



加载超表面的双频紧凑高隔离阵列天线设计

王丽黎, 张 衡, 王新庄, 徐亚妮

Dual-band compact high isolation array antenna design loaded with metasurface

WANG Lili, ZHANG Heng, WANG Xinzhuang, and XU Yani

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种双宽带雷达散射截面减缩的超表面设计方法

A metasurface design method for dual wide band radar cross section reduction

电波科学学报. 2021, 36(6): 887–895

基于组合梯度超表面的低RCS微带天线设计

Design of low RCS microstrip antenna based on combinatorial gradient metasurface

电波科学学报. 2018, 33(4): 441–446

一种陷波超宽带MIMO天线设计

Design of a compact ultra wideband MIMO antenna with WLAN band-rejected

电波科学学报. 2018, 33(4): 436–440

一种基于超表面的方向图可重构天线

A pattern reconfigurable antenna based on metasurface

电波科学学报. 2021, 36(6): 918–924

基于数字超表面的低剖面波束控制天线

A low profile beam controlling antenna based on digital metasurface

电波科学学报. 2021, 36(6): 938–946

一种基于超表面的低剖面宽带透镜天线

A low-profile wideband lens antenna based on metasurface

电波科学学报. 2018, 33(4): 397–403



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王丽黎, 张衡, 王新庄, 等. 加载超表面的双频紧凑高隔离阵列天线设计[J]. 电波科学学报, 2024, 39(2): 371-377. DOI: 10.12265/j.cjors.2023112
WANG L L, ZHANG H, WANG X Z, et al. Dual-band compact high isolation array antenna design loaded with metasurface[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(2): 371-377. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023112

加载超表面的双频紧凑高隔离阵列天线设计

王丽黎^{1,2} 张衡^{1*} 王新庄¹ 徐亚妮¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048; 2. 西安市无线光通信与网络研究重点实验室, 西安 710048)

摘要 为了减小极小距离多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 天线之间的相互耦合, 设计了一种极紧凑的高隔离度的双频 MIMO 贴片天线, 谐振频率分别为 2.45 GHz 和 3.5 GHz。该 MIMO 天线由两个对称的双层 U 型槽贴片天线组成, 其中边与边的距离为 0.5 mm ($0.004\lambda_0$, λ_0 为中心频率 2.45 GHz 时的自由空间波长)。利用不同宽度的双层金属线切割对作为超表面单元, 该超表面体积紧凑, 可以显著降低天线单元之间的相互耦合。仿真和测量结果表明: 在天线工作频段 2.4~2.5 GHz 和 3.4~3.6 GHz 范围内, 单元间的隔离度可以提高到 30 dB 以上, 并且两个天线端口阻抗匹配良好, 同时在低频段的总效率提高了 9% 左右; 两天线间的包络相关系数 (envelop correlation coefficient, ECC) 在 2.45 GHz 时由 0.33 降到 0.01, 在 3.5 GHz 时由 0.09 降到 0.006, 所设计天线具有良好的辐射性能。

关键词 多输入多输出 (MIMO); 紧凑; 双频; 超表面; 隔离度

中图分类号 TN822

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)02-0371-07

DOI 10.12265/j.cjors.2023112

Dual-band compact high isolation array antenna design loaded with metasurface

WANG Lili^{1,2} ZHANG Heng^{1*} WANG Xin Zhuang¹ XU Yani¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an 710048, China)

Abstract In order to reduce the coupling between very small distance multiple-input multiple-output (MIMO) antennas, an extremely compact dual-band MIMO patch antenna with resonant frequencies of 2.45 GHz and 3.5 GHz is designed. The MIMO antenna consists of two symmetrical double-slot U-slot patch antennas with an edge-to-edge distance of 0.5 mm ($0.004\lambda_0$, λ_0 is the free space wavelength at a center frequency of 2.45 GHz). Double-layer wire cut pairs of different widths are used as metasurface elements, which are compact and can significantly reduce the coupling between antenna elements. Through simulation and measurement, in the antenna operating frequency band 2.4–2.5 GHz and 3.4–3.6 GHz range, the isolation between the units can be increased to more than 30 dB, and the impedance of the two antenna ports is well matched, at the same time, the total efficiency in the low frequency band is increased by about 9%, and the envelop correlation coefficient (ECC) between the two antennas is reduced from 0.33 to 0.01 at 2.45 GHz, at 3.5 GHz, it drops from 0.09 to 0.006, which has good radiation performance.

