文章编号：2095-4980(2026)01-0055-05

用于紧凑型宽带MIMO微带天线的解耦技术

宛郑圆，何翼景*，孙厚军

(北京理工大学 北京市毫米波与太赫兹技术重点实验室，北京 100081)

摘　要：针对现有多输入多输出(MIMO)微带天线带宽较窄的问题，提出一种紧凑型宽带高隔离度MIMO微带天线及阵列设计。通过引入交叉式容性栅栏、开口槽和短路通孔，逐步提高端口之间的隔离度。为验证这一概念，对1×2微带天线和2×2阵列进行加工实测。2×2阵列测试的阻抗带宽为44.9%，隔离度优于21.8 dB，测试与仿真结果一致性良好。基于2×2阵列，进一步验证所提出的解耦结构在大规模阵列中的适用性。仿真结果显示，2×6阵列的阻抗带宽为43.5%，在工作带宽内，隔离度至少达到20 dB。因此，所提出的解耦方案在宽带高隔离MIMO和天线阵列中具有广阔的应用前景。

关键词：高隔离度；多输入多输出(MIMO)；紧凑型；微带天线及阵列设计

中图分类号：TN828.6　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024539

Decoupling technology for compact wideband MIMO microstrip antenna

WAN Zhengyuan，HE Yijing*，SUN Houjun

(Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China)

Abstract: To address the issue of narrow bandwidth in existing Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) microstrip antennas, a compact broadband high-isolation MIMO microstrip antenna and array design is proposed. By introducing cross-type capacitive fences, open slots, and shorting vias, the isolation between ports is gradually enhanced. To validate this concept, a 1×2 microstrip antenna and a 2×2 array were fabricated and measured. The measured impedance bandwidth of the 2×2 array is 44.9%, with an isolation better than 21.8 dB, showing good consistency between the measured and simulated results. Based on the 2×2 array, the applicability of the proposed decoupling structure in large-scale arrays was further verified. Simulation results indicate that the impedance bandwidth of a 2×6 array is 43.5%, with an isolation of at least 20 dB within the operating bandwidth. Therefore, the proposed decoupling solution has broad application prospects in broadband high-isolation MIMO applications and antenna arrays.

Keywords: high isolation; Multiple-Input Multiple-Output(MIMO); compact; microstrip antenna and array design

多输入多输出(MIMO)技术可以在不额外分配频谱资源或增加发送功率的情况下，提升通信系统的频谱效率和信道容量。但紧凑的天线间距给MIMO系统带来了一个重大难题，即强互耦现象。这对阻抗和辐射等特性产生不利影响，如反射系数、辐射方向图、效率和包络相关系数等[1]。为防止天线性能的恶化，必须消除天线间的强互耦。研究人员对MIMO天线进行了广泛研究，并提出了许多相关工作[2]。为实现多个天线之间的高隔离度，近期的研究中出现了一系列解耦结构或方法，包括缺陷接地结构[3]、中性线[4]、LC谐振器[5-6]、共差模

收稿日期：2024-09-13；**修回日期：**2024-10-23

基金项目：国家自然科学基金资助项目(62201038)；北京理工大学青年基金资助项目(XSQD-202206003)

***通信作者：**何翼景　email:heyj@bit.edu.cn

引用格式：宛郑圆,何翼景,孙厚军. 用于紧凑型宽带MIMO微带天线的解耦技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2026,24(1):55-59. DOI:10.11805/TKYDAN2024539.

Citation format: WAN Zhengyuan,HE Yijing*,SUN Houjun. Decoupling technology for compact wideband MIMO microstrip antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2026,24(1):55-59. DOI:10.11805/TKYDAN2024539.

