配与稳定的辐射方向图, 对紧凑型 2.4 GHz 前端颇具吸引力。第三, 本文开展了全面的 MIMO 性能评价, 包括 S 参数、输入匹配、辐射特性以及包络相关系数 / 分集增益分析, 阐明了与 DGS 相关的物理解耦机理, 并量化了其对系统级指标的影响。此外需说明, 本文报告的全部结果均来自全波电磁仿真, 样机实测验证留待未来工作[7]。

本文其余部分安排如下: 第二部分介绍天线结构与设计方法, 包括单元圆形贴片、向双端口 MIMO 布局的扩展以及倒 U 形 DGS 的几何结构; 第三部分给出并讨论仿真结果, 涵盖阻抗带宽、隔离度、辐射方向图、分集性能以及与相关工作的比较; 第四部分总结全文并指出未来研究方向。

二、方法

(一) 天线设计理论

圆形微带辐射体的尺寸依据经典腔模型公式确定[8-12]。计入边缘场效应后, 贴片物理半径的常用初始估计式为:

$$a = F / \sqrt{\{1 + (2h / (\pi \epsilon_r F)) \cdot [\ln(\pi F / 2h) + 1.7726]\}} \quad (1)$$

其中,

$$F = 8.791 \times 10^9 / (f_r \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2)$$

式中, f_r 为目标谐振频率 (2.4 GHz), ϵ_r 为基板相对介电常数 (Rogers RT5880 为 2.2), h 为基板厚度 (1.6 mm)。更精确地反映边缘场效应的等效半径 a_e 的修正估计式为:

$$a_e = a \{1 + (2h / (\pi a \epsilon_r)) \cdot [\ln(\pi a / 2h) + 1.7726]\}^{(1/2)} \quad (3)$$

主模 TM₁₁ 的谐振频率可近似表示为:

$$f_{r,TM11} \approx X'_{11} \cdot c / (2\pi a \sqrt{\epsilon_{eff}}) \quad (4)$$

式中, c 为光速, ϵ_{eff} 为有效介电常数 (对薄基板而言, $\epsilon_{eff} \approx (\epsilon_r + 1)/2$ 常为良好估计), X'_{11} 为 TM₁₁ 模的第一个根。

本文选用 Rogers RT5880 基板 ($\epsilon_r=2.2$, $\tan \delta=0.0009$), $h=1.6$ mm, $f_r=2.4$ GHz。由式 (1) — (3) 得到圆形贴片半径的初始估计值为 23.62 mm。在 CST Microwave Studio 中完成全波优化后, 单元设计最终确定为 $a=23.66$ mm。在计入倒 U 形缺陷地结构 (DGS) 与单元间耦合的双单元 MIMO 联合优化过程中, 半径收敛至 $a=23.71$ mm。上述调整幅度很小 ($\leq 0.21\%$), 符合引入馈电与耦合环境后进行微调的预期。

金属化层 (贴片与接地面) 采用标准铜厚 $t=0.035$ mm。按照 Balanis 较为保守的准则——接地面在贴片各侧向外延伸 $6h$ ——单元情形下的接地面尺寸为:

$$L_g = W_g = 2a + 12h \quad (5)$$

取 $a=23.66$ mm、 $h=1.6$ mm, 得 $L_g=W_g=66.52$ mm。对更紧凑的布局, 常采用较宽松的建议 $L_g=W_g=2a+6h$; 在相同 a 与 h 下得 56.92 mm, 本文即采用该值, 以节省面积, 同时仍为同轴连接器提供足够余量并抑制边缘绕射。

(二) 馈电方式

天线由采用 PTFE 介质的 50Ω 同轴探针馈电, 外导体与内导体直径分别为 $D=4.5$ mm 与 $d=1.26$ mm。馈电位置在 CST Microwave Studio 中经实验优化, 以最小化单元结构在 2.4 GHz 处的输入失配。相对贴片中心的最终面内偏移为 $(x_f, y_f)=(6$ mm, 6 mm), 其径向距离为

$$r_f = \sqrt{(x_f^2 + y_f^2)} \approx 8.49 \text{ mm} \quad (6)$$

该位置获得了优异的阻抗匹配。对圆形贴片而言, 在相同径向距离 r_f 下, 馈电点可置于任意方位角; 本设计出于布线便利选择了第一象限内的点。在 MIMO 结构中, 各单元的同轴馈电位置略作调整为 $(x_f, y_f)=(6.2$ mm, 5 mm), 以补偿单元间耦合的影响。