Keywords multiple-input multiple-output (MIMO); compact; dual-band; metasurface; isolation

0 引言

近年来, 无线通信技术对系统容量扩展和数据传输效率提出了更高的要求。传统的单输入单输出

系统已经无法满足人们的需求, 多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术成为了新一代移动通信领域的主流技术。MIMO 系统是在收发两端设置多个天线, 在有限的带宽和功率情况下,

收稿日期: 2023-04-18

资助项目: 国家自然科学基金 (61771389)

通信作者: 张衡 E-mail: foreverheng520@foxmail.com

利用多径的影响极大地提高信道容量和资源利用率,完成高质量通信^[1]。然而,在多频段 MIMO 系统中,各频段天线单元之间会产生耦合效应使其性能恶化。因此,提高多频段 MIMO 天线隔离度的解耦技术至关重要。近年来,已经报道了许多天线解耦方法,如缺陷地结构^[2-4]、电磁带隙结构^[5-6]、解耦网络^[7-8]、自解耦^[9]、寄生元件^[10-11]、超表面结构^[12-16]等。缺陷地结构是指在地平面上加载分支结构或刻蚀特殊形状地板结构,减小引起相互耦合的感应电流。SOLTANI 等人^[2]引入缺陷地结构实现了双频天线单元的解耦,获得了较高的隔离性。电磁带隙结构是由于介质的周期性排列,使其具有高阻抗表面,有效减小了表面波,抑制了天线单元之间的耦合效应。TAN 等人^[5]提出了分离电磁带隙结构,将其插入天线阵列之间,最终在 3.48 GHz 和 4.88 GHz 的隔离度提高了 25.6 dB 和 43.7 dB。解耦网络通过将无源或者有源的微波网络连接天线以减小天线之间的互耦。但是,在多波段天线系统中,解耦网络的结构设计更加复杂,难以加工,成本高。自解耦是通过改变天线尺寸、馈电位置或结构使激励的耦合模式能够相互抵消,降低单元之间的耦合。邹晓鋆等人^[8]提出了一种共享孔径天线阵列去耦概念,在不增加额外去耦层的情况下,隔离度提高到 26.9 dB 以上。寄生元件是在寄生结构和非激励天线产生等幅反向电流以减少天线之间的相互耦合。LI 等人^[9]将金属壁和开口槽组成的解耦结构放置在天线之间,单元间距为 2 mm 时,各端口隔离度提高到 20 dB 以上。LIU 等人^[13]提出了一种利用超表面产生负磁导率频率区域来减弱空间中耦合波的方法,有效减小了边距极近距离下 MIMO 天线单元之间的互耦。超表面技术解耦阵列天线单元间距小,结构简单,在大规模 MIMO 阵列天线中具有很大的应用潜力。

本文设计了一种利用金属切割线对来提高单元间距极小的隔离度的双波段 MIMO 天线。通过加载 3×8 切割线对组成超表面上层以减少紧密放置的双波段 MIMO 天线的相互耦合。天线单元边间距为 $0.004\lambda_0$ (λ_0 是中心频率为 2.45 GHz 的自由空间波长),仿真与实测结果表明:天线在工作频段 2.4~2.5 GHz 和 3.4~3.6 GHz 均能获得较高的隔离性能,频带内天线阻抗匹配良好,隔离度均提高到 30 dB 以上;天线主辐射方向为 z 轴方向,且具有良好的辐射性能。

1 超表面解耦原理与设计

加载超表面的耦合天线的辐射场分布如图 1 所示。当左侧天线激励、右侧天线接 50 Ω 负载时,电

磁波沿 y 轴正方向传播分量为 $A_0 e^{jk_y y}$,传播波数 k 可以表示为

$$k = k_0 \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \quad (1)$$

式中, k_0 为空气中电磁波的波数。在超表面产生的介电常数或磁导率为负的区域中, k 可以被表示为

$$k = k_0 \cdot \sqrt{-|\mu_r| \cdot |\epsilon_r|} = jk_0 \cdot \sqrt{|\mu_r| \cdot |\epsilon_r|} \quad (2)$$

式 (2) 表明,当介电常数或磁导率为负时,超表面与阵列天线之间形成一个空间,电磁波在天线表面的传播波数为纯虚数,天线辐射的波在天线贴片方向上是截止的,电磁波主要沿 z 轴方向传播,进而可以有效减小天线单元间的互耦。