抵消法[7]等。但目前的解耦方法主要解决了紧凑型的窄带微带天线(–10 dB 阻抗带宽<10%)中出现的强互耦问题，并不适用于宽带天线。因此迫切需要研究一种专门针对紧凑型的宽带微带天线设计的新型解耦方法。针对此问题，提出一种适用于紧凑型宽带微带天线的分级解耦架构。

1 1×2 紧凑型微带天线

在 MIMO 天线的发展进程中，实现紧凑型宽带宽多端口阵列天线间的高隔离度，是当前面临的一项严峻挑战。当天线单元间距过小，且工作频带宽度较宽时，天线的互耦效应会显著增强。在这种状况下，天线系统会出现诸如阻抗匹配性能劣化、端口隔离度下降以及辐射方向图畸变等突出问题，而传统的优化方法难以取得实质性的改善。为此提出一种分级解耦架构，通过三级渐进式解耦流程，实现阻抗带宽的拓展与端口隔离度的提升。具体而言，图 1 中该解耦体系由依次发挥作用的第一级解耦结构、第二级解耦结构以及第三级解耦结构构成。基于这种解耦架构，最终成功实现了带宽达 40% 且隔离度为 20 dB 的近间距微带天线阵列。

图 2 为 1×2 紧凑型宽带高隔离度微带天线的结构图。该天线主要由单面印刷的 F4BM 介质板(介电常数 ε_r=2.2，损耗角正切 tan δ=0.001)、空气媒质和地板组成。集总电容加载的容性通孔包括 4 个贴片电容(C=0.2 pf)和 1 个短路通孔。这些容性通孔沿金属贴片的对角线均匀排布，形成十字型容性栅栏，有效阻断了耦合能量流向负载端口。为增强端口隔离度，在非辐射边缘的中间蚀刻了 1 对 1/4 波长开口槽。同时在金属贴片的 4 个角落处均加载了一个短路通孔，以进一步提升隔离度。2 个同轴馈电探针沿 x 轴对称放置，并采用了容性耦合馈电方式。通过引入空气间隙，实现了感性和容性分量之间的良好平衡。该天线采用由介质层和空气层构成的堆叠结构，从而实现了宽带性能。其中介质板和空气媒质的厚度分别为 1 mm 和 6 mm。天线的中心间距为 $0.3\lambda_0$，边缘间距仅为 $0.03\lambda_0$。

为说明十字型容性栅栏的设计原理，提出如图 3(a)中集总电容加载短路通孔等效电路图。该 LC 串联谐振网络主要由集总电容 C_l、间隙电容 C_g 和短路通孔电感 L 构成，分别对应实际结构中的贴片电容、空气间隙及金属化通孔。其中，LC 串联谐振器的总阻抗是各个元件阻抗的代数和：

$$Z_{\mathrm{LC(Series)}}=Z_{\mathrm{L}}+Z_{\mathrm{C}}=\mathrm{j}\omega L+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C}=\mathrm{j}\left(\frac{\omega^2 LC-1}{\omega C}\right) \tag{1}$$