(三) 单元模型

天线单元在 CST Microwave Studio 中建模与设计, 基板为 Rogers RT5880, 相对介电常数 $\epsilon_r=2.2$, 损耗角正切 $\tan \delta=0.0009$, 厚度 $h=1.6$ mm。贴片与接地面均采用厚度 $t=0.035$ mm 的铜金属化层, 接地面尺寸设为 $L_g=W_g=56.92$ mm。仿真采用开放边界条件, 并使用带自适应加密的六面体网格以确保精度。本阶段未制作硬件样机, 本文报告的全部性能指标均来自全波电磁仿真。

包括贴片半径、馈电位置、DGS 尺寸与基板参数在内的全部关键设计参数均已明确给出, 以便直接复现天线几何与仿真设置。优化后的设计在目标频率 2.4 GHz 处提供了优异的阻抗匹配与稳定的辐射性能。圆形贴片天线的总体几何结构与设计参数见图 1。

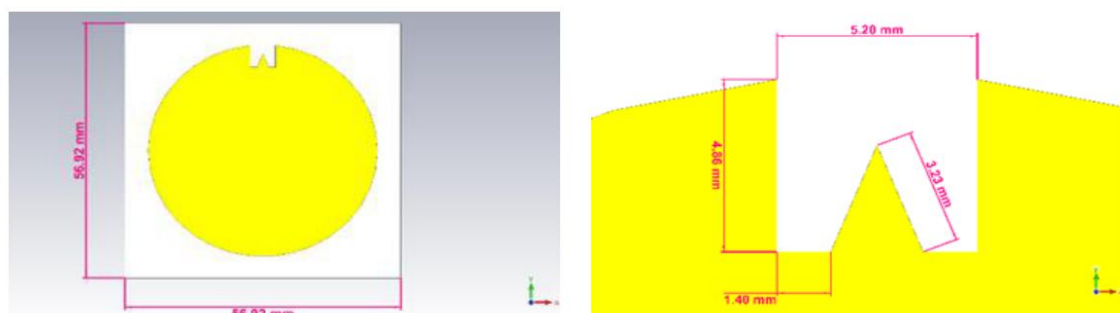


Figure 1 Geometry of the Circular Patch Antenna with Design Parameters**图 1** 圆形贴片天线的几何结构与设计参数

(四) 含倒 U 形缺陷地结构的双单元 MIMO 布局

图 2 给出了所提含倒 U 形缺陷地结构 (DGS) 的双单元圆形 MIMO 天线的几何结构。该天线由排布于同一基板上的两个完全相同的圆形贴片构成, 均采用同轴馈电激励。

为把设计扩展为双单元 MIMO 结构, 两个圆形贴片按边缘间距 $D_{sep}=64\text{ mm}\approx 0.5\lambda_0$ 、中心间距 $D_{cc}=111.42\text{ mm}\approx 0.89\lambda_0$ 布置, 如图 2 (a) 所示。选择这些距离是为了在限制近场相互作用的同时保持紧凑性。在不采取额外隔离措施时, 可观察到显著的互耦, 其主要成因是基板内的表面波传播。

为抑制该效应, 本文在两个辐射体之间的公共接地面上引入了倒 U 形 DGS, 如图 2 (b) 所示。该 DGS 扰动了单元间区域的表面电流分布, 从而切断主导耦合通路并提升端口间隔离度。