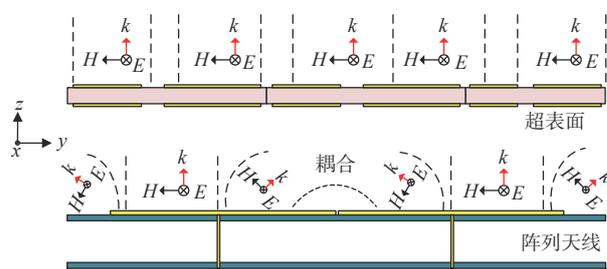


图 1 加载超表面的耦合天线的辐射场分布

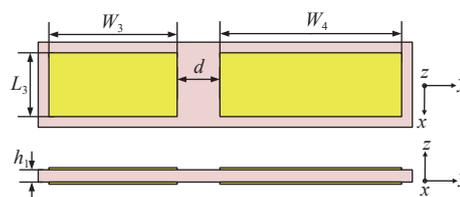
Fig. 1 Distribution of radiation field of a coupled antenna loaded with metasurface

在切割线对具有双频特性的基础上^[17],设计宽度不同的三层结构的超表面单元(该单元的详细尺寸如表 1 所示),印刷在相对介电常数为 4.3、厚度为 1.6 mm 的 FR-4 介质基板的两侧,图 2(a) 为超表面单元模型图。利用微波仿真软件 CST 周期性边界条件模拟了超表面单元的反射和透射系数,结果如图 2(b) 所示。利用标准反演方法^[18] 计算了超表面单元的有效介电常数和磁导率,结果如图 2(c) 所示,在天线所工作频段,介电常数实部为正,磁导率实部为负。调整参数 W_3 和 W_4 ,可以很容易地控制超表面单元的负磁导率频率区域,结果如图 2(d) 所示。

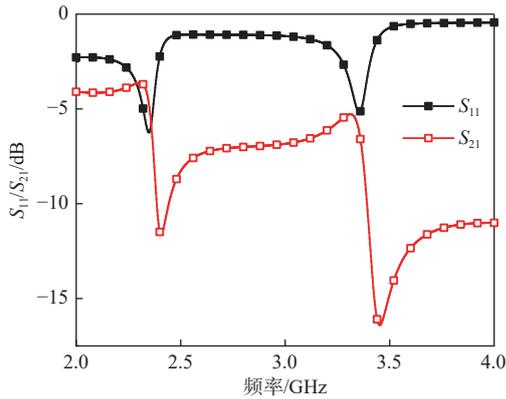
表 1 超表面天线单元参数

Tab. 1 Unit dimensions of the metasurface antenna mm

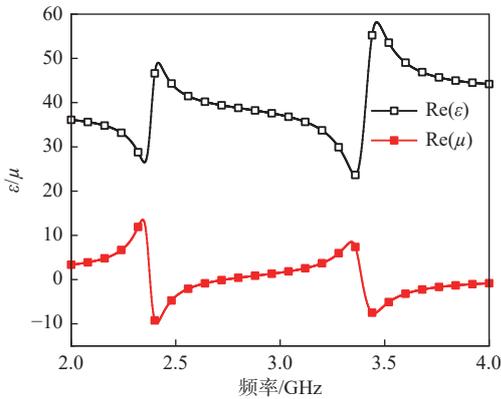
L_3	W_3	W_4	h_1	d
7.9	20.5	28.5	1.6	5.2



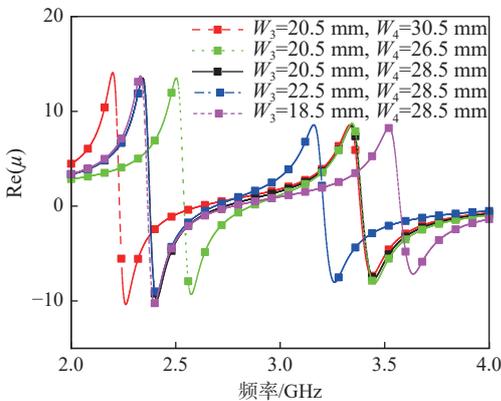
(a) 单元模型图
(a) Element model



(b) 单元 S 参数
(b) S parameters of the element



(c) 介电常数和磁导率
(c) Dielectric constant and permeability



(d) 不同 W_3 和 W_4 下的磁导率
(d) Permeability of metasurface elements with different W_3 and W_4

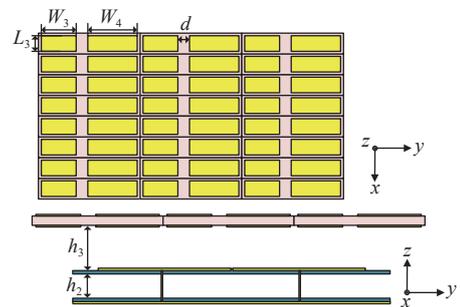
图 2 超表面单元模型、S 参数、电磁参数和不同宽度下的磁导率

Fig. 2 Metasurface element model, S parameters, electromagnetic parameters and permeability of different widths