式中：$Z_{\mathrm{LC(Series)}}$ 为 LC 串联谐振器的阻抗；Z_{L} 和 Z_{C} 分别为电感和电容的阻抗。

在谐振频率附近工作时，串联谐振器呈短路特性，存在强电流，可以等效为呈现低阻抗的带通滤波器。

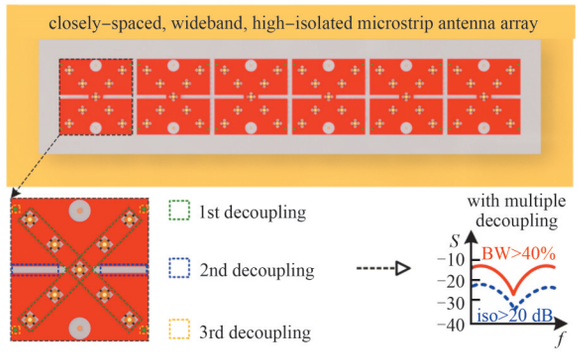

Fig.1 Decoupling mechanism of compact wideband antenna array
图 1 紧凑型宽带天线阵列解耦机理

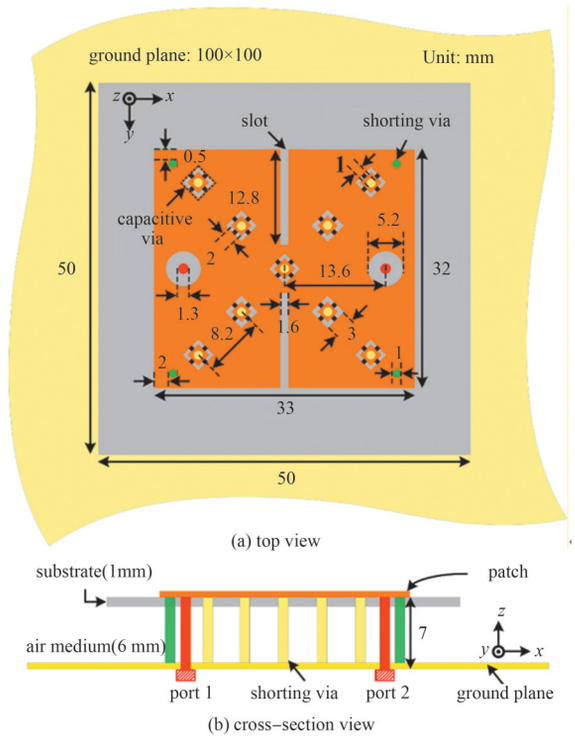

Fig.2 Configuration of 1×2 compact microstrip antenna
图 2 1×2 紧凑型微带天线结构图

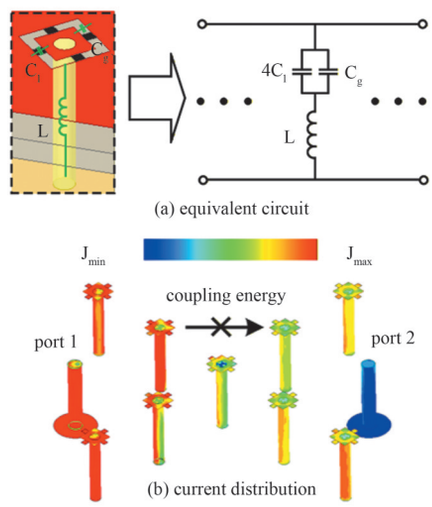

Fig.3 Decoupling principle of capacitive fence
图 3 容性栅栏的解耦原理

图3(b)中电容加载短路通孔结构能有效阻断耦合能量向负载端口的传输路径，从而抑制天线间互耦效应。通过在金属贴片的非辐射边加载一对1/4波长谐振的开口槽，成功将边缘强电流抑制，使得端口隔离度获得显著提升。同时，贴片边缘处的金属通孔对天线间的互耦起到一定的阻断作用。

由于介质基板、空气媒质和贴片电容具有低损耗的特性，该天线在宽频率范围内表现出高效率的优势。对1×2紧凑型宽带高隔离度微带天线进行加工实测，结果见图4。根据测试结果，该天线的阻抗带宽频率范围为5.24~6.49 GHz，相对带宽(Fractional Bandwidth，FBW)为21.3%，并且端口隔离度至少优于26 dB。其中30 dB解耦带宽为5.24~5.96 GHz(12.9%)。在整个工作频段内，仿真总效率超过90%，而测试的平均总效率达到了89%。在5.5 GHz时，测试和仿真的峰值增益分别为8.1 dBi和8.6 dBi。测试结果与仿真结果吻合，验证了所提出设计的可靠性。