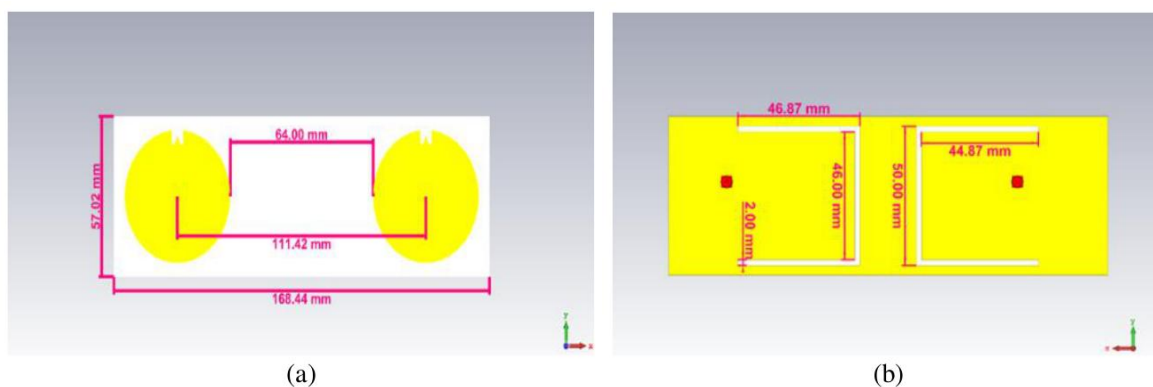
**Figure 2** Geometry of the Two-Element Circular MIMO Antenna

图 2 双单元圆形 MIMO 天线的几何结构: (a) 俯视图, 标出两贴片之间的边缘间距 D_{sep} 与中心间距 D_{cc} ; (b) 仰视图, 突出显示倒 U 形缺陷地结构 (DGS) 与同轴馈电位置

三、结果与讨论

(一) 单元性能

仿真反射系数证实了单个圆形贴片天线优良的阻抗性能。在 2.4 GHz 处, 辐射体呈现深度谐振, 最小值 $S_{11}=-44.54\text{ dB}$ (见图 3)。相应的电压驻波比 (VSWR) 为 1.01 (见图 4), 表明与 $50\text{ }\Omega$ 参考阻抗几乎完全匹配。史密斯圆图上的输入阻抗非常接近 $50\text{ }\Omega$ 点, 电抗分量可以忽略 (见图 5)。因此, 馈电端口处的反射实际上被消除, 几乎全部输入功率都被有效送入辐射体。

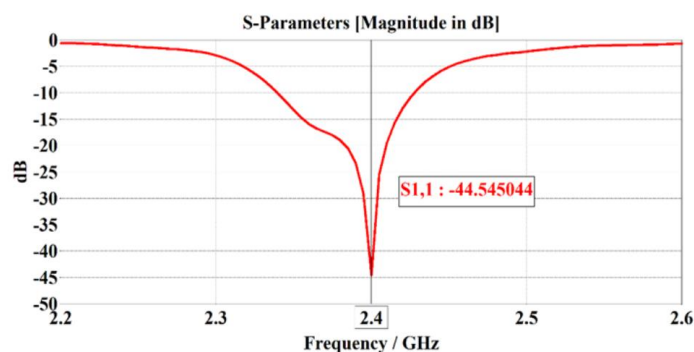
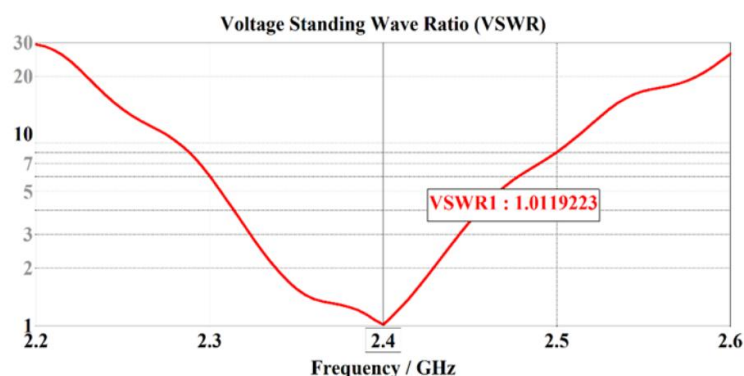
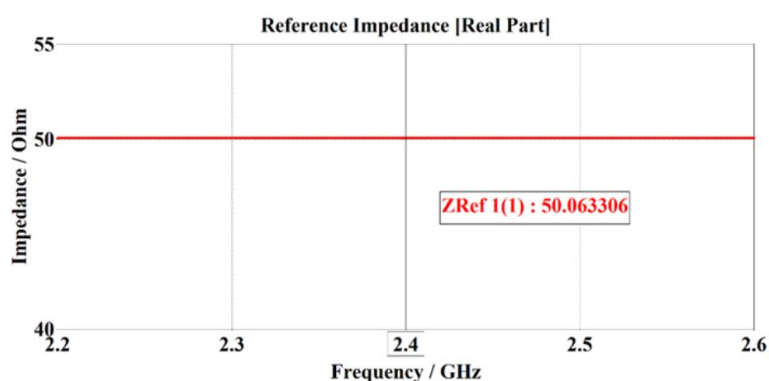