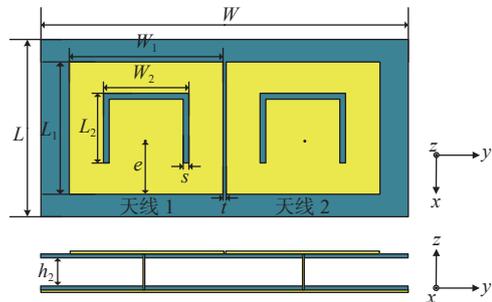
2 加载超表面的天线解耦设计

天线几何结构如图 3 所示, 由超表面和阵列天线组成。超表面由 3×8 切割线对单元组成, 双波段由蚀刻 U 型槽产生, 天线在 2.4~2.5 GHz 和 3.4~3.6 GHz 频段工作。U 型槽的贴片天线印刷在 0.5 mm

厚的 F4B 基板上, 其相对介电常数为 2.65, 损耗角正切为 0.002。天线同轴馈电, 并排放置, 两天线边距为 0.5 mm ($0.004\lambda_0$), 它们在 H 面耦合明显。利用微波仿真软件 CST 对天线进行仿真优化, 由于超表面覆层非常靠近天线, 加载超表面后, 天线需要重新匹配, 最终天线优化得到的 S 参数如图 4 所示。结果表明: 加载超表面之前天线在两个频段匹配良好, 反射系数均优于 -10 dB, 但在 2.45 GHz 和 3.5 GHz 时隔离度约为 9 dB 和 14 dB; 加载超表面后, 在天线匹配良好的前提下, 带宽变宽, 天线之间耦合降低, 2.45 GHz 时为 32 dB, 3.5 GHz 时为 40 dB。加载超表面后天线最终优化参数如表 2 所示。



(a) 超表面俯视图和加载超表面天线主视图
(a) Top view of the metasurface and main view of the antenna loaded with metasurface



(b) 天线俯视图和主视图
(b) Top and main views of the antenna

图 3 天线结构示意图

Fig. 3 Schematic of the antenna structure

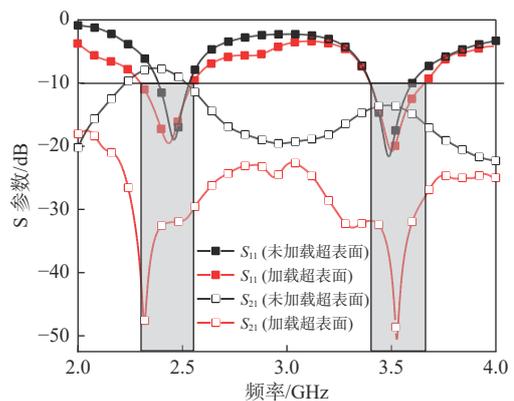


图 4 天线仿真 S 参数

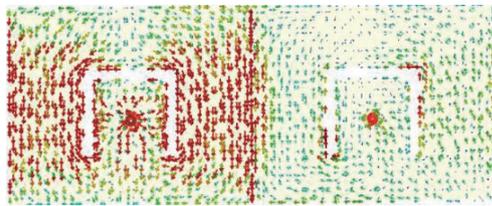
Fig. 4 Simulated S parameters of the antenna

表 2 天线结构参数

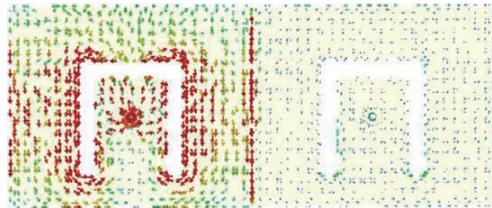
Tab. 2 Structural parameters of antennas mm

参数	取值	参数	取值	参数	取值
L	70.0	L_3	7.9	d	6.0
W	115.0	W_3	14.2	h_1	1.6
L_1	44.5	W_4	23.7	h_2	6.2
W_1	52.8	e	19.6	h_3	11.2
L_2	26.2	s	4.1		
W_2	15.1	t	0.5		

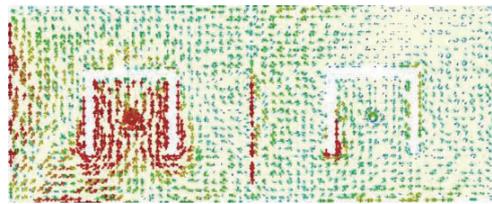
通过研究天线在低频和高频处的表面电流分布,可以进一步了解超表面解耦的工作机理。天线未加载和加载超表面的表面电流分布如图 5 所示,图 3 所示的天线 1 被激励、天线 2 接 50 Ω 负载,可以看出:加载超表面之前,天线 2 在低频和高频处存在很