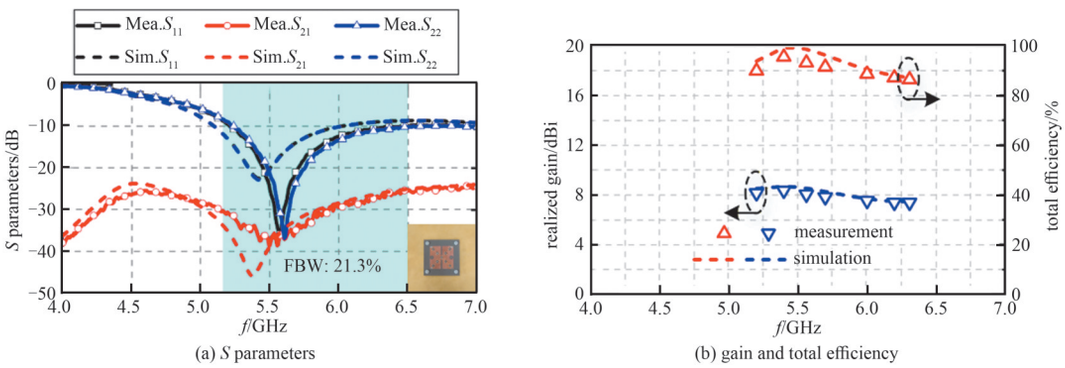

Fig.4 S parameters, gain and total efficiency for measurement and simulation
图4 测试与仿真的S参数、增益与总效率

图5为所提出的天线在5.5 GHz时的$\boldsymbol{E}$面和$\boldsymbol{H}$面的测试和仿真辐射方向图。通过引入短路通孔，削弱了沿y轴方向的电流强度，有效抑制了$\boldsymbol{H}$面的交叉极化水平。为快速验证所提出的解耦技术的有效性，对1×2微带天线中的一个端口馈电，另外一个端口接50 Ω匹配负载。由于不均匀分布的辐射能量，导致最大辐射方向偏离天顶方向30°。当解耦技术应用在阵列天线中，并不会出现方向图倾斜的现象，这主要是因为此时每个单元均是被激励的。测试与仿真辐射方向图展示了良好的一致性。

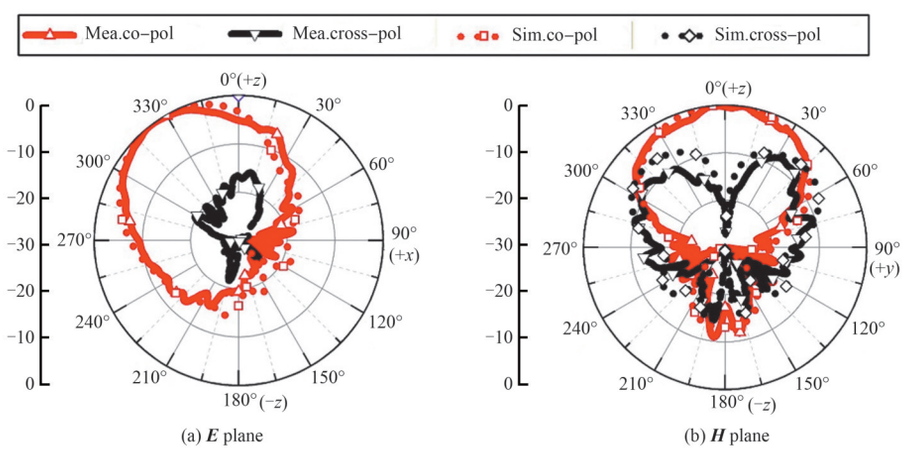

Fig.5 Measured and simulated radiation patterns
图5 测试与仿真的辐射方向图

2　MIMO微带天线阵列

为验证所提出的解耦方法不只适用于一维微带天线阵列，同样也适用于二维阵列，设计了一个2×2 MIMO微带天线阵列，并进行加工实测。图6中2个1×2紧凑型微带天线之间的边缘间距仅为0.046 λ_0。图7为该2×2阵列测试的S参数。测试的阻抗带宽为5.7~9.0 GHz(44.9%)。同时，端口隔离度在整个工作带宽上超过21.8 dB，证明了二维阵列中单元之间的良好隔离度。