Figure 3 Simulated Reflection Coefficient of the Single-Element Circular Patch Antenna at 2.4 GHz**图 3** 单元圆形贴片天线在 2.4 GHz 处的仿真反射系数**Figure 4** Simulated VSWR of the Single Antenna across the Operating Band**图 4** 单元天线在工作频段内的仿真 VSWR**Figure 5** Simulated Input Impedance of the Single Antenna at 2.4 GHz**图 5** 单元天线在 2.4 GHz 处的仿真输入阻抗

辐射性能在工作频段内同样稳定。在 2.4 GHz 处, 天线的实现增益为 6.78 dBi (见图 6), 方向性系数为 7.11 dBi (见图 7)。二者差值很小, 说明辐射效率高, 仅有极少部分功率因介质损耗与欧姆损耗而耗散。上述结果证实该单元为扩展至多端口结构提供了稳健的基础。

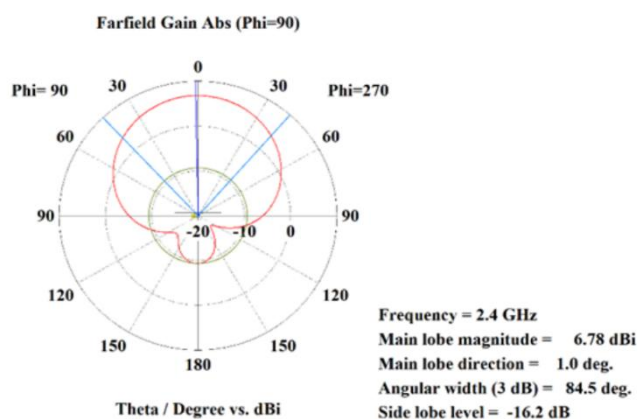
**Figure 6** Simulated Peak Gain of the Single Antenna at 2.4 GHz

图 6 单元天线在 2.4 GHz 处的仿真峰值增益

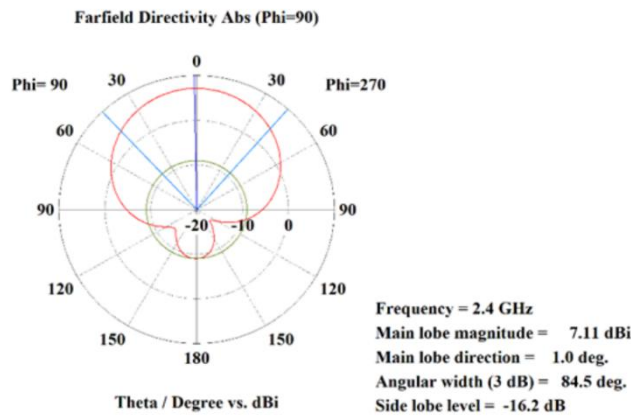


Figure 7 Simulated Directivity Pattern of the Single Antenna at 2.4 GHz

图 7 单元天线在 2.4 GHz 处的仿真方向性方向图

(二) 与已报道工作的比较

表 1 把所提天线与近期工作频率覆盖 6 GHz 以下至毫米波的多端口圆形贴片 MIMO 设计进行了对比。最突出的结果是隔离度：本设计在 2.4 GHz 处达到-78.65 dB，大幅超越表中全部同类工作。文献等 6 GHz 以下可重构设计报告为-14.5 至-18 dB；文献等 EBG/DGS 辅助的 CPW 结构达到≤-35 dB(在特定 OFF 状态下最高-47 dB)；文献的中和线解耦在更高频段（3.2—4.14 GHz）实现优于-60 dB 的隔离度；文献的超表面集成圆极化 MIMO（5—8.67 GHz）与文献的一体化 8 端口平台分别提供≤-22 dB 与约-26 dB 的隔离度。在 2.4 GHz 处，文献的 4 端口万字形接地设计报告的相邻端口隔离度为-12.3 dB，凸显了在 ISM 频段附近实现强解耦的难度。上述比较总体表明，本文的倒 U 形 DGS 在 2.4 GHz 处提供了比 EBG、圆极化超表面或基于取向的自解耦技术更有效、更紧凑的解耦机制。