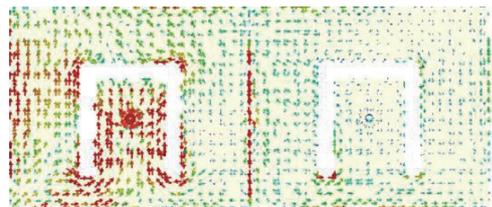
(a) 2.45 GHz 未加载超表面
(a) 2.45 GHz without metasurface



(b) 2.45 GHz 加载超表面
(b) 2.45 GHz with metasurface



(c) 3.5 GHz 未加载超表面
(c) 3.5 GHz without metasurface



(d) 3.5 GHz 加载超表面
(d) 3.5 GHz with metasurface

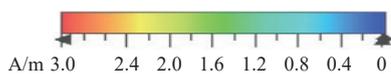


图 5 天线表面电流分布

Fig. 5 Current distribution on antenna surface

强的感应电流;引入超表面上层后,天线 2 上的耦合电流明显减弱,说明超表面的引入有效地抑制了单元之间的相互耦合。

3 参数分析

通过参数化研究,分析不同设计参数对天线隔离性能的影响,结果如图 6 所示,当分析超表面单元的宽度 W_3 、 W_4 、超表面与天线之间的高度 h_3 和单元个数中的一个参数时,其他参数与表 2 相同。