基于2×2阵列，设计了一个2×6 MIMO微带天线阵列。图8为2×6 MIMO微带天线阵列结构图，2个1×2微带天线之间的边缘间距仅为0.046λ_0。根据图9的仿真结果，该阵列的阻抗带宽为43.5%，其范围为5.44~8.46 GHz。在工作频段内，端口隔离度优于20 dB，证明了所提出的解耦方法在二维大规模阵列中的适用性。与其他相关工作相比，所提出的解耦方法有效地在宽频率范围内实现了紧密间距下的微带天线之间的高隔离度。

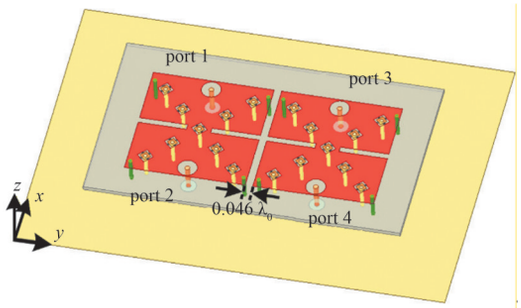

Fig.6 Configuration of 2×2 array
图6 2×2阵列结构图

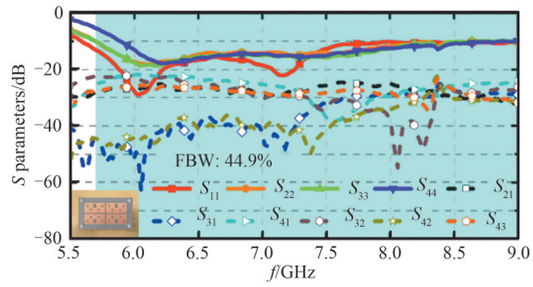

Fig.7 Measured *S* parameters
图7 测试的*S*参数

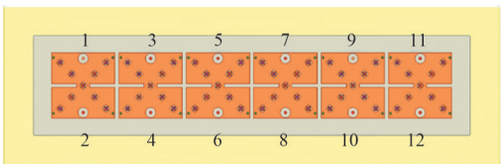

Fig.8 Configuration of 2×6 array
图8 2×6阵列结构图

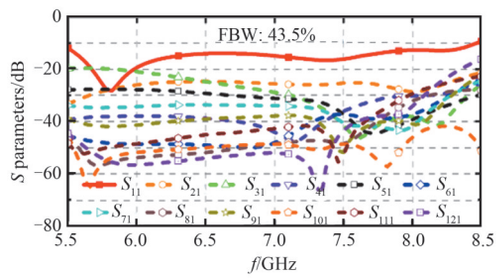

Fig.9 Simulated *S*-parameters
图9 仿真的*S*参数

为突出所提出的紧凑型宽带高隔离度天线的优势，将其与其他***E***面1×2微带天线阵列进行对比，如表1所示。在最近的相关研究中[5, 8-10]，这些天线的阻抗带宽均小于10%。在不添加任何额外结构的情况下[11]，介电谐振器天线的相邻端口之间的隔离度提高至15 dB。与其他相关工作相比，所提出的解耦技术成功地在紧凑型宽带微带天线之间的宽频率范围内实现了稳定的高隔离度。

表1 与其他紧凑型***E***面1×2微带天线阵列的对比

Table1 Comparison with other closely-spaced ***E***-plane 1×2 microstrip antenna arrays

Ref.	decoupling method	FBW/%	edge/center spacing (λ_0)	isolation/dB
[5]	LC resonator	2.0	0/0.12	> 25
[8]	modes cancellation	4.6	0.023/0.34	> 30
[9]	offset placement	4.0	0.007/0.41	> 20
[10]	CM of ground plane	7.2	0.130/0.44	> 28
[11]	weak field	11.4	0/0.10	> 15
this work	multiple decoupling	21.3	0.030/0.30	> 26