Table 1 Performance Comparison of Reported Multi-Port Antennas and the Proposed Design

表 1 已报道多端口天线与本文设计的性能比较

文献	天线类型 / 结构	端口数	频段 (GHz)	隔离度 (dB)	增益 (dBi)	DG (dB)	ECC	效率 (%)
可重构圆形贴片								
	MIMO (倒 L 形短截线 + 矩形接地短截线, FR-4)	2	3.3—3.99 / 4.96—5.34	-14.5 至-18	3.5 GHz 处 2.5; 5.1 GHz 处 2.68	9.9	< 0.09	65 / 75
	双频 CPW 圆形贴片 MIMO, 含 PGP-DGS、PIN 二极管支节线与双频 EBG	2	2.8—3.6 / 4.7—5.6 (ON); 5.2 (OFF)	低频≤-35, 高频≤-25; 5.2 GHz (OFF) 处-47	低频>3, 高频 (ON) >4, OFF 约 3.5	—	—	—
	双频 H 形开槽圆形贴	2	3.20—3.40 /	< -60 (实测)	—	—	< 0.02	≥ 7

本文	片+中和线 (FR-4)		3.84—4.14					
	双端口双向圆极化超表面集成天线 (FR-4, 双层)	2	5—8.67	≤ -22 (实测)	6.5 / 6.55 dBic	> 9.985	< 0.005	> 80
	一体化 8 端口: 4 个 CPW 椭圆单元 (6 GHz 以下) + 4 个半圆单元 (毫米波) (FR-4)	8	3.20—5.50 / 23.50—29.95	$\leq -25.5 / \leq -25.95$ (实测)	12.3 / 10.55	9.99	0.002	86—91.8 / 89—96
	4 端口圆形 / 缝隙天线, 万字形接地 (FR-4, 40×40×1.6 mm ³)	4	2.4	-12.3	—	约 10	—	> 85
	2×2 圆极化 MIMO 圆形开槽贴片 (FR-4)	4	4.9—5.1	> 20	—	—	—	—
	Rogers RT5880 基板上的双端口圆形微带贴片, 含倒 U 形 DGS	2	2.4	-78.65	约 6.5	约 10	约 2.8×10 ⁻⁷	92.6

除隔离度外, 所提天线还保持了近乎理想的分集性能。ECC $\approx 2.8 \times 10^{-7}$ 比公认限值 (0.5 与 0.1) 低若干个数量级, 甚至低于文献 (< 0.02) 与文献 (< 0.005) 已经十分优异的取值。与之一致, DG ≈ 10 dB 达到理论最大值, 与文献等高质量 MIMO 工作相当。在辐射性能方面, 所提设计在 2.4 GHz 处的实现增益约为 6.5 dBi, 由增益与方向性系数之比估算的效率约为 92.6%, 与 6 GHz 以下的同类设计相比具有竞争力, 并显著高于典型的基于 FR-4 的可重构设计 (如文献为 65%—75%)。

最后, 各项工作的功能定位有所不同: 文献提供双频工作并具有很好的隔离度; 文献扩展至八端口并同时覆盖 6 GHz 以下与毫米波频段; 文献则通过超表面在宽频带内实现圆极化。相比之下, 本文聚焦于单频 2.4 GHz 方案, 以最小的结构复杂度实现超高隔离度, 这对于强调稳健共存与能效的物联网与 ISM 频段设备尤具吸引力。其代价是当前设计为单频结构; 不过所展示的 DGS 方法结构简单, 便于向双频或多频扩展。简言之, 在 2.4 GHz 处, 所提天线以近乎为零的 ECC 与高效率实现了处于前沿水平的隔离度 (-78.65 dB), 在解耦效果上优于同类 6 GHz 以下 MIMO 设计, 同时保持了具有竞争力的增益与近乎理想的分集性能。