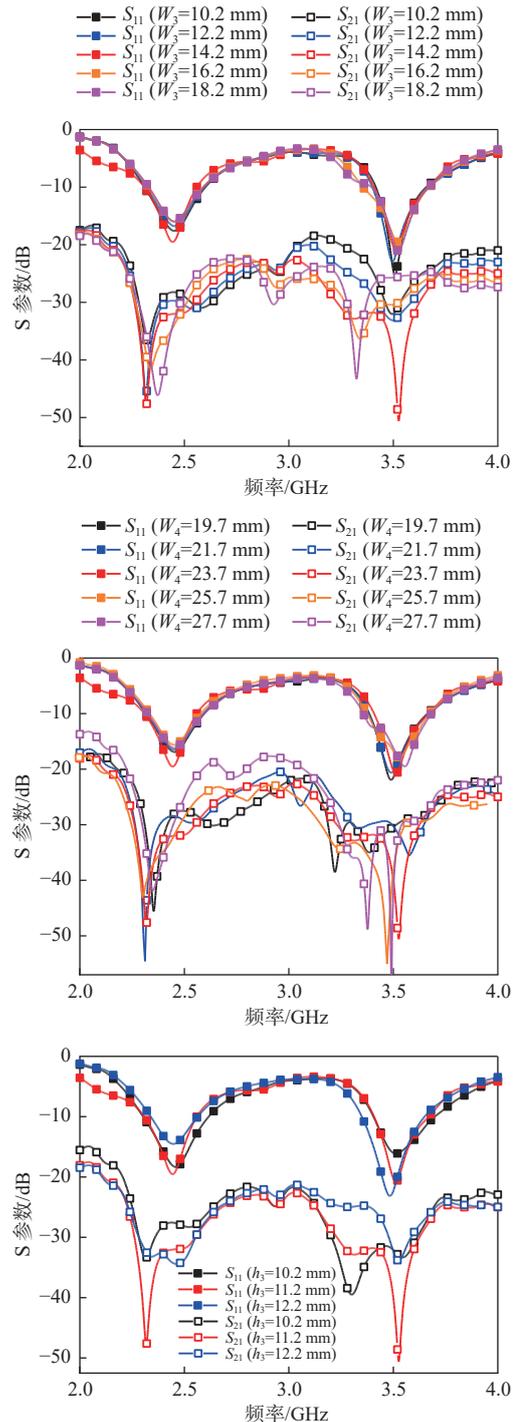


Fig. 6 S-parameter analysis of metasurface parameters

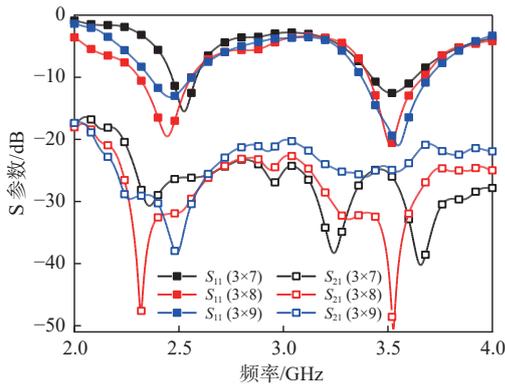


图 6 不同 W_3 、 W_4 、 h_3 和单元个数时的 S 参数

Fig. 6 S parameters for different W_3 , W_4 , h_3 and number of cells

从图 6(a) 和 (b) 可以观察到, 单元宽度变化对天线 S 参数影响较小, 并且隔离度的变化在高频段更为敏感, 这是由于超表面单元被设计为同时控制多个频段的反射或透射, 但不同频段之间的相互影响会导致它们之间的性能存在一定的耦合效应。当改变 W_3 、 W_4 参数时, 会影响超表面在一些频段上的反射或透射效果, 进而影响隔离度谐振峰的位置和强度。为获得最佳的匹配和解耦性能, 参数 W_3 和 W_4 分别选择为 14.2 mm 和 23.7 mm。

从图 6(c) 可以看出, 天线 S 参数对超表面的高度比较敏感, 当 h_3 增大时, 低频阻抗匹配变差, 高频段隔离度逐渐减小。为充分利用匹配和解耦性能, 确定参数 h_3 为 11.2 mm。

从图 6(d) 3x7、3x8 和 3x9 周期性单元组合的超表面阵列的匹配和隔离性能可以看出, 3x8 单元组的性能最佳。

4 结果与分析

制作的天线实物及其测试环境如图 7 所示。采用 Agilent E8361C 矢量网络分析仪测量天线 S 参数, 在西安普天天线有限公司进行天线测试, 天线测量使用两款天线, 分别作为收发天线安装在两个高楼楼顶, 中间没有任何阻挡, 收发天线之间距离大约

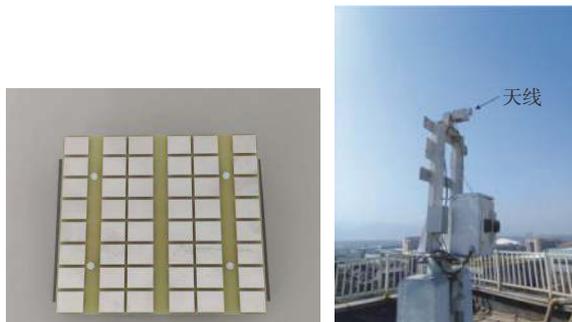


图 7 天线实物及其测量图

Fig. 7 Physical and measured diagram of the antenna

为 200 m, 在室外自然环境中利用 N9030A 频谱仪测量天线远场方向图, 测量过程中, 一个天线被激励, 另一个天线接 50 Ω 匹配负载。将天线固定在测试仪器上, 仪器支撑架进行升降和旋转, 实现测试天线角度扫描。

4.1 S 参数

图 8 为加载超表面天线 S 参数的仿真与测试结果, 可以观察到, 仿真与测试数据表现出良好的一致性。在低频段和高频段内, 天线匹配性能良好, 两天线之间的隔离度提高到 30 dB 以上。测试与仿真结果的差异主要来源于天线加工误差和加载超表面上层高度产生的误差。

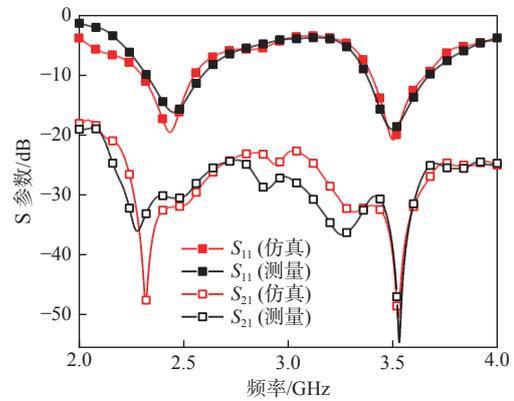


图 8 加载超表面天线 S 参数的仿真与测试结果

Fig. 8 S parameters of the antenna simulation and measured with metasurfaces

4.2 辐射参数

图 9 为加载超表面的天线在 2.45 GHz 和 3.5 GHz 下天线辐射方向图的仿真和测试结果, 天线 1 被激励, 天线 2 接 50 Ω 负载。结果表明, 测试与仿真结果有很好的 consistency。测试与仿真结果误差主要来源于天线加工精度和天气等因素。