3 结论

在高隔离度MIMO微带天线的研究领域中，其阻抗带宽受限问题亟待解决。针对这一关键问题，本文提出一种多次解耦方法。该方法通过巧妙加载交叉型容性加载栅栏和开口槽，显著增强了微带天线的阻抗匹配性能与隔离性能。这一方法不仅能够在更近的天线间距条件下实现宽带解耦，展现出其独特的优势，还具备良好的可扩展性，能够推广应用于2×2微带天线阵以及更大规模的阵列。经过验证，二维微带天线阵的解耦带宽均超过40%，为长期以来学术界在微带天线宽带解耦方面面临的棘手难题提供了切实可行且行之有效的解决方案，在宽带高隔离度MIMO应用和天线阵列中具有相当大的潜力。

参考文献：

[1] CHEN Xiaoming,ZHANG Shuai,LI Qinlong. A review of mutual coupling in MIMO systems[J]. IEEE Access, 2018,6:24706-24719. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2830653.

[2] 丁志清,邢贝贝,姚婷. 一种5G手机的紧凑型16单元多频MIMO天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):1017-1022. (DING Zhiqing, XING Beibei, YAO Ting. A compact 16-element multi-band MIMO antenna for 5G mobile phones[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):1017-1022.) DOI:10.11805/TKY DA201906.1017.

[3] WEI Kun,LI Jianying,WANG Ling,et al. Mutual coupling reduction by novel fractal defected ground structure bandgap filter[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016,64(10):4328-4335. DOI:10.1109/TAP.2016.2591058.

[4] WANG Yan, DU Zhengwei. A wideband printed dual-antenna system with a novel neutralization line for mobile terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013(12):1428-1431. DOI:10.1109/LAWP.2013.2287199.

[5] HE Yijing,LI Yue. Compact co-linearly polarized microstrip antenna with fence-strip resonator loading for in-band full-duplex systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(11):7125-7133. DOI:10.1109/TAP.2021.3051380.

[6] WAN Zhengyuan, HE Yijing, BAI Yuming, et al. Compact, copolarized, and high-isolation two-port patch antenna for MIMO applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023,22(11):2705-2709. DOI:10.1109/LAWP.2023.3278035.

[7] SUN Libin,LI Yue,ZHANG Zhijun. Decoupling between extremely closely spaced patch antennas by mode cancellation method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(6):3074-3083. DOI:10.1109/TAP.2020.3030922.

[8] GUO Chaozong, LI Jinkai, YANG Dong, et al. Compact co-polarized decoupled microstrip patch array antenna based on TM_{02}/TM_{03} modes cancellation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(10): 9906-9911. DOI: 10.1109/TAP. 2022.3177520.

[9] QIAN J F, GAO S, SANZ-IZQUIERDO B, et al. Mutual coupling suppression between two closely placed patch antennas using higher-order modes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(6): 4686-4694. DOI: 10.1109/TAP. 2023. 3264874.

[10] LAI Qixuan, PAN Yongmei, ZHENG Shaoyong. A self-decoupling method for MIMO antenna array using characteristic mode of ground plane[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(3):2126-2135. DOI:10.1109/TAP.2023.3240561.

[11] LIANG Yuzhong, CHEN Fuchang, ZENG Wenfeng, et al. Design of self-decoupling dielectric resonator antenna with shared radiator[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(1):1053-1058. DOI:10.1109/TAP.2022.3217118.

作者简介：

宛郑圆(1998-)，男，硕士，主要研究方向为天线理论与设计.email:wan_zheng_yuan@163.com.

何翼景(1992-)，男，博士，副研究员，主要研究方向为基站与终端天线、毫米波封装天线、超表面天线.

孙厚军(1968-)，男，博士，教授，主要研究方向为毫米波与太赫兹技术.