尽管所提天线的隔离度与分集性能十分突出, 本研究仍存在若干局限。第一, 全部结果均基于 CST Microwave Studio 仿真, 实际中的加工公差、连接器效应与测量不确定度可能使隔离度与辐射特性略有下降。第二, 本设计仅限于单一的 2.4 GHz 频段, 而许多现代物联网与 Wi-Fi 设备需在多个频段工作。第三, 互耦是在自由空间环境下评估的, 在含设备外壳与邻近物体的真实部署中性能可能有所不同。上述局限也指明了未来工作的方向, 包括样机制作与暗室实测、加工偏差下的鲁棒性分析, 以及把 DGS 概念扩展到双频或多频圆形 MIMO 阵列。

四、结论与未来工作

本研究旨在设计并评价一种圆形微带贴片天线, 并将其扩展为在 2.4 GHz 处具有极高端口间隔离度的双单元 MIMO 结构。实现在 Rogers RT5880 基板上的单个辐射单元表现出优异的阻抗匹配: 回波损耗低、电压驻波比 (VSWR) 接近理想值、辐射特性稳定。为提升 MIMO 结构中的隔离度, 本文在两个圆形贴片之间的公共接

地面上引入了倒 U 形缺陷地结构 (DGS)。所得双端口天线在 2.4 GHz 处取得约 -78.65 dB 的出色隔离水平, 同时保持约 6.5 dBi 的实现增益、接近 7 dBi 的方向性系数, 以及实质上为零的包络相关系数 (对应约 10 dB 的分集增益)。上述发现表明, 所提基于 DGS 的布局为在不损害阻抗与辐射性能的前提下大幅降低紧凑 MIMO 天线中的互耦提供了一种简单而有效的手段, 从而有助于设计面向 ISM 与物联网应用的稳健 2.4 GHz 前端。

本文报告的结果仅来自全波电磁仿真, 尚未开展实测验证。加工公差、连接器效应与实际部署环境可能对实测隔离度与辐射特性产生小幅影响。因此, 未来研究将聚焦于所提天线的样机制作与实测, 以及把该概念扩展至双频或多频工作与更大规模的 MIMO 阵列。这些工作将进一步提升该设计在下一代无线系统中的适用性。总体而言, 所提双端口圆形贴片天线为在 2.4 GHz 处实现超高隔离度与近乎理想的分集性能提供了一种实用且结构简单的方案, 基于 DGS 的解耦概念也为后续在带宽、端口数与应用范围上的拓展奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 郝吉明. 工业烟气多污染物协同治理. 中国环境科学, 2022, 42(04): 1501-1508.
- [2] 肖立业. 超导输电线路工程化关键问题. 电工电能新技术, 2022, 41(02): 1-10.
- [3] Wang H, Zheng Q, Li Q, et al. Isolation improvement and bandwidth enhancement of dual-band MIMO antenna based on metamaterial wall. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025, 24(5): 1144-1148.
- [4] 朱合华. 城市地下管网数字孪生建模. 地下空间与工程学报, 2022, 18(02): 369-378.
- [5] 李元昊. 数控机床热误差补偿技术. 中国机械工程, 2022, 33(08): 905-912.
- [6] 陈发虎. 高寒冻土路基稳定控制技术. 冰川冻土, 2022, 44(02): 478-486.
- [7] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons, 2016.
- [8] 吴一戎. 合成孔径雷达成像优化算法. 雷达学报, 2022, 11(02): 201-212.
- [9] 黄维和. 天然气管网动态调度优化. 油气储运, 2022, 41(04): 361-368.
- [10] 叶列平. 再生混凝土高性能化改性技术. 建筑材料学报, 2022, 25(02): 305-314.
- [11] Wang L, Zhang C X, Xing S S, et al. A low-profile shared-aperture patch antenna with 2-D scanning capability. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025, 24(9): 2974-2978.
- [12] Gundala S, Srinivasa Baba V, Srigada S, et al. Cross slotted antenna at X band for wireless applications. 2024 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 2024: 1-7.