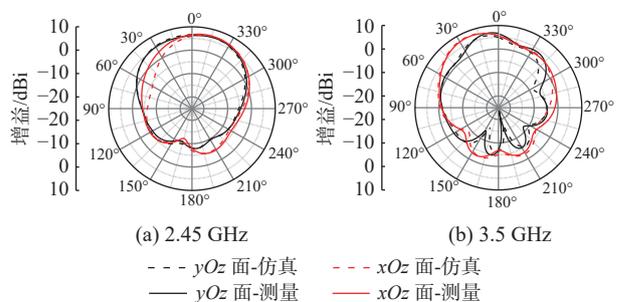


图 9 加载超表面天线的辐射方向图

Fig. 9 Antenna radiation pattern with metasurface

图 10 给出了在 2.45 GHz 和 3.5 GHz 无超表面和有超表面的辐射方向图, 可以看出, 加载超表面后, 方向图指向有所变化, 这是由于超表面的电磁响应特性与天线的电磁响应特性不同, 超表面的存在会

改变天线的辐射功率分布,从而使得天线方向图指向发生变化。另外,加载超表面后天线在 2.45 GHz 时的增益从 5.8 dBi 提高到 6.9 dBi,在 3.5 GHz 时的增益从 7.3 dBi 提高到 8.2 dBi。

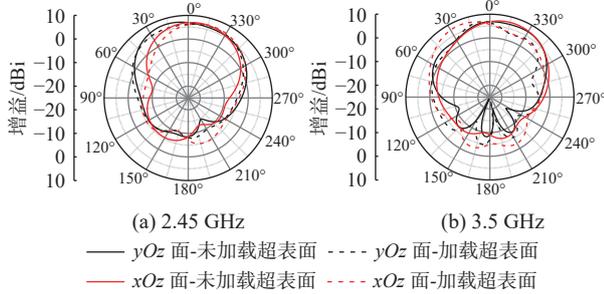


图 10 加载超表面前后天线的辐射方向图

Fig. 10 Simulated antenna radiation patterns with and without metasurface

图 11 给出了加载超表面前后天线的总效率和包络相关系数 (envelop correlation coefficient, ECC)。ECC 是 MIMO 天线系统中的一个重要指标,其值可由式 (3) 得到:

$$\rho_e = \frac{\left| \iint_{4\pi} [E_1(\theta, \varphi) \cdot E_2(\theta, \varphi)] d\Omega \right|^2}{\iint_{4\pi} |E_1(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \iint_{4\pi} |E_2(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (3)$$

$$E_1(\theta, \varphi) \cdot E_2(\theta, \varphi) = E_{\theta 1}(\theta, \varphi) E_{\theta 2}^*(\theta, \varphi) + E_{\varphi 1}(\theta, \varphi) E_{\varphi 2}^*(\theta, \varphi) \quad (4)$$

式中: $E_1(\theta, \varphi)$ 为天线 1 受激后的电场,天线 2 接匹配负载; $E_2(\theta, \varphi)$ 为天线 1 接匹配负载时天线 2 的电场。从图 11 可以看出,加载超表面后,总效率得到了提高,在 2.45 GHz 总效率提高了 9% 以上, ECC 在 2.45 GHz 时从 0.33 降到 0.01,在 3.5 GHz 时由 0.09 降到 0.006。

表 3 比较了本文设计天线与参考文献天线相关性能。可以看出,本文设计的天线单元间距最小,并且隔离性能得到显著提高。

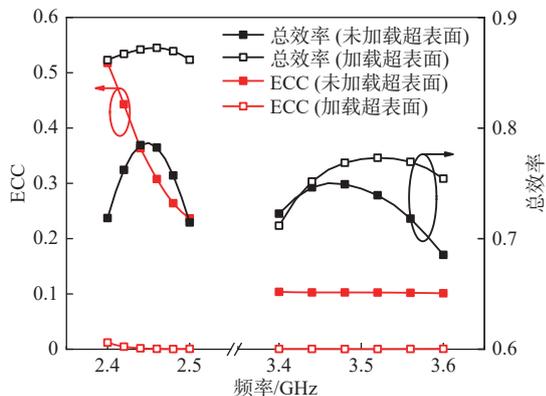


图 11 加载超表面前后天线的总效率和 ECC

Fig. 11 Total efficiency with and without metasurface and ECC

表 3 天线性能比较

Tab. 3 Antenna performance comparison

文献	解耦方法	频率/GHz	边-边距离/ λ_0	隔离度/dB	高度/ λ_0
[9]	金属墙和开口槽	2.45/6.1	0.016	>20	0.09
[12]	超表面	2.5	0.150	>25	0.31
[15]	解耦面	3.7/4.1	0.034	>30	0.21
本文	超表面	2.45/3.5	0.004	>30	0.09

5 结论

本文提出了一种利用不同宽度的非均匀金属切割线对组成的超表面,以减少极紧凑双频二元 MIMO 天线单元间的相互耦合,天线单元边距仅为 0.5 mm(0.004 λ_0)。仿真和测试结果表明,在 2.4~2.5 GHz 和 3.4~3.6 GHz 频段内,在天线匹配良好的前提下,两贴片天线之间的隔离度可以提高到 30 dB 以上,天线总效率得到提高, ECC 值较小。本文天线在天线单元边距更小的同时,实现了隔离度的提高,在工作频段内各性能指标良好,适用于多种无线通信的应用场景。

参考文献

- [1] SHOAIB S, SHOAIB I, SHOAIB N, et al. Design and performance study of a dual-element multiband printed monopole antenna array for MIMO terminals[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2014, 13: 329-332.
- [2] SOLTANI S, LOTFI P, MURCH R D. A dual-band multiport mimo slot antenna for WLAN applications[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2017, 16: 529-532.
- [3] QIAN B, CHEN X, ZHAO L, et al. Reduced cross-polarization and backside radiations for rectangular microstrip antennas using defected ground structure combined with decoupling structure[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2023, 22(3): 517-521.
- [4] 高明明, 宋杨, 南敬昌, 等. 一种小型化的高隔离度 UWB-MIMO 天线[J]. *电波科学学报*, 2022, 37(3): 484-490.
- [5] GAO M M, SONG Y, NAN J C, et al. A miniaturized high isolation UWB-MIMO antenna[J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37(3): 484-490. (in Chinese)
- [6] TAN X, WANG W, WU Y, et al. Enhancing isolation in dual-band meander-line multiple antenna by employing split EBG structure[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(4): 2769-2774.
- [7] KUMAR N, USHA KIRAN K. Meander-line electromagnetic bandgap structure for UWB MIMO antenna mutual coupling reduction in E-plane[J]. *AEU-international journal of electronics and communications*, 2020, 127: 153423.
- [7] PAN B C, CUI T J. Broadband decoupling network for

- dual-band microstrip patch antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2017, 65(10): 5595-5598.
- [8] 邹晓黎, 王光明, 王亚伟, 等. 基于耦合谐振去耦网络的双频近距天线解耦[J]. *微波学报*, 2018, 34(2): 25-29.
ZOU X J, WANG G M, WANG Y W, et al. Decoupling of dual-band closely spaced antennas based on coupled resonator decoupling network[J]. *Journal of microwaves*, 2018, 34(2): 25-29. (in Chinese)
- [9] LI Y, CHU Q. Self-decoupled dual-band shared-aperture base station antenna array[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2022, 70(7): 6024-6029.
- [10] WONG K, JIANG H, LI W. Decoupling hybrid metal walls and half-wavelength diagonal open-slots based four-port square patch antenna with high port isolation and low radiation correlation for 2.4/5/6 GHz WiFi-6E 4 × 4 MIMO access points[J]. *IEEE access*, 2022, 10: 81296-81308.
- [11] BOUKARKAR A, LIN X Q, JIANG Y, et al. A miniaturized extremely close-spaced four-element dual-band mimo antenna system with polarization and pattern diversity[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(1): 134-137.
- [12] WANG Z, LI C, YIN Y. A meta-surface antenna array decoupling (MAAD) design to improve the isolation performance in a MIMO system[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 61797-61805.
- [13] LIU F, GUO J, ZHAO L, et al. A meta-surface decoupling method for two linear polarized antenna array in sub-6 GHz base station applications[J]. *IEEE access*, 2019, 7: 2759-2768.
- [14] LIU F, GUO J, ZHAO L, 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.
- [15] GUO J, LIU F, ZHAO L, et al. Meta-surface antenna array decoupling designs for two linear polarized antennas coupled in H-plane and E-plane[J]. *IEEE access*, 2019, 7: 100442-100452.
- [16] NIU Z, ZHANG H, CHEN Q, et al. Isolation enhancement in closely coupled dual-band MIMO patch antennas[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2019, 18(8): 1686-1690.
- [17] HUANG C, ZHAN Z, FENG Q, et al. Metamaterial composed of wire pairs exhibiting dual band negative refraction[J]. *Applied physics B*, 2010, 98(2-3): 365-370.
- [18] SZABO Z, PARK G, HEDGE R, et al. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2010, 58(10): 2646-2653.

作者简介

王丽黎 (1968—), 女, 河南人, 西安理工大学副教授, 硕士生导师, 主要从事天线与电波传播、先进导航技术的研究。E-mail: wanglili@xaut.edu.cn

张衡 (1998—), 男, 陕西人, 西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为高隔离天线。E-mail: foreverheng520@foxmail.com

王新庄 (1993—), 男, 陕西人, 西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为天线与电波传播。E-mail: wang2012xz@163.com